

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**REOMETRÍA DE FLUJOS HIPERCONCENTRADOS
CON EQUIPO ROTACIONAL**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

JOSÉ CARLOS MENDOZA CHUCHÓN

Lima- Perú

2014

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

INDICE	
RESUMEN	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE CUADROS	10
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS.....	12
INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
1.1 ASPECTOS DE LA MECANICA DE FLUIDOS.....	16
1.1.1 Formas diferenciales de las leyes fundamentales.....	16
1.1.2 El Número de Reynolds.....	17
1.1.3 Clasificación de flujos	19
1.1.4 Flujo entre cilindros rotatorios.....	23
1.2 REOLOGÍA.....	25
1.2.1 Principios básicos.....	25
1.2.2 Antecedentes	26
1.2.3 Definición de Reología.....	28
1.2.4 Aspectos principales de la Reología.....	30
1.2.5 Clasificación de Fluidos por Comportamiento Reológico	36
1.2.6 Flujos Hiperconcentrados	43
1.2.7 Modelamiento Reológico	47
1.3 REOMETRÍA E INSTRUMENTACIÓN	57
1.3.1 Consideraciones iniciales	57
1.3.2 Condiciones límite para la Reometría.....	57
1.3.3 Reometría Absoluta.....	58
1.3.4 Tipos de reómetros.....	60
CAPITULO II: DESARROLLO DEL EQUIPO EXPERIMENTAL	67
2.1 CONCEPCION DEL DISEÑO.....	67

2.1.1	Criterios básicos del diseño.....	67
2.1.2	Ecuaciones que gobiernan el diseño del reómetro rotacional de cilindros concéntricos.....	71
2.1.3	Planeamiento y construcción del equipo experimental.....	73
2.1.4	Secuencia de experimentación.....	85
2.1.5	Configuraciones de rotación.....	86
2.2	CALIBRACION DEL EQUIPO INSTRUMENTAL.....	87
2.2.1	Potencia consumida por el equipo rotatorio de medición reológica.....	87
2.2.2	Obtención de la eficiencia del motor eléctrico.....	88
CAPITULO III: MANUAL DE OPERACIONES.....		92
3.1	ASPECTOS PRELIMINARES.....	92
3.1.1	Advertencias y precauciones.....	92
3.2	INSTALACIONES BÁSICAS.....	93
3.2.1	Requisitos mínimos de las instalaciones.....	93
3.2.2	Equipamiento auxiliar.....	94
3.3	PROCEDIMIENTO DE EXPERIMENTACIÓN.....	95
3.3.1	Instalación del equipo reométrico.....	95
3.3.2	Procedimiento para el registro de datos.....	97
3.3.3	Calibración del equipo en rotación libre.....	98
3.3.4	Experimentación con flujos hiperconcentrados.....	99
3.4	TRATAMIENTO DEL REGISTRO DE DATOS.....	100
3.4.1	Eliminación de pulsos anómalos.....	101
3.4.2	Promedio de datos.....	101
3.4.3	Cálculo de la potencia eléctrica en giro sumergido.....	102
3.4.4	Cálculo de la potencia eléctrica efectiva.....	103
3.4.5	Potencia mecánica efectiva.....	103
3.4.6	Cálculo de parámetros reológicos.....	103

CAPITULO IV: APLICACIÓN A FLUJOS HIPERCONCENTRADOS	104
4.1 JUSTIFICACIÓN	104
4.2 MUESTRAS ANALIZADAS	104
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS	105
4.3.1 Descripción visual de la muestra	105
4.3.2 Propiedades físicas analizadas	106
4.3.3 Propiedades químicas analizadas	108
4.4 EXPERIMENTACIÓN	109
4.4.1 Concentración sólida de muestras.....	109
4.4.2 Temperatura de experimentación	110
4.4.3 Resultados de la experimentación.....	111
4.5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	125
4.5.1 Cálculo del esfuerzo de cedencia (τ_y).....	125
4.5.2 Análisis de concentración vs. Esfuerzo de cedencia.....	130
4.5.3 Análisis de concentración (c_w) vs. pH del fluido	133
4.6 MODELAMIENTO REOLÓGICO	135
4.6.1 Modelamiento según el Flujo Plástico de Bingham.....	136
4.6.2 Modelamiento según O'brien y Julien.....	147
4.7 MECÁNICA DE FLUJOS HIPERCONCENTRADOS	156
4.7.1 Criterio de estabilidad de taludes.....	156
4.7.2 Flujo de relaves.	158
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	161
5.1 CONCLUSIONES.....	161
5.2 RECOMENDACIONES.....	163
BIBLIOGRAFÍA	166
ANEXOS.....	168

RESUMEN

La presente investigación, nace con la inquietud de estudiar el comportamiento reológico de flujos hiperconcentrados que, como parte de los fluidos no newtonianos, se caracterizan por ofrecer diferentes respuestas a la aplicación de un esfuerzo cortante, esto asociado a sus propiedades físico químicas intrínsecas.

En tal contexto, el primer inconveniente surge al no contar con un equipo reométrico donde realizar dicha experimentación, por lo que la investigación se realizó en etapas diferenciadas.

La primera etapa de la investigación que abarcó el estudio de los principios fundamentales de la mecánica de fluidos, reología y reometría, condujo al diseño y fabricación de un equipo reométrico rotacional capaz de ofrecer la caracterización reológica de un flujo hiperconcentrado en forma directa.

Como segunda etapa en la investigación, se experimentó con flujos hiperconcentrados preparados en base a relaves procedentes de dos plantas mineras de distintas características (cuprífero y polimetálico).

La conclusión relevante en la investigación efectuada para una misma concentración volumétrica, en dos muestras de procedencias distintas, evidencia un comportamiento reológico diferenciado, corroborándose la estrecha relación entre el esfuerzo de corte y la viscosidad de la mezcla.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Volumen de control infinitesimal en coordenadas rectangulares	16
Figura 1.2. Fuerzas que actúan en una partícula infinitesimal.....	16
Figura 1.3. (a).Flujo Laminar. (b).Flujo transicional c).Flujo turbulento	20
Figura 1.4. Flujo de deformación alrededor de una esfera descendente.....	22
Figura 1.5. Flujo entre cilindros concéntricos	23
Figura 1.6. Deformación producida por un esfuerzo normal de compresión.....	25
Figura 1.7. Deformación producida por aplicación de un esfuerzo de corte.	26
Figura 1.8. Deformación de un cuerpo sólido.....	29
Figura 1.9. Flujo entre dos placas paralelas (modelo elemental)	30
Figura 1.10. Curva de fluidez de un fluido newtoniano.....	33
Figura 1.11. Curva de viscosidad de un fluido newtoniano	33
Figura 1.12. Comportamiento newtoniano de algunos fluidos.....	37
Figura 1.13. Curvas flujo de fluidos no newtonianos	38
Figura 1.14. Curvas de viscosidad de fluidos no newtonianos	38
Figura 1.15. Viscosidad dinámica y aparente de fluidos no newtonianos.....	39
Figura 1.16. Comportamiento del fluido con dispersiones en reposo y en flujo ..	41
Figura 1.17. Dependencia de la velocidad de corte en fluidos seudo-plásticos..	41
Figura 1.18. Clasificación general del transporte de sedimentos por gravedad (Varnes, 1958; Pierson y Costa, 1987).....	44
Figura 1.19. Clasificación de flujos según Coussot (1997).....	45
Figura 1.20. Modelos no newtonianos en estado estacionario	47
Figura 1.21. Respuestas al corte para fluidos viscosos y viscoelásticos	58
Figura 1.22. Tipos de flujo modelados.	59
Figura 1.23. Bosquejo del año 1912 de un viscosímetro Searle de esfuerzo controlado de cilindros concéntricos.....	60
Figura 1.24. Reómetros rotacionales de medición absoluta: a) reómetro de cilindros concéntricos, b) reómetro cono-placa y c) reómetro de placas paralelas	61
Figura 1.25. Diseño de reómetro estándar con hendiduras arriba y abajo	62
Figura 1.26. Diseño de reómetro rotacional cono-placa.....	63
Figura 1.27. Perfiles de velocidad de flujo y de viscosidad en los sistemas de medición Searle y Couette.	64
Figura 1.28. Tipos de reómetros rotatorios.	65

Figura 2.1.	Comparación del esfuerzo de cedencia en Reómetros CS y CR. ..	70
Figura 2.2.	Componentes de un Reómetro de Cilindros Concéntricos.....	71
Figura 2.3.	Cilindro rotatorio.....	72
Figura 2.4.	Esquema de funcionamiento.....	73
Figura 2.5.	Ventana de dialogo principal del programa	77
Figura 2.6.	Interfaz electrónico - mecánico. 1) Vista frontal. 2) Vista posterior. .	78
Figura 2.7.	Terminales del interfaz.....	78
Figura 2.8.	Esquema de base y soporte mecánico del equipo rotacional.....	79
Figura 2.9.	Base metálica y cilindro interior.....	80
Figura 2.10.	Disposición de los discos en el equipo rotatorio.....	80
Figura 2.11.	Esquema del cilindro interior	81
Figura 2.12.	Esquema de cilindro exterior.....	82
Figura 2.13.	Disposición de cilindro exterior en el equipo rotatorio	83
Figura 2.14.	Disposición del motor en el equipo rotatorio.....	85
Figura 2.15.	Esquema de sistema polea-equipó rotatorio para determinar la eficiencia del motor eléctrico.	91
Figura 3.1.	Horno eléctrico de laboratorio.	94
Figura 3.2.	Conexión a terminales al interfaz electrónico - mecánico.....	96
Figura 3.3.	Implementación de equipo mecánico.....	96
Figura 3.4.	Flujo hiperconcentrado entre cilindros interior y exterior.	100
Figura 3.5.	Data de experimentación almacenada (para 150 rpm).....	100
Figura 3.6.	Ubicación de pulsos anómalos (para 5 rpm).	101
Figura 3.7.	Promedio de datos (para 100 rpm).....	102
Figura 4.1.	Muestra seca y molida del relave Cobriza.....	105
Figura 4.2.	Muestra seca y molida del relave Volcan.	105
Figura 4.3.	Método del picnómetro en 4 muestras del relave Volcan.	106
Figura 4.4.	Prueba de hidrómetro: Volcan (Izq.). Cobriza (Der.)	107
Figura 4.5.	Granulometría Muestras de relave Cobriza.....	107
Figura 4.6.	Granulometría Muestras de relave Volcan	108
Figura 4.7.	Curva de fluidez M-1	111
Figura 4.8.	Curva de viscosidad M-1.....	112
Figura 4.9.	Curva de esfuerzo-viscosidad M-1	112
Figura 4.10.	Curva de fluidez M-2.....	113
Figura 4.11.	Curva de viscosidad M-2.....	114
Figura 4.12.	Curva esfuerzo-viscosidad M-2.....	114

Figura 4.13. Curva de fluidez M-3.....	115
Figura 4.14. Curva de viscosidad M-3.....	116
Figura 4.15. Curva de esfuerzo-viscosidad M-3.....	116
Figura 4.16. Curva de Fluidez M-4.....	117
Figura 4.17. Curva de viscosidad M-4.....	118
Figura 4.18. Curva de esfuerzo-viscosidad M-4.....	118
Figura 4.19. Curva de fluidez M-5.....	119
Figura 4.20. Curva de viscosidad M-5.....	120
Figura 4.21. Curva esfuerzo-viscosidad M-5.....	120
Figura 4.22. Curva de fluidez M-6.....	121
Figura 4.23. Curva de viscosidad M-6.....	122
Figura 4.24. Curva de esfuerzo-viscosidad M-6.....	122
Figura 4.25. Curva de fluidez M-7.....	123
Figura 4.26. Curva de viscosidad M-7.....	124
Figura 4.27. Curva de esfuerzo-viscosidad M-7.....	124
Figura 4.28. Rango donde se ubica el esfuerzo de cedencia.....	125
Figura 4.29. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-1.....	126
Figura 4.30. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-2.....	127
Figura 4.31. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-3.....	127
Figura 4.32. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-4.....	128
Figura 4.33. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-5.....	128
Figura 4.34. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-6.....	129
Figura 4.35. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-7.....	129
Figura 4.36. Esfuerzo de cedencia - C_w . Relave Cobriza.....	131
Figura 4.37. Esfuerzo de cedencia - C_v . Relave Cobriza.....	131
Figura 4.38. Esfuerzo de cedencia - C_w . Relave Volcan.....	132
Figura 4.39. Esfuerzo de cedencia - C_v . Relave Volcan.....	133
Figura 4.40. pH vs. Concentración en peso, Relave Cobriza.....	134
Figura 4.41. pH vs. Concentración en peso, Relave Cobriza.....	135
Figura 4.42. Simulación de Bingham - condición μ y τ_y simulados. Relave Cobriza.....	138
Figura 4.43. Simulación de Bingham - Condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza.....	141
Figura 4.44. Simulación de Bingham - condición μ y τ_y simulados. Relave Volcan.....	144

Figura 4.45. Simulación de Bingham - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan.....	146
Figura 4.46. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ y τ_y simulados. Relave Cobriza.	148
Figura 4.47. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza.....	150
Figura 4.48. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ y τ_y simulados. Relave Volcan.	152
Figura 4.49. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan.....	154
Figura 4.50. Esquema de la prueba del Slump	157
Figura 4.51. Relación entre longitud de onda y altura de flujo.....	158

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1.	Leyes Fundamentales para Flujos Incompresibles	18
Cuadro 1.2.	Algunos valores de viscosidad dinámica a 20°C.....	32
Cuadro 1.3.	Flujos no newtonianos según comportamiento reológico.....	40
Cuadro 1.4.	Clasificación según Costa (1988).....	45
Cuadro 1.5.	Parámetros del modelo de la potencia para varios fluidos a temperatura ambiente	48
Cuadro 1.6.	Parámetros de Ellis para soluciones de carboximetilcelulosa en agua.....	49
Cuadro 1.7.	Parámetros de Reiner-Phillippoff para diversos fluidos.....	50
Cuadro 1.8.	Parámetros del plástico de Bingham	51
Cuadro 2.1.	Comparación entre reómetros rotacionales	68
Cuadro 2.2.	Dimensiones del cilindro interior.....	81
Cuadro 2.3.	Dimensiones del cilindro Exterior.....	83
Cuadro 2.4.	Características del motor.....	84
Cuadro 2.5.	Discos reductores de velocidad.....	86
Cuadro 2.6.	Configuraciones de velocidad y velocidades de rotación.....	87
Cuadro 2.7.	Consumos de potencia eléctrica en giro libre.	88
Cuadro 2.8.	Resultados de la eficiencia.....	91
Cuadro 3.1.	Cuadro parcial de almacenamiento y cálculo de la potencia eléctrica.	102
Cuadro 4.1.	Resultados de Gravedad Específica.....	106
Cuadro 4.2.	Resultados de pH.....	109
Cuadro 4.3.	Concentración sólida de la muestra.....	109
Cuadro 4.4.	Temperatura de experimentación.....	110
Cuadro 4.5.	Resultados muestra M-1.	111
Cuadro 4.6.	Resultados muestra M-2.	113
Cuadro 4.7.	Resultados muestra M-3.	115
Cuadro 4.8.	Resultados muestra M-4.	117
Cuadro 4.9.	Resultados muestra M-5.	119
Cuadro 4.10.	Resultados muestra M-6.	121
Cuadro 4.11.	Resultados muestra M-7.	123
Cuadro 4.12.	Resumen de resultados de la experimentación.....	130
Cuadro 4.13.	Concentración y Esfuerzos de cedencia Relave Cobriza.....	130
Cuadro 4.14.	Concentración y Esfuerzos de cedencia Relave Volcan.....	132

Cuadro 4.15. Concentración y pH Relave Cobriza.....	133
Cuadro 4.16. Concentración y pH Relave Volcan.	134
Cuadro 4.17. Datos experimentales - Condición μ y τ_y simulados. Relave Cobriza.....	137
Cuadro 4.18. Simulación de Bingham - condición μ y τ_y simulados. Relave Cobriza.....	137
Cuadro 4.19. Datos experimentales - Condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza.	140
Cuadro 4.20. Simulación de Bingham - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza.	140
Cuadro 4.21. Datos experimentales - Condición μ y τ_y simulados. Relave Volcan.....	143
Cuadro 4.22. Simulación de Bingham - condición μ y τ_y simulados. Relave Volcan.....	143
Cuadro 4.23. Datos experimentales - Condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan.....	145
Cuadro 4.24. Simulación de Bingham - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan.....	146
Cuadro 4.25. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ y τ_y simulados. Relave Cobriza.....	148
Cuadro 4.26. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza.	150
Cuadro 4.27. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ y τ_y simulados. Relave Volcan.	152
Cuadro 4.28. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan.....	153
Cuadro 4.29. Resultados de estabilidad – Relave cobriza.	157
Cuadro 4.30. Resultados de estabilidad – Relave Volcan.....	157
Cuadro 4.31. Resultados experimentales en matriz A5.....	159
Cuadro 4.32. Resultados experimentales de la presente investigación.....	159
Cuadro 4.33. Resultados a escala real.	160
Cuadro 4.34. Resultados de flujo para los relaves Cobriza y Volcan.	160

LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS

c :	Cohesión
C :	Coefficiente de esfuerzos cortantes inerciales
CC:	Reómetro rotacional de cilindros concéntricos
CP:	Reómetro rotacional de cono-placa
CS:	Reómetro rotacional de esfuerzo controlado
CR:	Reómetro rotacional de velocidad controlada
C_v :	Concentración volumétrica.
C_w :	Concentración gravimétrica.
De :	Número de Deborah
d_s :	Tamaño del sedimento
$\frac{d_v}{d_y}$:	Velocidad de corte o deformación
F :	Fuerza generada por la superficie lateral de contacto
G :	Módulo de Young
I_i :	Intensidad de corriente
I_p :	Intensidad de corriente promedio
K_v :	Constante de Von Karman
l_m :	Longitud de Prandtl
M :	Momento o torque
P :	Presión dispersiva normal
P_E :	Potencia eléctrica inicial producida
P_M :	Potencia mecánica
PP:	Reómetro rotacional de placas paralelas
p_s :	Presión intergranular
R_e :	Radio exterior del equipo rotacional
R_i :	Radio interior del equipo rotacional
t :	Tiempo característico del material
T :	Tiempo característico de experimentación
V_c :	Velocidad controlada en el proceso de rotación
V_i :	Voltaje inicial
V_p :	Voltaje promedio
y :	Altura del cuerpo sólido
ΔL :	Deformación del cuerpo
γ :	Tensión adimensional
$\dot{\gamma}$:	Razón o velocidad de corte
ϕ :	Ángulo de fricción interna
μ :	Viscosidad dinámica
ν :	Viscosidad cinemática

ρ :	Densidad del fluido
ρ_m :	Densidad de la mezcla
ρ_s :	Densidad de las partículas sólidas
σ_n :	Esfuerzo normal
τ :	Esfuerzo de corte
τ_c :	Esfuerzo límite cohesivo
τ_d :	Esfuerzo cortante dispersivo
τ_g :	Tensión de corte granular
τ_{mc} :	Esfuerzo de Mohr-Coulomb
τ_t :	Esfuerzo cortante turbulento
τ_v :	Esfuerzo cortante viscoso
τ_y :	Esfuerzo de cedencia
ω_i :	Velocidad angular del cilindro interior (rad/s)

INTRODUCCIÓN

Los flujos hiperconcentrados, estudiados dentro del campo de la Reología, se definen como una mezcla fluida de sólidos granulares y líquido, donde la concentración de partículas sólidas se encuentra, por lo general, en un rango que va del 25% al 45% en volumen, o del 40% al 75% en peso. El comportamiento de estos flujos, como en la mayoría de fluidos reales, al ser analizado, no se limita al comportamiento de un fluido newtoniano. Esta distorsión, se debe a condiciones particulares de la mezcla como las características físico-químicas del componente granular o líquido de la mezcla fluida, la concentración de sólidos en el fluido, la temperatura de experimentación, las condiciones de presión a la cual se desarrolla el flujo, etc.

En el campo de la Ingeniería, el estudio de este peculiar comportamiento toma relevancia, por cuanto se presenta en innumerables procesos y fenómenos de origen natural o artificial; por ejemplo, el modelamiento de un flujo de lodos o un flujo de escombros, requiere la obtención de parámetros geotécnicos del material del suelo con la finalidad de asociarlos al comportamiento de un flujo hiperconcentrado característico que permitan inferir condiciones o parámetros reológicos del mismo. Otro ejemplo de importancia se halla en procesos mineros, donde la necesidad de transportar sus relaves (flujos hiperconcentrados de mediana a alta toxicidad) hacia depósitos especiales acondicionados para su almacenamiento, hace indispensable el conocer y controlar los parámetros reológicos del flujo, para evitar problemas de colmatación y/o decantación, debido a las diversas condiciones del diseño de transporte.

La presente tesis está orientada a la investigación de flujos hiperconcentrados con el propósito de caracterizar las sustancias ensayadas, por medio de sus parámetros reológicos, habiéndose requerido inicialmente diseñar y fabricar un reómetro de tipo rotacional para la fase experimental. Implementación de los fundamentos de operación del equipo, para que pueda ser operado por los interesados en la línea de investigación, así como también los lineamientos básicos para la preparación de muestras de flujo hiperconcentrado.

El capítulo I expone los fundamentos teóricos tanto de la mecánica de fluidos, como de reología y reometría.

En el capítulo II se conceptualiza el diseño del equipo experimental, cuyo manual de operaciones se incluye en el capítulo III.

El capítulo IV desarrolla los diferentes aspectos inherentes a la experimentación, el análisis de los resultados y la representatividad del modelo reológico.

Finalmente las conclusiones y recomendaciones son propuestas en el capítulo V, complementándose con los anexos de la instrumentación y los materiales ensayados.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 ASPECTOS DE LA MECANICA DE FLUIDOS

1.1.1 Formas diferenciales de las leyes fundamentales

Aplicando la conservación de masa a un volumen pequeño en el flujo de un fluido, a través de cada una de las caras del volumen de control mostrado (Figura 1.1), el flujo de masa neto que entra al elemento es igual a la velocidad de cambio de la masa del elemento, es decir:

$$\dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida} = \frac{\partial}{\partial t} m_{elemento} \quad \dots \text{(Ec. 1.1)}$$

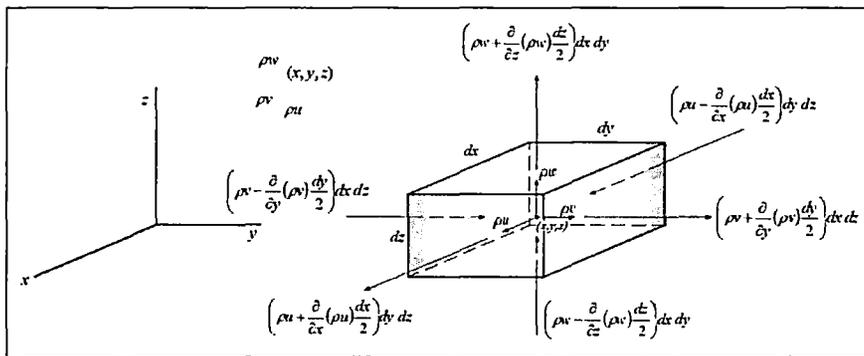


Figura 1. 1. Volumen de control infinitesimal en coordenadas rectangulares

Ref. Bib. [9]

Para derivar la ecuación diferencial de cantidad de movimiento, considere las fuerzas que actúan en la partícula de fluido infinitesimal mostrada en la Figura 1.2, donde se muestran solo las fuerzas que actúan en las caras positivas.

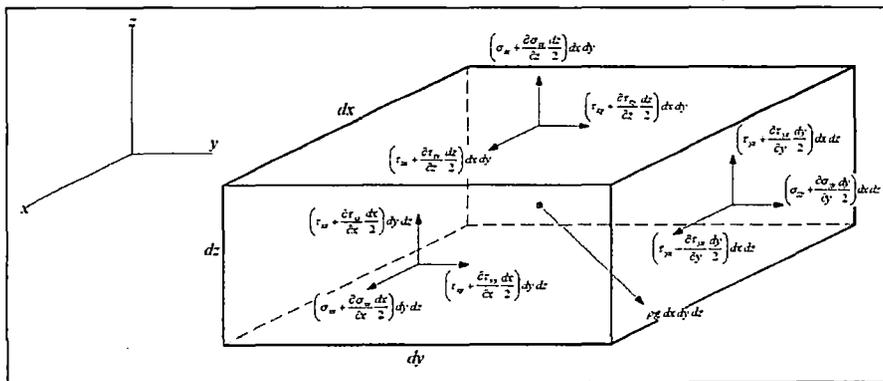


Figura 1.2. Fuerzas que actúan en una partícula infinitesimal.

Ref. Bib. [9]

Ecuaciones de Navier Stokes

Los fluidos newtonianos manifiestan una relación lineal entre las componentes del esfuerzo y los gradientes de velocidad. Tales incluyen fluidos tan comunes como el agua, aceite y aire, bajo condiciones controladas de experimentación. Si además de la linealidad, el fluido presenta propiedades isotrópicas, es posible relacionar las componentes de esfuerzo y los gradientes de velocidad utilizando dos propiedades del fluido: la viscosidad μ y el segundo coeficiente de la viscosidad λ .

En el Cuadro 1.1 se muestran las Leyes fundamentales para fluidos incompresibles, tales como Continuidad, Cantidad de Movimiento, Energía y Esfuerzo en los sistemas de coordenadas cartesianas, cilíndricas y esféricas.

1.1.2 El Número de Reynolds

Consideremos un flujo viscoso, y sea U el valor típico de la velocidad. Además, sea L una escala espacial característica del flujo y ν la viscosidad dinámica del fluido. El número de Reynolds se conoce a la relación siguiente:

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\text{término de inercia}}{\text{término viscoso}} = \frac{|(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}|}{|\nu \nabla^2 \mathbf{u}|} = \left(\frac{U^2/L}{\nu U/L^2} \right) \dots \text{(Ec. 1.2)}$$

Este número adimensional, utilizado en la mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido, está definido como la relación entre los términos inerciales y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos. Su estimación evidencia diferencias notables entre flujos con números de Reynolds con valores relativamente grandes y pequeños.

Las características que condicionan cada flujo, dependen de las propiedades del fluido y de las dimensiones del flujo. Conforme aumenta el flujo, aumentan las fuerzas inerciales, las cuales son contrarrestadas por la fricción o fuerzas viscosas dentro del fluido. Cuando estas fuerzas opuestas alcanzan un equilibrio, se producen cambios en las características del flujo.

Observando la Ec. 1.2, cuando las fuerzas viscosas tienen un efecto dominante en la pérdida de energía, el número de Reynolds es pequeño y el flujo se encuentra en un régimen laminar.

Cuadro 1.1 Leyes Fundamentales para Flujos Incompresibles

		SISTEMA DE COORDENADAS		
		CARTESIANAS	CILÍNDRICAS	ESFÉRICAS
CONTINUIDAD		$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$	$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v_r) + \frac{1}{r \text{sen} \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta \text{sen} \theta) + \frac{1}{r \text{sen} \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} = 0$
	CANTIDAD DE MOVIMIENTO	$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \nabla^2 u$ $\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu \nabla^2 v$ $\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu \nabla^2 w$ $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$ $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$	$\frac{Dv_r}{Dt} - \frac{v_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + g_r + \nu \left(\nabla^2 v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right)$ $\frac{Dv_\theta}{Dt} + \frac{v_r v_\theta}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + g_\theta + \nu \left(\nabla^2 v_\theta + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r^2 \text{sen}^2 \theta} - \frac{2 \cos \theta}{r^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right)$ $\frac{Dv_z}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu \nabla^2 v_z$ $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial}{\partial z}$ $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$	$\frac{Dv_r}{Dt} - \frac{v_\theta^2 + v_\phi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + g_r + \nu \left(\nabla^2 v_r - \frac{2v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{2v_\theta \cot \theta}{r^2} - \frac{2}{r^2 \text{sen} \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} \right)$ $\frac{Dv_\theta}{Dt} + \frac{v_r v_\theta}{r} - v_\phi^2 \cot \theta = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + g_\theta + \nu \left(\nabla^2 v_\theta + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r^2 \text{sen}^2 \theta} - \frac{2 \cos \theta}{r^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right)$ $\frac{Dv_\phi}{Dt} + \frac{v_\theta v_\phi}{r} + \frac{v_\theta v_\phi \cot \theta}{r} = -\frac{1}{\rho r \text{sen} \theta} \frac{\partial p}{\partial \phi} + g_\phi + \nu \left(\nabla^2 v_\phi - \frac{v_\phi}{r^2 \text{sen}^2 \theta} + \frac{2}{r^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + \frac{2 \cos \theta}{r^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \phi} \right)$ $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{v_\phi}{r \text{sen} \theta} \frac{\partial}{\partial \phi}$ $\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \text{sen} \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\text{sen} \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}$
		ENERGÍA	$\rho \frac{Dh}{Dt} = K \nabla^2 + 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]$	$\rho \frac{Dh}{Dt} = K \nabla^2 + 2\mu \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 \right]$
ESFUERZO	$\sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$ $\sigma_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}$ $\sigma_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}$ $\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$ $\tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$ $\tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)$	$\sigma_{rr} = -p + 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r}$ $\sigma_{\theta\theta} = -p + 2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right)$ $\sigma_{\phi\phi} = -p + 2\mu \left(\frac{1}{r \text{sen} \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{v_\theta}{r} + \frac{v_\theta \cot \theta}{r} \right)$ $\tau_{r\theta} = \mu \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right)$ $\tau_{\theta\phi} = \mu \left(\frac{\text{sen} \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{v_\phi}{\text{sen} \theta} \right) + \frac{1}{r \text{sen} \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \phi} \right)$ $\tau_{r\phi} = \mu \left(\frac{1}{r \text{sen} \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\phi}{r} \right) \right)$	$\sigma_{rr} = -p + 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r}$ $\sigma_{\theta\theta} = -p + 2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right)$ $\sigma_{\phi\phi} = -p + 2\mu \left(\frac{1}{r \text{sen} \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{v_\theta}{r} + \frac{v_\theta \cot \theta}{r} \right)$ $\tau_{r\theta} = \mu \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right)$ $\tau_{\theta\phi} = \mu \left(\frac{\text{sen} \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{v_\phi}{\text{sen} \theta} \right) + \frac{1}{r \text{sen} \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \phi} \right)$ $\tau_{r\phi} = \mu \left(\frac{1}{r \text{sen} \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\phi}{r} \right) \right)$	

Ref. Bib. [9]

Haciendo un símil, el fluido se mueve en capas o láminas, deslizándose suavemente una capa sobre otra adyacente con solo un intercambio molecular de cantidad de movimiento. Cualquiera que sea la tendencia hacia la inestabilidad y la turbulencia, se amortigua por fuerzas cortantes viscosas que resisten el movimiento relativo de las capas adyacentes.

En el flujo turbulento, las partículas se mueven en forma errática, con un intercambio de cantidad de movimiento transverso muy violento. La naturaleza del flujo laminar o turbulento y su posición relativa sobre una escala que indica la importancia relativa de las tendencias de turbulento a laminar, son indicadas por el Número de Reynolds

1.1.3 Clasificación de flujos

Consideremos un fluido viscoso, de tal manera que su campo de movimiento corresponda a fronteras rígidas previamente especificadas, y sujeto a una fuerza de cuerpo particular. Dependiendo de las magnitudes relativas de las fuerzas viscosas e inerciales, encontramos que el carácter del flujo y las distribuciones de la velocidad y la presión muestran, en detalle, grandes diferencias.

Este hecho conduce a dos conceptos fundamentales en la clasificación de los tipos de flujo, y en el tratamiento analítico de los mismos. Uno es la distinción entre flujos laminares y flujos turbulentos, como dos posibles modalidades del movimiento. El otro hace la distinción entre los flujos de cedencia y los flujos de capa límite, como dos extremos de los efectos de la viscosidad.

A. Flujos laminares y flujos turbulentos

La existencia de dos formas de movimiento fue observada desde un principio por investigadores experimentales. Por ejemplo, en 1839 Hagen alertó sobre el hecho de que la forma del flujo en un tubo cilíndrico cambia cuando la velocidad excede a un cierto límite. Observó que para velocidades inferiores a dicho límite, la superficie del chorro fluyente era lisa como la de una barra de vidrio sólida; por encima de ese límite, la superficie del chorro oscilaba y el flujo salía a borbotones, obteniendo las primeras evidencias respecto a los flujos laminar y turbulento.

En 1883 Osborne Reynolds demostró las dos modalidades de flujo y presentó el parámetro que ahora lleva su nombre, como un criterio para determinar el régimen bajo el cual ocurre un movimiento del fluido. Para determinar este parámetro, inyectó una fina corriente de tinta, en agua que fluía desde un gran tanque hacia dentro de un tubo de vidrio (cuba de Reynolds). La corriente de tinta se conservaba como una línea recta, si el gasto a través del tubo era pequeño; mostrando que el agua se movía en líneas de corriente paralelas, o láminas. Las velocidades de las láminas adyacentes no eran las mismas, pero no había una mezcla macroscópica entre ellas (Figura 1.3a). Este es el caso más simple de flujo laminar. Al incrementarse el gasto, por encima de un cierto valor crítico, la corriente de tinta de la demostración de Reynolds se rompía en vórtices irregulares y se mezclaba lateralmente a través de la sección transversal del tubo. Esta mezcla evidencia el flujo turbulento (Figura 1.3c).

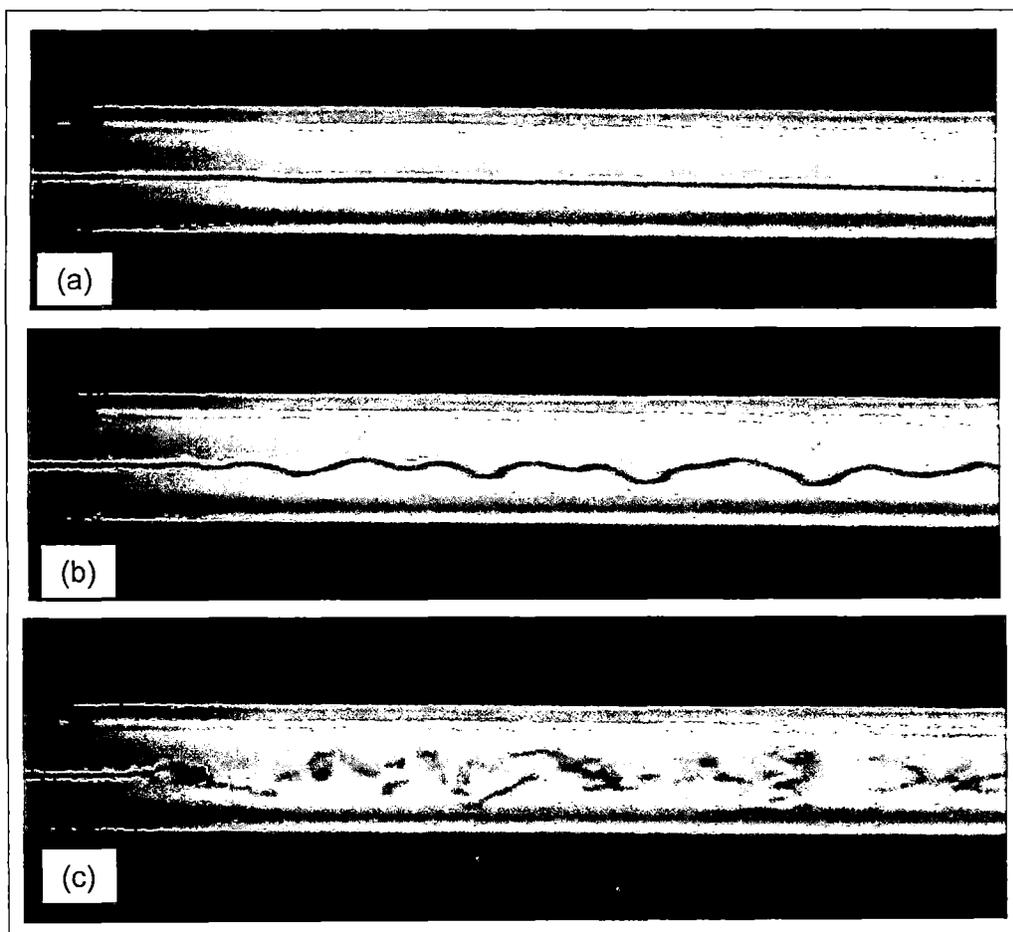


Figura 1. 3. (a). Flujo Laminar dentro del tubo de vidrio. (b). Flujo transicional dentro del tubo de vidrio. c). Flujo turbulento dentro del tubo de vidrio.

Ref. Bib. [5]

En general, el flujo laminar se presenta cuando las capas adyacentes de un fluido se mueven unas en relación a otras con un gradiente de velocidad, formando líneas de corriente, no necesariamente rectas, sin mezclarse macroscópicamente. Esta es la forma que se encuentra cuando los esfuerzos tangenciales viscosos, causados por el intercambio molecular de cantidad de movimiento entre las capas de fluido, son predominantes al establecerse el campo de flujo, sobre los esfuerzos de fricción que tratan de introducir rotación entre las partículas en movimiento.

Con un gradiente de velocidad bajo, la fuerza inercial es mayor que la fuerza de fricción, lo que produce en las partículas un desplazamiento pero no produce rotación, o produce una rotación con muy poca energía. El resultado es un movimiento con trayectorias definidas, denominado flujo laminar, lo que significa que las partículas se desplazan en forma de capas o láminas, ya sea si el flujo ocurre entre dos planos paralelos, capas cilíndricas coaxiales, etc.

El flujo turbulento se caracteriza porque las partículas del fluido tienen movimientos irregulares, al azar, que siguen trayectorias fluctuantes y erráticas. La mezcla macroscópica resultante, se produce tanto lateral como en la dirección del flujo. Este fenómeno se presenta cuando las fuerzas viscosas tangenciales son secundarias, respecto a las fuerzas inerciales, al establecerse el campo del flujo.

Cuando el gradiente de velocidad en el flujo aumenta, se incrementa la fricción entre las partículas vecinas del fluido, y estas adquieren una energía de rotación considerable, la viscosidad pierde su efecto y debido a la rotación, las partículas cambian constantemente de trayectoria. Al cambiar de trayectorias constantemente, las partículas chocan entre sí y cambian de rumbo en forma errática. Se concluye que el movimiento laminar existirá cuando el número de Reynolds esté por debajo de un cierto valor crítico. Por sobre este valor, el movimiento laminar se hace inestable y puede ocurrir turbulencia. El valor numérico del número de Reynolds crítico depende de la geometría del flujo, de la longitud característica y de la velocidad usada para definirlo.

Tanto los movimientos laminares como los turbulentos son resultado de una propiedad llamada viscosidad, y que ninguno de los dos se presenta en ausencia de ella. En consecuencia, mientras que la turbulencia da por resultado una

fuerza tangencial debida a un intercambio de cantidad de movimiento entre las partículas que fluctúan lateralmente, es además evidencia de los efectos de la viscosidad sobre el flujo.

B. Flujos de cedencia

Teóricamente, el movimiento laminar máximo se presenta cuando las fuerzas inerciales son despreciables y el número de Reynolds tiende a cero. Entonces, la relación entre los gradientes de presión, fuerza y velocidad del cuerpo está gobernada solo por la transmisión de fuerza tangencial desde las fronteras hacia dentro, a través del propio fluido. Tal situación se evidencia por ejemplo en el deslizamiento de objetos ligeros a través de una masa de melaza, o la filtración de un fluido a través de un lecho consistentemente denso de partículas sólidas finas.

La naturaleza de estos movimientos es tal que, por ser fuerzas viscosas tangenciales relativamente altas, ejercen una influencia mayor a través de todo el espacio del fluido. Así, en el caso de la esfera que cae (Figura 1.4), el fluido experimenta una “deformación” moderada, debido a la acción de la viscosidad, la cual se extiende desde la esfera y en todas direcciones hasta una distancia considerable. Esto se evidencia a través de las líneas de corriente y las distribuciones de velocidad. Los movimientos de cedencia de este tipo son denominados flujos de deformación.

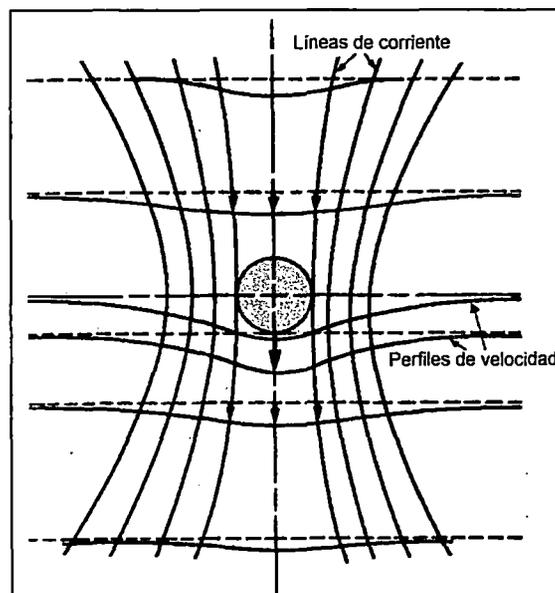


Figura 1. 4. Flujo de deformación alrededor de una esfera descendente

Ref. Bib. [5]

Las condiciones de análisis al despreciar la inercia, indican que el movimiento es tan lento que las aceleraciones convectivas no tienen un efecto inercial de importancia y que las variaciones con respecto al tiempo pueden despreciarse.

1.1.4 Flujo entre cilindros rotatorios

Un flujo continuo que se desarrolla entre cilindros rotatorios concéntricos (Figura 1.5), es otro flujo cuya solución se aplica por ejemplo en el campo de la lubricación, donde el cilindro interno es rotatorio.

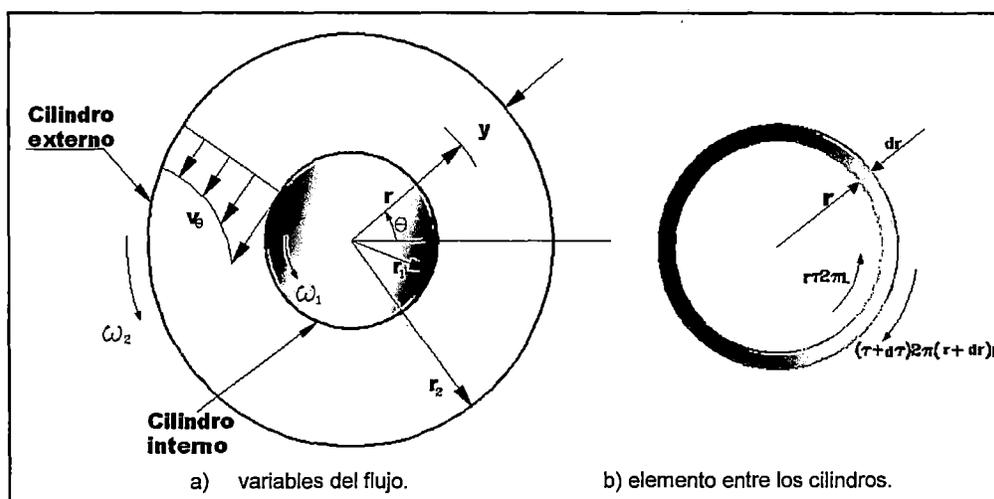


Figura 1.5. Flujo entre cilindros concéntricos

Ref. Bib. [9]

A. Análisis diferencial

En esta derivación se ignoran las fuerzas del cuerpo al suponer que los cilindros están en posición vertical. Como la presión no varía con el ángulo θ , se utiliza un elemento cuya forma es la de un delgado casco cilíndrico. El momento de torsión resultante que actúa en este elemento es cero, porque no tiene aceleración angular. Esto se expresa como:

$$\tau 2\pi r L \times r - (\tau + d\tau) 2\pi (r + dr) L \times (r + dr) = 0 \quad \dots \text{(Ec. 1.3)}$$

Dónde L es la longitud de los cilindros, que debe ser grande con respecto al ancho del hueco ($r_2 - r_1$) para evitar los efectos de extremo tridimensionales.

Ignorando los términos de mayor grado que tienden a cero conforme a $dr \rightarrow 0$, la ecuación anterior se reduce a:

$$2\tau + r \frac{d\tau}{dr} = 0 \quad \dots \text{(Ec. 1.4)}$$

Con la ecuación constitutiva unidimensional (ver Cuadro 1.1) y sabiendo que

$$\tau = \tau_{r\theta}, \text{ se obtiene:}$$

$$v_{\theta}(r) = \frac{A}{2}r + \frac{B}{r} \quad \dots \text{(Ec. 1.5)}$$

Dónde:

$$A = 2 \frac{\omega_2 r_2^2 - \omega_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad B = \frac{r_1^2 r_2^2 (\omega_2 - \omega_1)}{r_2^2 - r_1^2}$$

B. Flujo con el cilindro externo fijo

En el caso de que solo el cilindro interno gira y el cilindro externo permanece fijo, $\omega_2 = 0$ y la distribución de velocidades es:

$$v_{\theta} = \frac{\omega_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{r_2^2}{r} - r \right) \quad \dots \text{(Ec. 1.6)}$$

El esfuerzo cortante τ_1 en el cilindro interno (ver Cuadro 1.1 y hágase $\tau = -\tau_{r\theta}$) es:

$$\tau_1 = - \left[\mu r \frac{d}{dr} \left(\frac{v_{\theta}}{r} \right) \right]_{r=r_1} = \mu \frac{2}{r_1^2} \frac{r_1^2 r_2^2 \omega_1}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{2\mu r_2^2 \omega_1}{r_2^2 - r_1^2} \quad \dots \text{(Ec. 1.7)}$$

El momento de torsión T necesario para hacer girar el cilindro interno de longitud L es:

$$T = \tau_1 A_1 r_1 = \frac{2\mu r_2^2 \omega_1}{r_2^2 - r_1^2} 2\pi r_1 L r_1 = \frac{4\pi \mu r_1^2 r_2^2 L \omega_1}{r_2^2 - r_1^2} \quad \dots \text{(Ec. 1.8)}$$

La potencia W necesaria para hacer girar el cilindro interior se encuentra multiplicando el momento de torsión por la velocidad de rotación ω_1 ; la cual es:

$$W = T \omega_1 = \frac{4\pi \mu r_1^2 r_2^2 L \omega_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad \dots \text{(Ec. 1.9)}$$

1.2 REOLOGÍA

1.2.1 Principios básicos

“Nada es, todo fluye”, afirmó el filósofo griego Heráclito de Éfeso (siglo V a.C.), al referirse a que todo en la naturaleza está en constante fluencia, atribuyendo esta condición a la lucha de propiedades contrarias en el elemento. Si se pudiera observar prolongadamente las rocas “sólidas” al interior de la Tierra, el concreto y acero de una construcción o el vidrio de los vitrales de una catedral antigua, durante una escala de tiempo apropiada (un intervalo de tiempo suficientemente grande), se comprobaría que efectivamente “todo puede fluir”.

El fenómeno de fluencia se relaciona con la deformación. La deformación se define como el movimiento de una parte de un cuerpo con respecto a otras partes del mismo y que, como consecuencia, produce un cambio en su forma o tamaño. Bajo la acción de fuerzas externas, las partículas del cuerpo se desplazan de sus posiciones originales. En general, los cuerpos se deforman cuando sobre ellos actúa un esfuerzo, el cual representa la fuerza por unidad de área que se produce en un material debido a la acción de una fuerza interna o externa que actúa sobre el sistema. Si tales esfuerzos resultan de aplicar fuerzas perpendiculares por unidad de área del material se denominan esfuerzos normales y dependiendo del sentido de esta fuerza respecto a la superficie, pueden ser clasificados como de tracción o de compresión. (Figura 1.6).

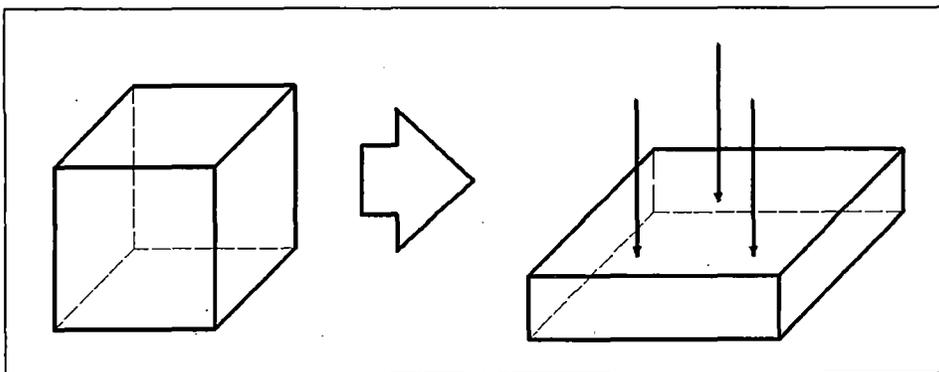


Figura 1. 6. Deformación producida por un esfuerzo normal de compresión.

Fuente: Elab. propia

Por otro lado están los esfuerzos de corte que resultan de aplicar fuerzas paralelas y contenidas en el plano de la unidad de área del material.

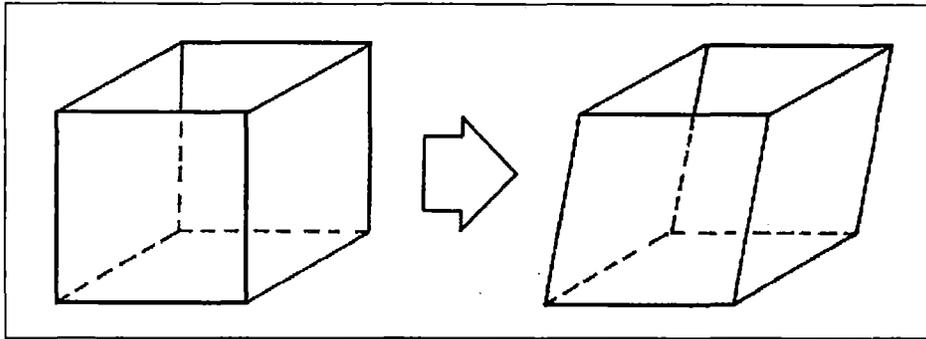


Figura 1. 7. Deformación producida por aplicación de un esfuerzo de corte.

Fuente: Elab. propia

Con la aplicación de un esfuerzo, dependiendo de la magnitud del mismo, algunos cuerpos sufren una deformación inicial, logrando recuperar su forma original al desaparecer tal esfuerzo (sólidos elásticos). A diferencia de estos sistemas, los fluidos se caracterizan por ser muy susceptibles a la acción de un esfuerzo; de hecho, la manera de reaccionar a un esfuerzo, es lo que define en forma precisa a un fluido: “un material incapaz de soportar la acción de un esfuerzo de corte” y por pequeño que este esfuerzo sea, el fluido experimenta una “deformación continua en el tiempo” o “flujo”. Sin embargo, los sólidos elásticos también pueden fluir si el esfuerzo aplicado alcanza el valor necesario para que se produzca una deformación permanente. A este valor del esfuerzo se denomina “esfuerzo de cedencia” del sólido, y marca la transición entre el comportamiento elástico y plástico de un sólido. (Schramm, 2000).

1.2.2 Antecedentes

Reología, término introducido por Eugen Bingham en 1929, proviene del vocablo griego “reos”, que significa fluir. Se refiere al comportamiento de un cuerpo frente a una fuerza aplicada, que no puede describirse con modelos lineales simples viscosos y/o elásticos. Los cuerpos en este contexto pueden ser sólidos, líquidos o gases.

En 1678 el científico inglés Robert Hooke estableció que para una gran variedad de materiales sólidos la deformación elástica producida (γ) es proporcional al esfuerzo aplicado (τ), desarrollando así la “teoría de la elasticidad”.

En 1687, Isaac Newton en su obra “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” estableció la primera relación constitutiva para un fluido viscoso (luego llamado

fluido newtoniano), al enunciar que para estos fluidos el esfuerzo de corte aplicado y la deformación producida son proporcionales, es decir, a mayor esfuerzo mayor deformación. A la constante de proporcionalidad se le define como la "viscosidad del fluido".

No fue sino hasta 1775 cuando el matemático suizo Leonard Euler propuso la primera relación constitutiva para un fluido, el llamado fluido perfecto o ideal. Este es un fluido cuya fricción interna o viscosidad es estrictamente nula y con la siguiente propiedad: "el esfuerzo que una parte del fluido ejerce sobre las partes adyacentes es normal; es decir, siempre es perpendicular a la superficie que separa ambas partes". Cualquier fluido real es viscoso en alguna medida y, sólo en forma aproximada, cuando su densidad es muy baja, algunos fluidos se comportan como un fluido ideal.

En 1867, J. C. Maxwell desarrolló un modelo matemático capaz de describir el comportamiento de fluidos que, a su vez, presentan ciertas propiedades elásticas, esto es, elementos asociados a la respuesta de un sólido. Estos dos modelos desarrollados constituyen el origen de la viscoelasticidad.

Se desarrollaron los primeros modelos de viscoelasticidad no lineal con los trabajos de Zaremba (1903), Jaumann (1905) y Poynting (1913). En 1922 el profesor Eugene Cook Bingham realizó estudios sobre flujos de un comportamiento elástico hasta cierto límite de esfuerzo, luego del cual el flujo sufría una variación en sus condiciones lineales de proporcionalidad entre esfuerzo y velocidad de deformación, dando lugar al término "esfuerzo de fluencia ó cedencia", que separa al flujo en dos condiciones de comportamiento: flujo elástico y flujo plástico.

En 1926 Herschel-Bulkley realizaron investigaciones en fluidos no newtonianos con una no linealidad compleja. Para caracterizar el comportamiento de estos fluidos, introdujeron parámetros de consistencia, índices de flujo (grado en el que el fluido se adelgaza o ensancha por esfuerzo cortante aplicado) y el esfuerzo cortante eficiente.

En función a todo lo anteriormente expuesto, los materiales reales pueden presentar un comportamiento puramente elástico (sólidos), un comportamiento puramente viscoso (líquidos), o una combinación de ambos, es decir, un

comportamiento viscoelástico. Desde una perspectiva general, cabe decir que, en realidad, todos los materiales son viscoelásticos, donde los cuerpos elásticos “puros” y los cuerpos viscosos “puros” no son sino los extremos de una vasta gama de posibilidades. (Ancy, 2005)

Esta combinación de propiedades intrínseca de la materia, nos conduce a la siguiente pregunta: ¿Una sustancia puede considerarse un sólido o un líquido? Una respuesta simple es que la definición de la sustancia depende de la magnitud del esfuerzo aplicado y de la duración del mismo. De esta forma, la clasificación del comportamiento reológico de un material se debe ampliar con la introducción de una escala de tiempo relacionada con el proceso de deformación, un factor denominado el **Número de Deborah**.

1.2.3 Definición de Reología

La reología es la parte de la física que estudia la deformación y el flujo de un cuerpo sometido a fuerzas externas. Describe la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación generada en cuerpos sensibles a la deformación o fluencia. En tal contexto, explica principalmente, el comportamiento de los materiales que no pueden describirse únicamente por modelos lineales de hidrodinámica (Newton), ni por leyes que gobiernan la elasticidad de los cuerpos (Hooke). Las características reológicas de los materiales presentan un comportamiento, cuyo rango incluye desde el perfectamente elástico, hasta el comportamiento puramente viscoso. Entre estos dos extremos se encuentra el comportamiento de los cuerpos o materiales reales, que incluye a los sólidos no elásticos, fluidos no-Newtonianos y sustancias viscoelásticas.

Su objetivo principal es encontrar las ecuaciones constitutivas que relacionen el esfuerzo, la deformación producida, el gradiente de velocidad o velocidad de corte y el tiempo, que permitan modelar el comportamiento del cuerpo. Dependiendo de cómo sea esta relación, los materiales presentan comportamientos reológicos diferentes. Por ejemplo, la miel es un material capaz de fluir a través del orificio de un embudo de vidrio, lo que no ocurre con la mayonesa. Sin embargo, la mayonesa es mucho más fácil de untar que la miel.

El caso básico, describe el comportamiento de un sólido ideal (newtoniano), sujeto a un esfuerzo de corte, el cual responde con una tensión a la deformación producida:

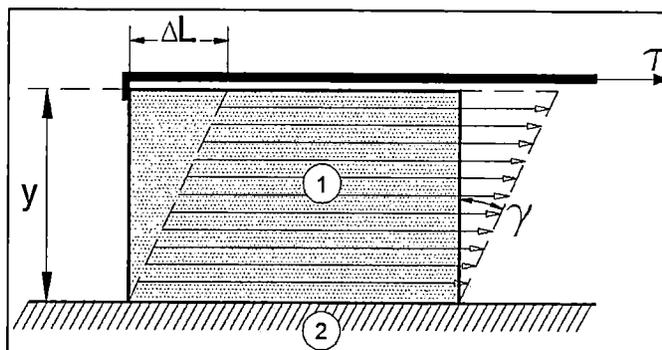


Figura 1. 8. Deformación de un cuerpo sólido

Ref. Bib. [15]

- ①: Cuerpo sólido en condición no deformada y deformada.
- ②: Placa base inmóvil.

De la Figura 1. 8:

$$\tau = G \cdot \frac{dL}{dy} = G \cdot \tan \gamma \approx G \cdot \gamma \quad \dots \text{ (Ec. 1.10)}$$

Dónde:

τ : Esfuerzo de corte [$N/m^2 = Pa$]

G : Modulo de Young relacionado con la rigidez del sólido [N/m^2]

γ : Tensión adimensional (dL/y)

y : Altura del cuerpo sólido [m]

ΔL : Deformación del cuerpo como resultado de un esfuerzo de corte [m]

El módulo de Young (G), en esta ecuación, es un factor de correlación que indica la rigidez asociada a la naturaleza físico-química del sólido. Define la resistencia del sólido a la deformación. Para un fluido (líquido), la resistencia a cualquier cambio posicional de sus elementos de volumen, que en este caso es irreversible, se denomina viscosidad. La instrumentación que mide las características visco elásticas de sólidos, semi-sólidos y líquidos se denomina "reómetro". La instrumentación que se limita en uso para la medida del comportamiento viscoso del flujo de líquidos se llama "viscosímetro".

1.2.4 Aspectos principales de la Reología

A. La ley básica

Para medir la viscosidad de un fluido, primero se requiere definir los parámetros implicados en el flujo. Para esto es necesario encontrar condiciones de prueba convenientes, que permitan medir tales características del flujo objeto de estudio. Newton fue el primero en expresar la ley básica para medir la viscosidad que describe el comportamiento del flujo de un fluido ideal:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \dots (\text{Ec. 1.11})$$

Dónde:

τ : Esfuerzo o tensión de corte [Pa]

μ : Viscosidad dinámica [Pa.s]

$\dot{\gamma}$: Razón o velocidad de corte [s^{-1}]

El modelo de placas paralelas (Figura 1.9), nos ayuda a definir la relación entre la tensión o esfuerzo de corte y la razón o velocidad de corte,

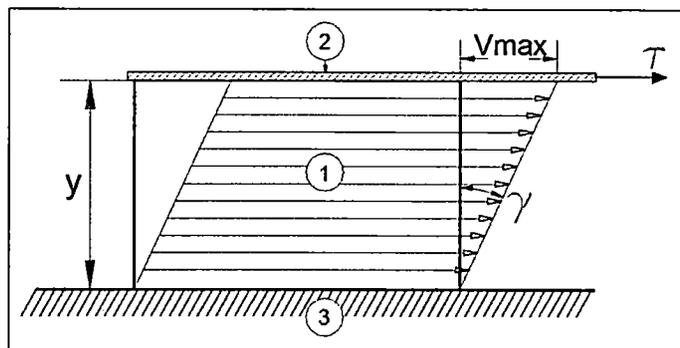


Figura 1.9. Flujo entre dos placas paralelas (modelo elemental)

Ref. Bib. [15]

Dónde:

- ① : fluido sometido al esfuerzo cortante.
- ② : Placa móvil con área de corte A en contacto con el líquido.
- ③ : Placa estacionaria.

B. Tensión de Corte (τ)

La tensión o esfuerzo de corte se define como la componente tangencial de una fuerza aplicada por unidad de área, necesaria para lograr una deformación. Una

fuerza F aplicada tangencialmente a un área A , definida como el área de contacto entre la placa móvil y el fluido, conduce a un flujo en la capa líquida (Figura 1.9). La velocidad del flujo que se logra para una fuerza dada, es controlada por la resistencia interna del fluido a fluir, es decir, por su viscosidad.

$$\tau = \frac{F \text{ (fuerza)}}{A \text{ (área)}} \left[\frac{N(\text{newton})}{m^2} = Pa \right] \quad \dots \text{ (Ec. 1.12)}$$

C. Velocidad de Corte ($\dot{\gamma}$)

La velocidad o razón de corte, se define como el cambio de la velocidad, a través de la distancia y (Figura 1.9). Esta velocidad o razón de corte se define matemáticamente por un diferencial.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad \left[\frac{m/s}{m} = s^{-1} \right] \quad \dots \text{ (Ec. 1.13)}$$

La velocidad de corte se incrementa a medida que la velocidad de la placa superior aumenta y la distancia entre las dos placas se hace más pequeña. La tensión de corte τ hace fluir al fluido en un patrón especial. El valor de V_{\max} es la velocidad máxima que puede generar la fuerza aplicada, se encuentra en el límite superior (Figura 1.9). La velocidad decae a través del espacio y entre placas hasta $V_{\min} = 0$ en el límite más bajo en contacto con la placa inmóvil.

El flujo laminar representado por delgadas e infinitesimales capas de fluido que resbalan unas sobre otras (Figura 1.9), emulando a tarjetas puestas una sobre otra; entonces una de las capas laminares se desplaza con respecto a la adyacente, en una fracción del diferencial total de velocidad que se produce entre las dos placas.

Teóricamente, la velocidad o razón de corte ($\dot{\gamma}$), representa la derivada respecto del tiempo de la tensión causada por el esfuerzo de corte que actúa en una lámina del fluido (Figura 1.9).

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dL/dy}{dt} = \frac{dL/dt}{dy} = \frac{dv}{dy} \quad \dots \text{ (Ec. 1.14)}$$

Comparando las Ec. 1.10 y Ec. 1.11, se puede apreciar la diferencia básica entre sólidos y líquidos: el esfuerzo de corte genera una tensión en los sólidos, pero en líquidos genera un índice o relación proporcional de la tensión. Esto significa que los sólidos elásticos son deformados mientras que los líquidos fluyen. Los parámetros G y η responden a un propósito similar, el de introducir un factor de resistencia asociado a la naturaleza del cuerpo tensionado.

D. Viscosidad Dinámica o Absoluta

La viscosidad dinámica, es la propiedad del fluido que mide su resistencia interna a fluir. Está representada por el cociente de la tensión de corte (τ) y la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) de un fluido. La unidad de medida es el Pascal por segundo equivalente al centipoise ($1\text{Pa}\cdot\text{s} = 1\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = 10^3\text{cP}$; $1\text{cP} = \text{mPa}\cdot\text{s}$).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} = \text{Pa}\cdot\text{s} \right] \quad \dots (\text{Ec. 1.15})$$

Cuadro 1. 2 Algunos valores de viscosidad dinámica a 20°C

Material	Viscosidad μ (cP)
Petróleo	0.65
Aqua	1.0
Mercurio	1.5
Sanare (a 37°C)	4-25
Miel	10^4
Polímero fundido	$10^3 - 10^6$
Materiales bituminosos	10^8

Ref. Bib. [4]

E. Viscosidad Cinemática

Representa la característica propia del fluido sin considerar las fuerzas que genera su movimiento. Obtenido del cociente entre la viscosidad dinámica (μ) y la densidad (ρ) del fluido en cuestión, datos recopilados a la misma temperatura. Su unidad de medida es el stoke ($1\text{cSt} = \text{mm}^2/\text{s}$)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right] \quad \dots (\text{Ec. 1.16})$$

F. Curva de Fluidéz y Curva de Viscosidad

La correlación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, que definen el comportamiento del flujo de un fluido, se puede mostrar en la gráfica τ vs $\dot{\gamma}$ denominada “curva de fluidéz”.

El tipo más simple de una curva de fluidéz, es la curva de un flujo newtoniano, donde la tangente del ángulo formado es la viscosidad dinámica:

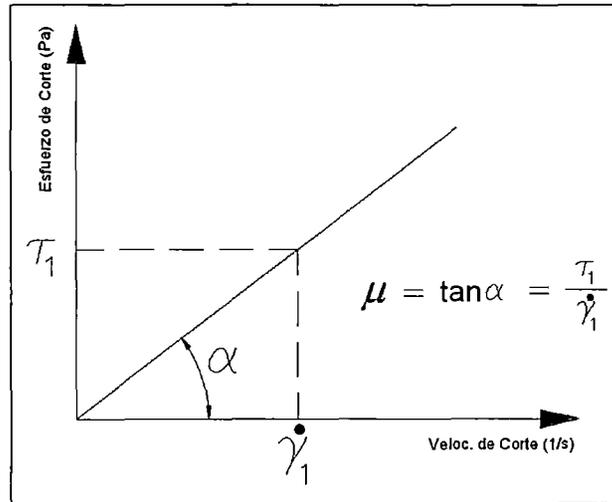


Figura 1.10. Curva de fluidéz de un fluido newtoniano
Ref. Bib. [15]

Otro gráfico es el de la curva μ vs $\dot{\gamma}$, que relaciona la viscosidad y las velocidades de corte del fluido, este diagrama se llama la “curva de viscosidad”:

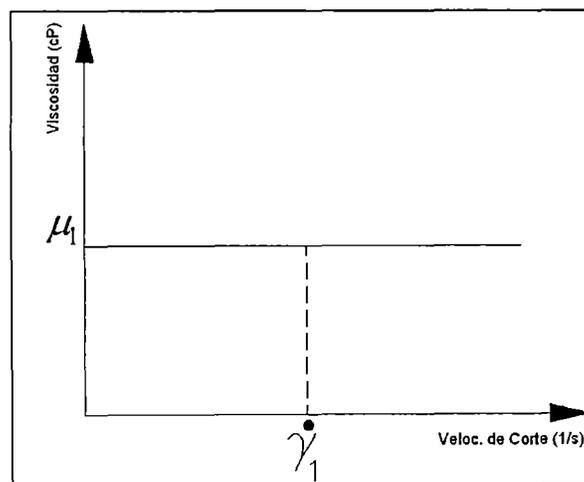


Figura 1.11. Curva de viscosidad de un fluido newtoniano
Ref. Bib. [15]

G. Parámetros de Viscosidad

La viscosidad, como propiedad física del fluido para resistir el corte o flujo inducido, depende de seis parámetros independientes:

$$\mu = f(S, T, p, \dot{\gamma}, t, E) \dots \text{(Ec. 1.17)}$$

“*S*”: Parámetro que representa la naturaleza físico-química de un cuerpo e influencia en su viscosidad, es decir, por ejemplo, si el fluido es agua, aceite, miel, etc.

“*T*”: Parámetro relacionado con la temperatura del fluido. La experiencia demuestra que la viscosidad es afectada en gran medida por los cambios de temperatura.

“*p*”: Parámetro relacionado con la presión. La presión comprime los fluidos y aumenta su resistencia intermolecular. Los aumentos de presión tienden a aumentar la viscosidad del fluido. En general, para cambios de viscosidad, este parámetro no afecta en la medida que afectan los anteriores mencionados.

“ $\dot{\gamma}$ ”: Parámetro decisivo que influencia en la viscosidad de muchos fluidos. Una velocidad de corte que va en aumento, pueden aumentar o disminuir la viscosidad del fluido, dependiendo de las características físico-químicas del mismo.

“*t*”: Parámetro tiempo, es importante para analizar los fenómenos que se presentan al medir la viscosidad de algunas sustancias, generalmente dispersiones donde la viscosidad depende históricamente de la aplicación del esfuerzo de corte, es decir, depende del espacio de tiempo que la sustancia fue sometida a un esfuerzo de corte continuo, o el tiempo que estuvo en reposo antes de ser sometida a esfuerzos cortantes en una prueba subsiguiente.

“*E*”: Parámetro Campo Eléctrico, es importante para una familia de fluidos, en el que su viscosidad depende, en gran medida, de los campos eléctricos que actúan sobre ellos. Estas suspensiones llamadas “fluidos electro-viscosos” (EVF) o los “fluidos electro-reológicos” (ERF), contienen partículas dieléctricas dispersas tales como aluminio o silicatos que, en fluidos electroconductores como el agua, se pueden polarizar en un campo eléctrico.

H. Esfuerzo de Cedencia

Se ha dicho que si se espera el tiempo suficiente, incluso hasta el vidrio o las montañas pueden fluir. De hecho el vidrio sólido es considerado como un flujo newtoniano de una extremadamente alta viscosidad y que para su fluencia, la velocidad de corte se estima en un valor menor que 10^{-10} s^{-1} , siendo esta escala temporal de relajación, la que convierte al vidrio en un sólido quebradizo. Para fluidos menos extremos, se analiza un parámetro denominado esfuerzo de cedencia, cuyo entendimiento práctico puede utilizarse en aplicaciones técnicas donde el tiempo característico va de segundos hasta horas o días.

La idea de un límite elástico o punto de cedencia, se explica con la existencia de un esfuerzo por debajo del cual la muestra tiende a comportarse como un sólido, donde el esfuerzo deforma elásticamente a la muestra y esta deformación desaparece cuando el esfuerzo cesa. La aplicación de un esfuerzo mayor al esfuerzo de cedencia, provoca que la muestra realmente comience a fluir, produciendo una deformación ilimitada que relaciona los esfuerzos con una velocidad de deformación y correspondiente relación de viscosidad dinámica.

I. Número de Deborah (De)

El número de Deborah es un número adimensional utilizado en reología para caracterizar cuan fluido es un material dependiendo del tiempo de observación y de su relación con el tiempo característico para su relajación. Denominado así por el profesor Markus Rainer (1945), en alusión al cantico de la profetisa Débora: "Las montañas fluyeron delante del rostro de Jehová" (Jueces 5:5). Se define como el cociente entre el tiempo de relajación que caracteriza la fluidez intrínseca de un material, y la escala temporal característica de un experimento (tiempo de observación).

$$De = \frac{t}{T} \quad \dots \text{ (Ec. 1.18)}$$

Dónde:

t : Tiempo característico del material (tiempo de relajación)

T : Tiempo característico de experimentación (tiempo de observación)

Bajo este concepto, la diferencia entre sólidos y líquidos está definida por la magnitud del número De . Si el tiempo de relajación del material es corto ($t \rightarrow 0$),

o el tiempo de observación es largo ($T \rightarrow \infty$) se podrá ver al material fluir. Por otro lado, si el tiempo de relajación es largo ($t \rightarrow \infty$) o, el tiempo de observación del material es pequeño ($T \rightarrow 0$), para todo efecto práctico, el material es considerado un sólido

Un ejemplo del número de Deborah, son los famosos vitrales de la catedral de Chartres, en Francia, fabricados hace unos 600 años. En el momento de su fabricación, en época medieval, los paneles de vidrio presentaban un espesor uniforme de arriba abajo, pero hoy en día las moléculas de vidrio han fluido por efecto de la gravedad de manera que el espesor en la parte superior del vitral es fino, mientras que la parte inferior tiene el doble de espesor. Se puede constatar que el vidrio sólido, pese a tener un tiempo característico largo (número de Deborah pequeño), si se emplea una escala de tiempo adecuada, puede considerarse como un fluido. (Schramm, 2000)

Siguiendo la argumentación del número de Deborah, Barnes y Walters (1985) revolucionaron la reología con el trabajo "¿El mito del punto de flujo?", en el que, de acuerdo a la escala de tiempo introducida por Reiner, negaban la existencia de un esfuerzo crítico o punto de flujo. Desde una perspectiva teórica se puede no asumir la existencia del punto de fluencia. Sin embargo, desde el punto de vista de ingeniería de procesos, donde el tiempo es un factor limitante, dicho punto sigue siendo una estratagema útil para caracterizar la respuesta al flujo de una sustancia. (Schramm, 2000)

1.2.5 Clasificación de Fluidos por Comportamiento Reológico

A. Fluidos Newtonianos

Un fluido newtoniano es un fluido puramente viscoso, donde el esfuerzo de corte aplicado guarda proporcionalidad directa con el gradiente de velocidad de corte. Particularmente el gráfico "curva de fluidez" de un fluido newtoniano está representado por una línea recta formada por la sucesión de puntos coordenados $(\dot{\gamma}, \tau)$ cuyo origen coincide con el origen de coordenadas (Figura 1.10). La tangente del ángulo formado por la línea recta y la abscisa, representa la viscosidad dinámica del fluido (μ). Esto significa que para este tipo de fluido, la viscosidad no es afectada por los cambios en la velocidad de corte.

El fluido newtoniano no posee propiedades elásticas, es incompresible, isotrópico, carente de estructura y, como el sólido de Hooke, no existe en la realidad. Sin embargo, algunos fluidos usados comúnmente, bajo condiciones controladas de presión y temperatura, tienden a comportarse como fluidos newtonianos en un amplio rango de variación en la velocidad y esfuerzo de corte. Por ejemplo el aire, el agua o el petróleo (Figura 1.12).

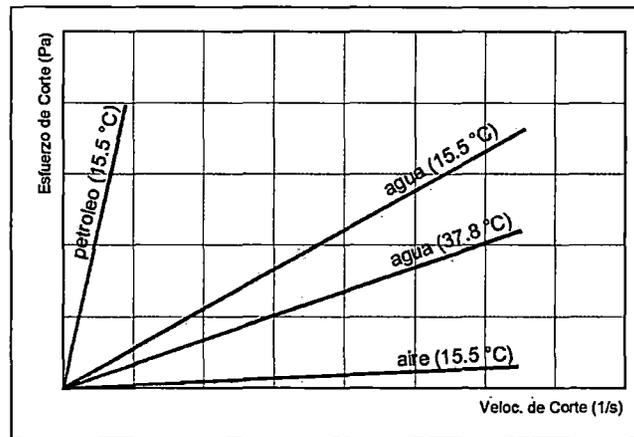


Figura 1.12. Comportamiento newtoniano de algunos fluidos
 Ref. Bib. [13]

En este tipo de fluidos, la viscosidad sólo depende de la temperatura, presión, y composición del fluido, siendo independientes del tiempo de experimentación, la velocidad de deformación y la historia previa del fluido.

B. Fluidos no Newtonianos

Un fluido no newtoniano, es aquél cuya viscosidad varía con el cambio en el esfuerzo de corte aplicado. Como resultado, este tipo de fluidos no tiene un valor de viscosidad definido y constante y no presentan una relación lineal entre el esfuerzo y la velocidad de corte aplicado (Figura 1.13), y tienen un comportamiento que se define con una función característica para cada tipo de fluido:

$$\dot{\gamma} = f(\tau, t) \quad \dots \text{(Ec. 1.19)}$$

Del propio concepto de fluido no newtoniano se deduce que no puede utilizarse el término “viscosidad”, tal y como ha sido definido por la ley de Newton. Esto debido a que la viscosidad, dadas las condiciones de temperatura, presión y composición invariantes, no permanece constante en función del esfuerzo

aplicado o del gradiente de velocidades al que se encuentra sometido el fluido, sino que varía según estos y por lo tanto la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación deja de ser lineal, es decir:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \neq cte \quad \dots \text{ (Ec. 1.20)}$$

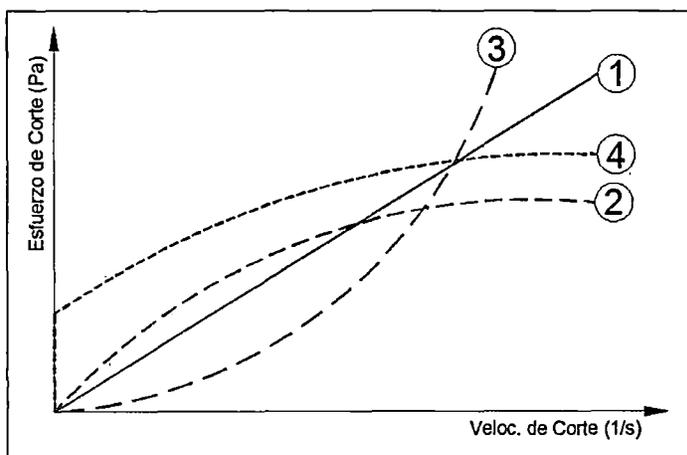


Figura 1.13. Curvas flujo de fluidos no newtonianos

Ref. Bib. [15]

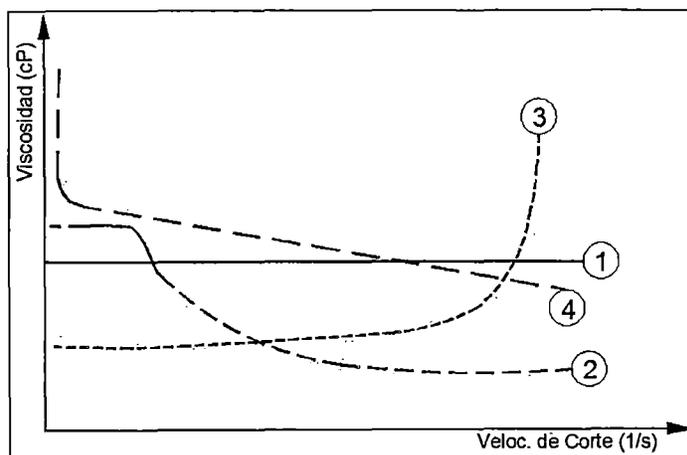


Figura 1.14. Curvas de viscosidad de fluidos no newtonianos

Ref. Bib. [15]

Dónde:

- ①: fluido newtoniano.
- ②: Fluido Pseudoplástico.
- ③: Fluido Dilatante.
- ④: Fluido Pseudoplástico con punto de cedencia = fluido plástico.

Estos fluidos se caracterizan porque su viscosidad no solo varía si la temperatura y composición varían, sino que depende también del esfuerzo cortante o gradiente de velocidad y, a veces, del tiempo de aplicación del esfuerzo y de la historia previa del fluido. Ello se debe a que la constitución física del fluido puede variar al someterse a los efectos de rozamiento en el tiempo.

Dado que para este tipo de fluidos, la viscosidad dinámica (μ) no permanece constante con la variación en el esfuerzo o velocidad de corte, se define esta como la tangente del ángulo formado por la recta tangente a la curva generada en cada punto con respecto al eje de abscisas del gráfico "curva de fluidez" (Figura 1.15).

También, se define el concepto de viscosidad aparente (μ_{ap}), como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte, en cada punto de la curva generada, asociado a la tangente del ángulo formado por la línea recta que parte del origen de coordenadas al punto de interés, y el eje de abscisas.

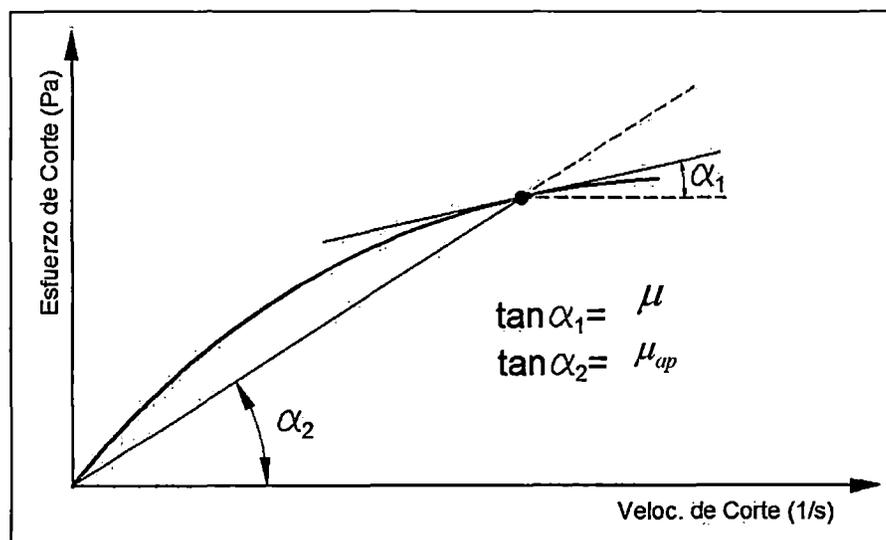


Figura 1.15. Viscosidad dinámica y aparente de fluidos no newtonianos
Ref. Bib. [13]

Las desviaciones que los fluidos no newtonianos presentan con respecto a los fluidos newtonianos son de naturaleza muy diversa, pudiendo clasificarse, según su comportamiento reológico, en tres grupos fundamentales:

Cuadro 1. 3 Flujos no newtonianos según comportamiento reológico

GRUPO	DENOMINACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Fluidos independientes del tiempo	Seudoplásticos	La viscosidad aparente disminuye con el aumento del esfuerzo cortante
	Dilatantes	La viscosidad aparente aumenta con el esfuerzo cortante.
	Plásticos	Presentan un límite $\tau = \tau_y$, llamado esfuerzo de cedencia, por debajo del cual no se presenta flujo.
Fluidos viscoelásticos	Viscoelásticos	Presentan características elásticas y viscosas simultáneamente.
Fluidos dependientes del tiempo	Tixotrópicos	La viscosidad aparente disminuye con el tiempo de aplicación de esfuerzo.
	Reopéticos	La viscosidad aparente aumenta con el tiempo de aplicación de esfuerzo.

Ref. Bib. [8]

El comportamiento reológico de cada uno de estos grupos de fluidos no newtonianos puede describirse según distintas ecuaciones que relacionan el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación.

B.1 COMPORTAMIENTO SEUDO-PLÁSTICO DEL FLUJO

Se denominan fluidos seudo-plásticos, a fluidos generalmente de elevada viscosidad inicial (curva ② en la Figura 1.13 y Figura 1.14), en los que, su viscosidad disminuye drásticamente al aumentar la velocidad de corte. Técnicamente, esto significa que para una fuerza aplicada o una presión ejercida sobre la masa del fluido, para una velocidad de corte dada, este reduce su energía interna. Los fluidos que llegan a ser menos viscosos con los aumentos de velocidad de corte se denominan “seudo-plásticos”.

Este comportamiento se debe a que un fluido, de apariencia homogénea a simple vista, se compone de varios ingredientes tales como partículas líquidas de formas irregulares y dispersas en el fluido. Estas partículas, mantienen un orden interno irregular caracterizando una alta resistencia interna al flujo, es decir, presentan una gran viscosidad. Con el aumento de la velocidad de corte, las partículas suspendidas en el fluido son forzadas a fluir longitudinalmente en la dirección del flujo, orientándose en forma paralela a la fuerza impulsora. Esta nueva orientación hace que las partículas se deslicen con mayor facilidad.

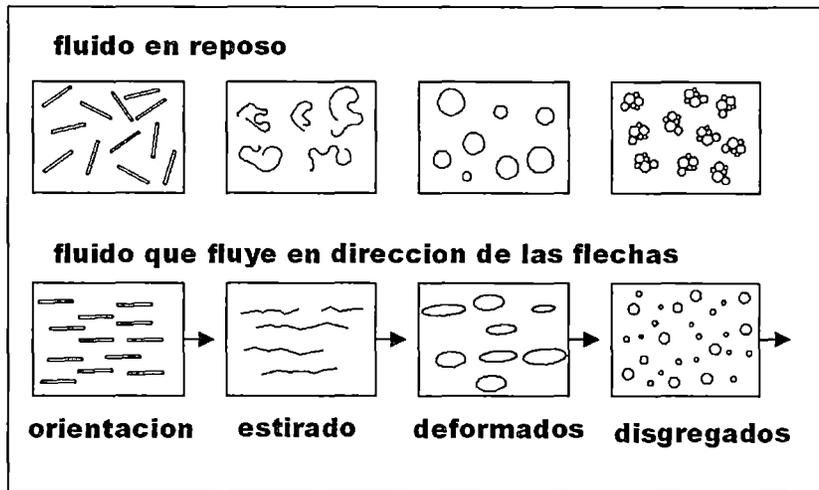


Figura 1.16. Comportamiento del fluido con dispersiones en reposo y en flujo

Ref. Bib. [15]

Según se observa (Figura 1.16), las partículas suspendidas, según sea el caso, se reorientan, estiran, deforman y disgregan. Para la mayoría de fluidos pseudo-plásticos, el efecto originado por la variación en la velocidad de corte, es de carácter reversible. Es decir, los fluidos recuperan su viscosidad original cuando se reduce o cuando se finaliza la velocidad de corte y las partículas vuelven a su estado natural de desorientación. El comportamiento pseudo-plástico del flujo, en un rango de bajas velocidades de corte, es gobernado por el movimiento browniano de las partículas, a pesar de los efectos iniciales de reorientación causado por la velocidad de corte. En este rango, su comportamiento es parecido al de un flujo newtoniano. En cambio, cuando los efectos de velocidad de corte aumentan hasta sobrepasar el efecto del movimiento browniano, la viscosidad disminuye drásticamente, acercándose asintóticamente a un nivel constante, donde el grado óptimo de orientación es alcanzado.

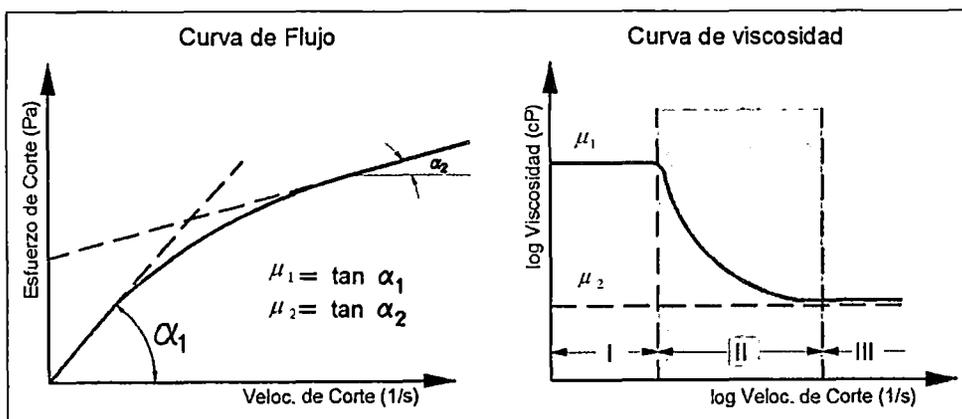


Figura 1.17. Dependencia de la velocidad de corte en fluidos pseudo-plásticos

Ref. Bib. [15]

- I: Primer rango Newtoniano. La viscosidad μ_1 no depende aun de la velocidad o razón de corte.
- II: En este rango, la viscosidad cae como resultado de la orientación de las partículas.
- III: Segundo rango newtoniano \rightarrow la viscosidad μ_2 permanece constante, independientemente de aumentos posteriores de la razón o velocidad de corte

B.2 COMPORTAMIENTO DILATANTE DEL FLUJO

Los fluidos dilatantes (curvas ③ en la Figura 1.13 y Figura 1.14) presentan un comportamiento tal, que para un aumento en la velocidad de corte del flujo, el valor de la viscosidad sigue el mismo comportamiento de incremento. Es decir, para este tipo de fluidos, la viscosidad presentará un aumento proporcional, siempre que la velocidad de corte aumente.

La dilatación del flujo se explica entendiendo que, cuando la velocidad de corte es baja, las partículas sólidas integrantes del fluido, de formas y tamaños variados, están muy juntas y envueltas por la fracción líquida que está ocupando los espacios entre ellas y lubricando el movimiento, por lo que la viscosidad aparente es baja. Con el incremento de la velocidad de corte, las partículas largas y flexibles se estiran rompiendo el envolvente fluido incrementando la proporción espacios vacíos entre partículas sólidas, no habiendo suficiente componente líquido para lubricar el roce entre todas las partículas, aumentando por ello la viscosidad aparente. El aumento de volumen se genera por el acuñamiento de partículas sólidas

La dilatación es evidencia de una reorganización estructural de la muestra, dando como resultado un aumento en la resistencia al aplicar una fuerza. Estos fluidos no son tan abundantes como los fluidos seudo-plásticos. Como ejemplos podemos citar a las arenas movedizas, soluciones de almidón espesas, arena de playa mojada, polvos finos en suspensión, fécula de maíz, dióxido de titanio, etc.

B.3 COMPORTAMIENTO PLASTICO DEL FLUJO

Los fluidos plásticos (curvas ④ en la Figura 1.13 y Figura 1.14), son fluidos que describen una curva similar al de los fluidos seudo-plásticos, pero luego de haber alcanzado un valor determinado del esfuerzo de corte, es decir, no fluyen hasta

que son sometidos a un esfuerzo cortante límite, llamado “esfuerzo de cedencia”, en el umbral de fluencia o límite de fluencia. Una vez que se supera el valor de límite de fluencia, la velocidad de corte guarda proporcionalidad con el esfuerzo de corte. Los flujos plásticos se encuentran en un rango que permite clasificarlos como sólidos y cómo líquidos.

Este comportamiento se debe a que algunos fluidos en reposo, se ordenan en una red intermolecular/interparticular de fuerzas obligatorias (fuerzas polares, fuerzas de van der Waals, etc.). Estas fuerzas restringen el cambio posicional de los elementos del volumen y dan a la sustancia un carácter sólido con una gran viscosidad (viscosidad infinita). Cuando una fuerza externa actúa sobre el fluido, y esta es menor que las fuerzas que forman la red intermolecular, solo se lograra deformar el fluido en el rango sólido elástico. Solo cuando las fuerzas externas sean lo suficientemente fuertes para superar las fuerzas de la red intermolecular, esfuerzo de corte superará el umbral llamado “punto de cedencia” y se producirá el rompimiento de la red intermolecular. En este punto, todos los elementos del volumen cambian de posición y forma irreversiblemente, es decir, el sólido se convierte en un flujo.

Algunos fluidos que demuestran este comportamiento, son por ejemplo lodos de perforación petrolera, lápiz labial, cremas dentales, polímeros de caucho natural, mantequilla, mostaza, mayonesa, pintura, asfaltos, suspensiones acuosas de cenizas de carbón, sedimentos de aguas residuales, etc.

1.2.6 Flujos Hiperconcentrados

Para los flujos hiperconcentrados, no existe un criterio común que permita tener una única definición, pues cada investigador adopta un concepto propio basado en su experimentación y experiencia. Aunque no hay uniformidad en la definición, se ha observado que para identificar estos flujos, la mayoría de los investigadores los clasifican basándose en el tipo de material, el mecanismo del movimiento (asociado al esfuerzo de corte, velocidad de corte y viscosidad) y la concentración (volumétrica o en peso) de partículas sólidas en suspensión.

De acuerdo a la clasificación de flujos de agua y sedimento, principalmente en la banda del flujo de sedimentos por gravedad (mezcla de agua y sedimentos que fluye en altas concentraciones) se clasifica a los flujos basados en el enfoque de

Pierson y Costa (1987), así como la clasificación obtenida por Varnes (1958) (Figura 1.18).

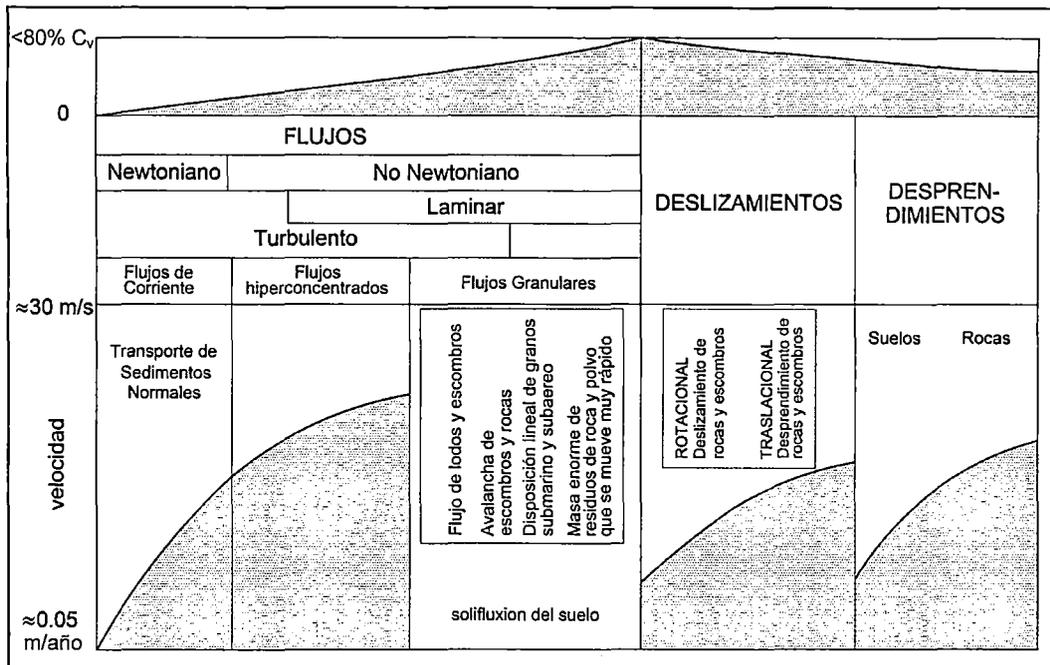


Figura 1.18. Clasificación general del transporte de sedimentos por gravedad (Varnes, 1958; Pierson y Costa, 1987)

Ref. Bib. [5]

Según esta clasificación, los flujos de agua y sedimento se pueden agrupar en tres principales:

- Flujo de corriente ordinario (avenidas de agua)
- Flujos hiperconcentrados
- Flujos granulares

Del resultado de los estudios del flujo de corrientes concentradas, Beverage y Culbertson (1964) definieron la hiperconcentración a concentraciones de sedimentos en peso mayores al 40%, sugiriendo un límite superior de 80%.Técnicamente, una mayor concentración a la indicada implica una resistencia a la fluencia. Flujos como inundaciones o deslave de lodos no cohesivos (Kurdin, 1973) califican dentro de esta definición.

Costa (1988) clasificó a estos tipos de flujo desde el punto de vista reológico, tomando en cuenta la concentración de partículas sólidas en suspensión. Las fuerzas internas del flujo, granulometría y el comportamiento laminar o turbulento también llegan a ser tomados en cuenta para caracterizar los diferentes tipos de flujo. En el Cuadro1.4, se identifica a estos tipos de flujo.

Cuadro 1. 4 Clasificación según Costa (1988)

Flujo	Concentración de partículas sólidas en:		Densidad de sólidos (g/cm ³)	τ_y (dina cm ²)	Tipo de fluido
	Peso (%)	Vol(%)			
Avenida de agua	1-40	0.4-20	1.01 - 1.33	0 - 100	Newtoniano
Flujo hiperconcentrado	40-70	20-47	1.33 - 1.80	100 - 400	No Newtoniano
Flujo de escombros	70-90	47-77	1.80 - 2.30	> 400	Viscoplástico

Flujo	Mayor mecanismo de soporte de los sedimentos	Viscosidad (poise)	Perfil de concentración de sedimentos	Tipo de flujo predominante
Avenida de agua	Fuerza electrostática, turbulencia	0.01 - 20	No uniforme	Turbulento
Flujo hiperconcentrado	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

Ref. Bib. [5]

El investigador francés Coussot (1997) clasifica los flujos utilizando como parámetros la concentración en volumen y la granulometría del material sólido (Figura 1.19). El flujo torrencial, flujo hiperconcentrado, así como también los deslizamientos de suelos se complementan dentro de ésta clasificación de flujos.

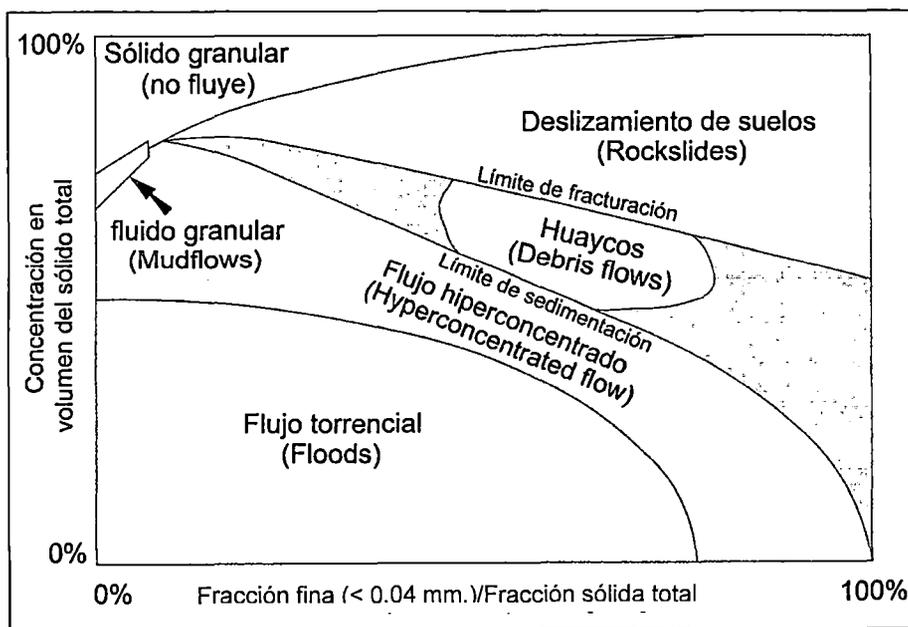


Figura 1.19. Clasificación de flujos según Coussot (1997)

Ref. Bib. [5]

Desde una consideración hidráulica, en condiciones normales para flujos cargados de sedimentos, estos son transportados por la corriente, teniendo poca influencia en el comportamiento de la misma. En otra condición, una mayor presencia de sedimentos influye notablemente en la mezcla, alterando las propiedades del fluido y el comportamiento del flujo en sí. A estos flujos se les denomina flujos hiperconcentrados (Wan, Wang, 1994).

En el marco de los flujos hiperconcentrados, los flujos densos pueden clasificarse en tres tipos: inundaciones o crecidas de barro (mud floods), flujos de barro (mudflows) y flujos de detritos (debris flows) (O'Brien y Julien, 1985; Julien, 2000). Estos se diferencian entre sí por los procesos físicos involucrados en cada uno de ellos, que son función de la reología de la mezcla agua-sedimento.

El volumen y las propiedades de la matriz del fluido (mezcla agua-sedimento) gobiernan la hidráulica del flujo, su desplazamiento y la deposición de los sedimentos. Las propiedades dependen de la concentración de sedimentos, de la distribución granulométrica y del tipo de sedimento involucrado.

Las inundaciones o crecidas de barro son típicamente hiperconcentraciones de partículas no cohesivas, que presentan un comportamiento muy fluido para un rango de concentraciones en volumen (C_v) de hasta un 40 %.

Los flujos de barro, por su parte, se caracterizan por una concentración de limos y arcillas, lo suficientemente alta como para cambiar las propiedades de la matriz del fluido, favoreciendo el transporte de grandes tamaños de material. De este modo, los flujos de barro se comportan como una masa fluida muy viscosa, que a altas concentraciones es capaz de transportar en superficie piedras de gran tamaño. La C_v de la matriz del fluido en flujos de barro está en un rango entre el 45 y el 55 %. Los flujos de barro presentan altas viscosidades y esfuerzos de cedencia, pudiendo viajar grandes distancias en pendientes moderadas a bajas velocidades, para depositarse en forma lobular en los abanicos aluviales.

Los flujos de detritos se componen de una mezcla de materiales clásticos, incluyendo grandes piedras, troncos, etc., donde la colisión lubricada entre las partículas es el mecanismo dominante de disipación de energía. (Takahashi, 1978).

1.2.7 Modelamiento Reológico

El comportamiento reológico, en estado estacionario, de la mayor parte de los fluidos no newtonianos (Figura 1.20), puede establecerse mediante la siguiente forma generalizada:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad \dots \text{(Ec. 1.21)}$$

Donde μ puede expresarse en función de dv_x/dy o τ_{yx} indistintamente.

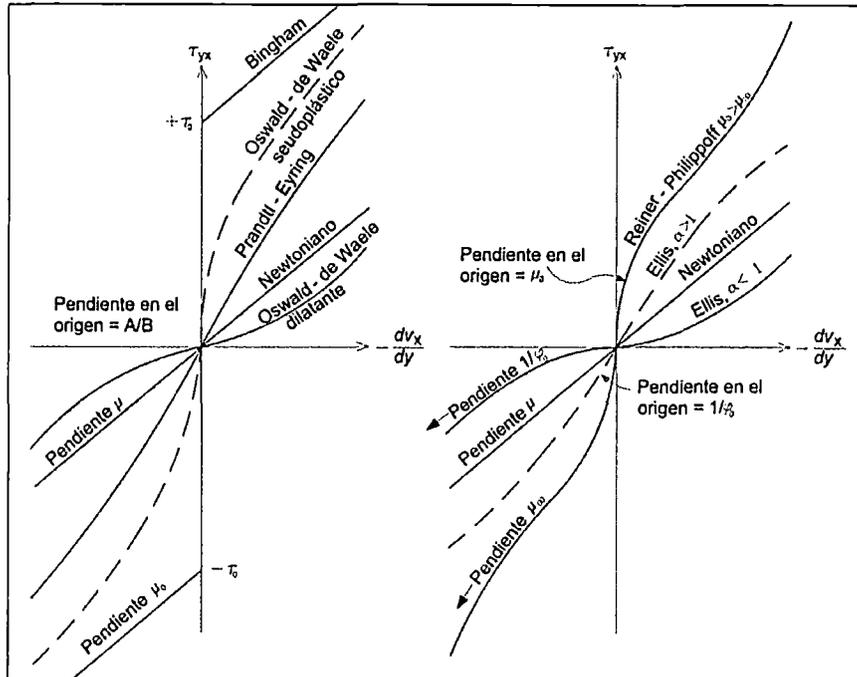


Figura 1.20. Modelos no newtonianos en estado estacionario

Ref. Bib. [3]

Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas o “modelos” para expresar la relación entre τ_{yx} (esfuerzo de corte) y dv_x/dy (gradiente de velocidad) en estado estacionario. Todas las ecuaciones contienen parámetros empíricos positivos, cuyo valor numérico puede determinarse correlacionando los datos experimentales de τ_{yx} frente a dv_x/dy , a temperatura y presión constante.

A. Modelo de Ostwald – De Waele

$$\tau_{yx} = -m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy} \quad \dots \text{(Ec. 1.22)}$$

Esta ecuación de dos parámetros se conoce también con el nombre de ley de la potencia. Para $n=1$ se transforma en la ley de la viscosidad de Newton, siendo

$m = \mu$; por consiguiente, la desviación del valor de n con respecto a la unidad es una medida del grado de desviación del comportamiento newtoniano. Cuando n es menor que uno el comportamiento es pseudo-plástico, mientras que para valores superiores a la unidad es dilatante. En el Cuadro 1.5 se dan algunos valores aproximados de m y n para distintos fluidos.

Cuadro 1. 5 Parámetros del modelo de la potencia para varios fluidos a temperatura ambiente

Composición del Fluido (% en peso)	m (dina.seg ⁿ .cm ⁻²)	n (adimensional)
23.3% de arcilla amarilla de Illinois en agua	55.50	0.229
0.67% de CMC en agua	3.04	0.716
1.5 % de CMC en agua	31.30	0.554
3.0 % de CMC en agua	92.9	0.566
33 % de cal en agua	71.8	0.171
10 % de napalm en Keroseno	42.8	0.520
4 % de pasta de papel en agua	200	0.575
54.3 % de cemento en agua	25.1	0.153

Ref. Bib. [3]

CMC: Carboximetilcelulosa

B. Modelo de Eyring

$$\tau_{yx} = A \cdot \operatorname{arcsenh} \left(-\frac{1}{B} \frac{dv_x}{dy} \right) \quad \dots \text{(Ec. 1.23)}$$

Este modelo de dos parámetros deriva de la teoría cinética de los líquidos (teoría de la viscosidad de los líquidos) desarrollada por Eyring. El modelo de Eyring predice el comportamiento pseudo-plástico para los valores finitos de τ_{yx} , y tiende asintóticamente a la ley de la viscosidad de Newton cuando τ_{yx} tiende hacia cero, siendo en este caso $\mu = A/B$.

C. Modelo de Ellis

$$-\frac{dv_x}{dy} = (\varphi_0 + \varphi_1 |\tau_{yx}|^{\alpha-1}) \tau_{yx} \quad \dots \text{(Ec. 1.24)}$$

Este modelo consta de tres parámetros positivos ajustables: φ_0 , φ_1 y α . Si se toma para α un valor mayor que la unidad, el modelo tiende hacia la ley de

Newton para valores bajos de τ_{yx} , mientras que elige para α un valor menor que la unidad, la ley de Newton se establece para valores elevados de τ_{yx} . El modelo presenta una gran flexibilidad, y en él están comprendidas, como casos particulares, tanto la ley de Newton (para $\varphi_1 = 0$), como la ley de la potencia (para $\varphi_0 = 0$). En el Cuadro 1. 6 se presentan los parámetros de Ellis para diversos fluidos.

Cuadro 1. 6 Parámetros de Ellis para soluciones de carboximetilcelulosa en agua

Concentración de la solución (% en peso)	Temperatura(° C)	α (adim.)	φ_0 (cm ² seg ⁻¹ dina ⁻¹)	φ_1 (cm ² seg ⁻¹ dina ^{-α})	Intervalo experimental del esfuerzo cortante (dina cm ⁻²)
4.0% de CMC bajo	29.4	1.170	0.1377	0.3211	8 a 440
5.0% de CMC bajo	29.4	1.337	0.000	0.0521	8 a 1010
1.5% de CMC medio	29.4	1.185	0.4210	0.2724	6 a 300
2.5% de CMC medio	29.4	1.412	0.0383	0.0181	17 a 720
0.6% de CMC alto	29.4	1.707	0.2891	0.0280	8 a 270

Ref. Bib. [3]

D. Modelo de Reiner – Philippoff

$$-\frac{dv_x}{dy} = \left(\frac{1}{\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\tau_{yx}/\tau_s)^2}} \right) \tau_{yx} \quad \dots \text{(Ec. 1.25)}$$

Este modelo contiene también tres parámetros positivos ajustables: μ_0 , μ_∞ y τ_s . Teniendo en cuenta que frecuentemente se ha observado que el comportamiento newtoniano se presenta, tanto para valores muy bajos como muy elevados del gradiente de velocidad, la Ec. 1.64 ha sido planteada con el fin de que se transforme en estos dos casos límite en la ley de Newton de la viscosidad, haciéndose $\mu = \mu_0$ y $\mu = \mu_\infty$, respectivamente. La curva que resulta al representar gráficamente $\tau_{yx} = \pm \tau_s \sqrt{3\mu_0 / \mu_\infty}$. En el Cuadro 1.7 se dan valores para μ_0 , μ_∞ y τ_s , para diversos fluidos.

La Figura 1.20 es una descripción gráfica del comportamiento reológico de los modelos que se han expuesto. Se debe tener presente que estas ecuaciones no

son más que fórmulas empíricas de ajuste de curvas, y por consiguiente, sería aventurado emplearlas fuera del intervalo de los datos experimentales utilizados en su obtención. Así mismo los parámetros de algunos de estos modelos son funciones de la temperatura, presión, composición, y, generalmente también, del intervalo de dv_x/dy para el que se ha ajustado la ecuación; por lo tanto, al dar los valores de los parámetros reológicos, es preciso especificar cuidadosamente las condiciones en que han sido determinados.

Cuadro 1. 7 Parámetros de Reiner-Phillippoff para diversos fluidos

Sustancia	Temperatura(°C)	μ_0 (poise)	μ_∞ (poise)	τ_s (dinac m ⁻²)	Intervalo experimental del esfuerzo cortante (dina cm ⁻²)
Azufre fundido	120	0.215	0.0105	0.073	0.2 a 10
Butirato de coleslerina	100	2.4	0.35	1.050	0.8 a 20
30.4% de metanol en hexano	34	0.035	0.0035	0.5	0.1 a 4
0.4% de poliestireno en tetralina	20	4.0	1.0	500	500 a 4000

Ref. Bib. [3]

E. Modelo de Bingham

$$\tau_{yx} = -\mu_0 \frac{dv_x}{dy} \pm \tau_0 \quad \text{si } |\tau_{yx}| > \tau_0$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0 \quad \text{si } |\tau_{yx}| < \tau_0 \quad \dots \text{ (Ec. 1.26)}$$

Toda sustancia que se comporta de acuerdo a este modelo de dos parámetros se denomina plástico de Bingham; permanece rígida mientras el esfuerzo cortante es menor de un determinado valor τ_0 , por encima del cual se comporta de forma semejante a un fluido newtoniano.

Este modelo resulta suficientemente exacto para muchas pastas y suspensiones finas. En el Cuadro 1. 8 se indican los parámetros de Bingham para suspensiones de partículas de combustibles nucleares en agua pesada.

Cuadro 1. 8 Parámetros del plástico de Bingham

Material Suspendido	Tamaño de Partícula		$k_1 = \frac{\tau_0}{\phi^4}$ (dina . cm ⁻²)	$k_2 = \frac{\ln \mu_0 / \mu_w}{\phi}$ (adimensional)
	D (micrones)	σ (adimensional)		
UO ₂	1.4	1.7	7.2 x 10 ⁴	18
U ₃ O ₈	1.3	2.0	11.0 x 10 ⁴	22
UO ₃ .H ₂ O	1.2	1.9	20.6 x 10 ⁴	22
			$k_3 = \frac{\tau_0}{\phi^3}$ (dina . cm ⁻²)	$k_4 = \frac{\ln \mu_0 / \mu_w}{\phi}$ (adimensional)
ThO ₂	0.030	2.7	52.7 x 10 ⁴	24
	0.75	2.8	26.3 x 10 ⁴	14
	1.6	1.5	4.8 x 10 ⁴	12
	2.4	1.7	1.6 x 10 ⁴	12

Ref. Bib. [3]

Dónde:

D: Diámetro de la partícula de masa media.

σ : Desviación estándar del ln (diámetro de la partícula) respecto de ln (D).

ϕ : Fracción del volumen de sólidos en suspensión.

μ_0, τ_0 : Parámetros de Bingham para la suspensión.

μ_w : Viscosidad del agua a la misma presión y temperatura.

El modelo plástico de Bingham se asocia a los intentos iniciales de caracterizar el flujo de lodos y el flujo de escombros de grano fino, pues en estos, el flujo se genera luego de superar el valor del esfuerzo cortante de cedencia (τ_0).

Investigadores como O'Brien y Julien (1985), Fei (1983) o Yano & Daido (1965) lo utilizaron para describir el flujo de lodos y otros flujos hiperconcentrados. Los parámetros en el modelo de Bingham son determinados experimentalmente y dependen de la concentración de sedimentos y del tamaño de las partícula (Chen, 1986).

F. Modelo Viscoso de Coulomb

Generalmente las mezclas de altas concentraciones de sólido-líquido, siguen el criterio definido por Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad \dots \text{(Ec. 1.27)}$$

Dónde:

c : Cohesión

σ_n : Esfuerzo normal

ϕ : Ángulo de fricción interna

En esta ecuación la componente de esfuerzos normales σ_n depende de la razón o velocidad de corte aplicada. En general, este modelo se aplica en flujos con velocidades pequeñas. Johnson (1970) propuso que la resistencia dinámica total, es una combinación de cedencia, resistencia friccional y resistencia viscosa; denominado el modelo viscoso de Coulomb

$$\tau = c + \sigma_n \tan\phi + \mu \frac{dv}{dy} \quad \dots \text{(Ec. 1.28)}$$

Dónde:

μ : Resistencia viscosa

$\frac{dv}{dy}$: Velocidad de corte o deformación

Como se aprecia, σ_n es dependiente de la velocidad de corte, por lo que la adición de Johnson parece redundante. Este es uno de los primeros modelos realizados para caracterizar el comportamiento del flujo de escombros, sin embargo ofrece una visión mucho más aproximada de la solución al problema.

En modelos viscoplásticos, la principal asunción es que la matriz continua sea responsable del esfuerzo de cedencia y del comportamiento viscoso de los flujos de escombros o de lodos. Por lo tanto, las propiedades de la matriz determinan la resistencia dinámica al corte indicado en cada ecuación. Una de las desventajas más importantes de estos modelos es que no incluyen explícitamente la dinámica de fluidos entre partículas.

G. Modelo del Fluido Dilatante de Bagnold

Los intereses iniciales de Bagnold se centraron en la mecánica del transporte de sedimentos del lecho, definiendo tres regímenes para el comportamiento del flujo basados en el grado de la velocidad de corte asociada: macroviscoso, transicional e Inercia granular.

Bagnold, desarrolló expresiones para los dos regímenes limitantes, es decir, para el Macroviscoso e inercia granular. Estas definiciones, se basan en el grado relativo de la razón o velocidad de corte en el flujo. Esto se traduce en una mayor o menor influencia de los esfuerzos inerciales, respecto a los esfuerzos viscosos. En el régimen macroviscoso, la viscosidad es dominante y las tensiones normales y de corte, son funciones lineales del gradiente de velocidad dv/dy .

$$P = \alpha_v \lambda^{3/2} \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) \cos \phi_d \quad \dots \text{(Ec. 1.29)}$$

Dónde:

P : Presión dispersiva normal

α_v : Cte. determinada experimentalmente para el régimen macroviscoso

λ : Concentración lineal de partículas.

μ : Viscosidad intersticial del fluido

ϕ_d : Ángulo de fricción del grano

En el régimen de inercia granular el fluido intersticial tiene menos influencia y los efectos principales se deben a la interacción granular. Bagnold atribuyó el mecanismo primario de transferencia de momento, a la colisión de una capa de partículas moviéndose sobre otra capa más lenta. Haciendo una analogía a la teoría cinética de gases, Bagnold formuló la expresión siguiente para la presión dispersiva normal (P):

$$P = a_i \rho_s \lambda f(\lambda) D^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \cos \phi_d \quad \dots \text{(Ec. 1.30)}$$

Dónde:

a_i : Cte. determinada experimentalmente en régimen de inercia granular

ρ_s : Densidad de las partículas.

$f(\lambda)$: Función desconocida de λ

De experimentación, Bagnold encontró que la tensión dispersiva normal está relacionada con la tensión o esfuerzo de corte granular mediante la expresión conocida como la tensión granular para el fluido dilatante de Bagnold:

$$\tau_g = P \tan \phi_d \quad \dots \text{(Ec. 1.31)}$$

Dónde:

τ_g : Tensión de corte granular.

Esta tensión de corte granular, representa la suma de otros esfuerzos propios del fluido, como la tensión turbulenta. Sin embargo, en altas concentraciones, Bagnold argumenta que la turbulencia es amortiguada. La existencia de la presión dispersiva se atribuye a una anisotropía en la distribución espacial de las partículas (Savage, 1984).

H. Modelo del Esfuerzo Cortante Turbulento

Este modelo se basa en la teoría cinética de gases. Al igual que el modelo de Bagnold, este modelo usa esta analogía para describir el flujo cortante entre dos capas de fluido. Está dado por la siguiente expresión:

$$\tau_t = \rho k_v^2 y^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad \dots \text{(Ec. 1.32)}$$

Dónde:

τ_t : Esfuerzo cortante turbulento

ρ : Densidad del fluido

k_v : Constante de Von Karman

y : Distancia desde el fondo.

En el caso de mezclas con sedimentos diluidos, k_v está en función de la concentración de sedimentos en volumen C_v (Vanoni, 1975). En el transporte de sedimentos, la turbulencia es la responsable de la suspensión de las partículas del sedimento. De manera similar, en un flujo de escombros, la presión dispersiva es la principal responsable de dispersar las partículas del sedimento. En muchos casos de flujos granulares ambos mecanismos son responsables de la dispersión. O'Brien y Julien (1985) usaron esta idea para modelar el flujo de escombros.

Para el caso de un flujo altamente cargado de sedimentos granulares pequeños, suspendidos por la turbulencia en el fluido, Arai y Takahashi (1986) incluyeron un

corte turbulento τ_t (análogo al esfuerzo turbulento del agua pura) y el corte granular τ_g para determinar la tensión o esfuerzo total de corte τ .

$$\tau = \tau_t + \tau_g \quad \dots \text{(Ec. 1.33)}$$

Dónde:

$$\tau_t = -\rho_m \overline{u'v'} = \rho_m l_m^2 \left| \frac{dv}{dy} \right| \left| \frac{dv}{dy} \right| \quad \dots \text{(Ec. 1.34)}$$

$\rho_m = \rho_f + C_v(\rho_s - \rho_f)$ Es la densidad de la mezcla, ρ_f es la densidad fluida y l_m es la longitud de mezcla. u' y v' son las velocidades que fluctúan, en la dirección perpendicular al flujo.

I. Modelo Reologico de O'Brien Y Julien

O'Brien y Julien (1985), realizaron investigaciones en el flujo de lodos con alta concentración de sedimentos finos en la matriz fluida.

En una matriz fluida con baja concentración de sedimentos, los esfuerzos turbulentos predominan en el flujo. Por otro lado, una alta concentración de partículas gruesas combinada con una baja concentración de partículas finas, origina esfuerzos dispersivos. El modelo cuadrático propuesto por O'Brien y Julien describe el comportamiento del flujo, desde el régimen continuo viscoso hasta el comportamiento turbulento/dispersivo. En este contexto, el flujo de sedimentos hiperconcentrados, como el flujo de lodos o el flujo de escombros, envuelve la interacción entre la parte fluida y los sedimentos de una manera compleja, considerándose entre otros la acción de la turbulencia, los esfuerzos viscosos, el intercambio de momentum interparticular sedimento-fluido, el arrastre de partículas y la cohesión de partículas sedimentarias. La cohesión del sedimento fino, controla el comportamiento no-newtoniano de la matriz fluida. Esta cohesión contribuye al esfuerzo de cedencia el cual debe ser excedido por una fuerza aplicada para iniciar el flujo.

El esfuerzo cortante (τ) en flujos sedimentarios hiperconcentrados, puede calcularse por la suma de 5 componentes del esfuerzo.

1.3 REOMETRÍA E INSTRUMENTACIÓN

1.3.1 Consideraciones iniciales

La reometría se entiende como la disciplina que abarca cualquier técnica o mecanismo para medir las propiedades reológicas de un material. Esto incluye por ejemplo:

- Técnicas de visualización como la fotoelasticimetría que permite demostrar la distribución de la tensión o esfuerzo de un material sometido a corte o deformación, basándose en la propiedad de que ciertos materiales presentan una serie de franjas de colores cuando soportan esfuerzos, al ser observados a través de una luz polarizada.
- Métodos no estandarizados (tal como la prueba del slump para evaluar el rendimiento del esfuerzo o tensión de un material viscoplástico).

El principio básico de la reometría es el de realizar experimentos donde, las características del flujo tales como el esfuerzo de corte o tensión de corte y el perfil de la distribución de velocidades, pueden conocerse previamente. Bajo estas condiciones, posibilitar la deducción de la curva del flujo definiendo: o la variación del esfuerzo de corte como una función de la velocidad de corte, o a partir de las mediciones de valores del flujo como el torque y la velocidad rotacional para un viscosímetro rotatorio.

1.3.2 Condiciones límite para la Reometría

El procedimiento matemático realizado para desarrollar el problema físico de un fluido que es deformado bajo influencia de fuerzas cortantes, conduce a ecuaciones diferenciales complejas. Este problema conduce a una solución matemática aceptable cuando las condiciones de prueba se dan dentro de ciertas consideraciones o simplificaciones de la realidad. La Ley de Newton para la reometría es válida solo en el marco de estas condiciones. Medir la viscosidad, requiere las condiciones de límite de prueba como las mencionadas a continuación:

- Flujo laminar: El corte aplicado conduce únicamente al flujo laminar. Esto limita el uso de paletas mezcladoras generadoras de flujo turbulento.

- Flujo en estado estacionario: Bajo la ley de Newton, el esfuerzo de corte aplicado se correlaciona con la velocidad de corte.
- Sin resbalamiento: El esfuerzo de corte aplicado se debe transmitir de la placa móvil hacia el fluido. De no existir adherencia, la aplicación de un esfuerzo de corte al fluido carece de sentido.
- Las muestras deben ser homogéneas: Este requisito, implica que la muestra debe reaccionar, ante un esfuerzo de corte, de manera uniforme.
- Sin elasticidad: La muestra no debe presentar características viscoelásticas. Véase la Figura 1.21.

Para poder utilizar las ecuaciones básicas de la reometría, las muestras de fluido analizadas, deben comportarse como flujos puramente viscosos. La entrada total de energía para producir el flujo en estado estacionario, debe convertirse totalmente de energía para producir deformación en liberación de calor producto del proceso de deformación.

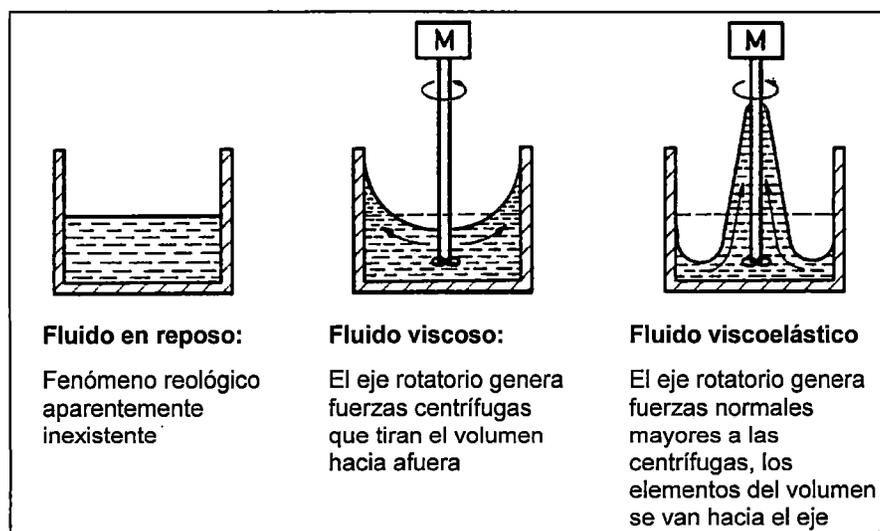


Figura 1.21. Respuestas al corte para fluidos viscosos y viscoelásticos

Ref. Bib. [15]

1.3.3 Reometría Absoluta

Los reómetros se definen como “reómetros absolutos” si la medida de la viscosidad del flujo puede obtenerse de la medición de los resultados del experimento, en “unidades físicas absolutas” es decir:

- Fuerzas → en unidades de "Newton" [N]
- Dimensiones del sistema → en unidades de "metros" [m]
- Intervalos de tiempo → en unidades de "segundos" [s]

Y luego la viscosidad pueda definirse como:

$$\mu = \frac{N}{m^2} \cdot s = \frac{\text{fuerza}}{\text{distancia}^2} \cdot \text{tiempo} = Pa \cdot s \quad \dots \text{ (Ec. 1.37)}$$

Los requisitos para medir la viscosidad absoluta son:

- Las muestras sometidas a experimentación, deben seguir un patrón de flujo que pueda caracterizarse matemáticamente. Se tiene, por ejemplo, expresiones de cálculo desarrolladas para: flujo entre placas paralelas, flujo circular entre dos cilindros coaxiales, flujo a través de capilares, flujo entre cono y placa y el flujo circular entre dos placas paralelas (Figura 1.22).

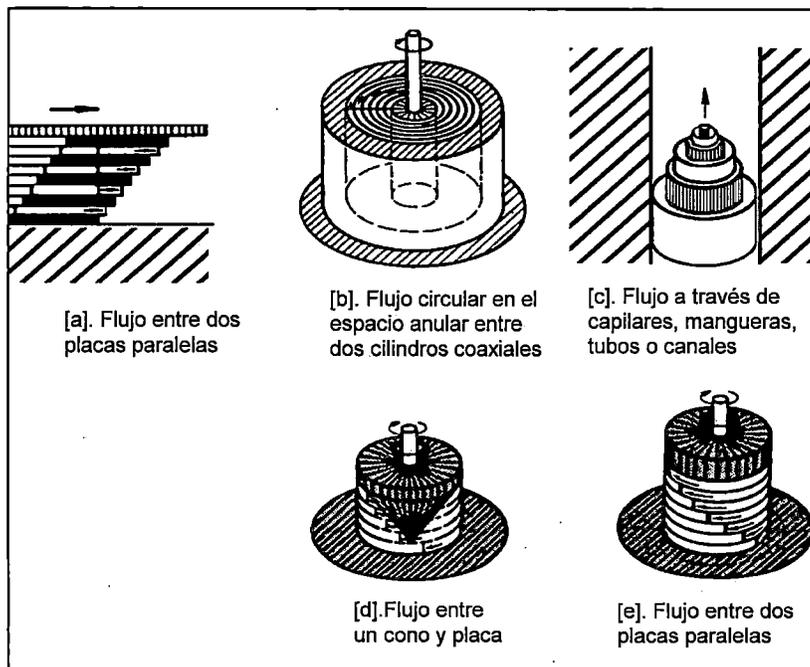


Figura 1.22. Tipos de flujo modelados.

Ref. Bib. [15]

- Las condiciones de experimentación elegidas deben regirse dentro las condiciones límite antes mencionadas.

Una de las ventajas importantes de la reometría absoluta, es que los resultados de la prueba realizada, son independientes del tipo o marca de reómetro o viscosímetro utilizado. Esto es válido al probar fluidos newtonianos y más aún, al

experimentar con fluidos no newtonianos de comportamientos desconocidos. Los reómetros relativos se caracterizan por condiciones de ensayo poco controladas y la obtención de los resultados se obtiene por correlaciones o calibraciones. Además la velocidad de corte no es constante, por lo que no son útiles para obtener curvas de fluidez.

1.3.4 Tipos de reómetros

Originalmente, el funcionamiento de un reómetro se basó en la generación de esfuerzos producto de un arreglo mecánico de pesas y poleas (Figura 1.23). Estos métodos iniciales de medición, fueron sustituidos por sistemas que incluían motores eléctricos, constituyendo así los primeros instrumentos de deformación controlada. Con cajas compuestas por engranes logarítmicos, los reómetros más sofisticados (por ejemplo el reogoniómetro de Weissenberg), en la década de 1960, abarcaron un rango de velocidades de 10^{-4} a 10^4 s⁻¹.

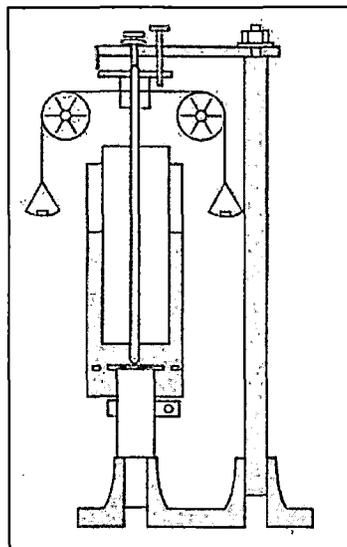


Figura 1.23. Bosquejo del año 1912 de un viscosímetro Searle de esfuerzo controlado de cilindros concéntricos.

Ref. Bib. [1]

A mediados de 1970, una nueva generación de reómetros de deformación controlada hizo su aparición. Estos incorporaban cojinetes de aire, elementos que reducen en gran medida la fricción entre el soporte y el rotor al generar el torque. Luego, alrededor de 1980, apareció una generación de reómetros que posibilitaba además del control de la velocidad de deformación, el control del esfuerzo aplicado, independiente del movimiento. Junto a estas características, se desarrollaron nuevas formas de medir la rotación en cada vez rangos más

pequeños de velocidades de rotación. La última tecnología de discos ópticos ahora implica medidas de rotación de solo 10^{-8} rad.s⁻¹ (1 revolución cada 20 años). Esto abre una nueva línea de investigación a un comportamiento de flujo previamente inalcanzable.

A. Reómetros / Viscosímetros Rotatorios

Los reómetros rotatorios tienen como característica principal posibilitar una medición absoluta, siendo el resultado independiente del tipo especial o del fabricante del reómetro empleado, pudiendo comparar fácilmente los resultados obtenidos (Figura 1.24). La clasificación de estos reómetros se basa en: su geometría, control del proceso y sistema de medición.

A.1. DE ACUERDO A SU GEOMETRÍA

Según su geometría, los reómetros rotatorios pueden ser:

- Reómetro rotacional de cilindros concéntricos o coaxiales (CC).
- Reómetro rotacional de cono-placa (CP).
- Reómetro rotacional de placas paralelas (PP).

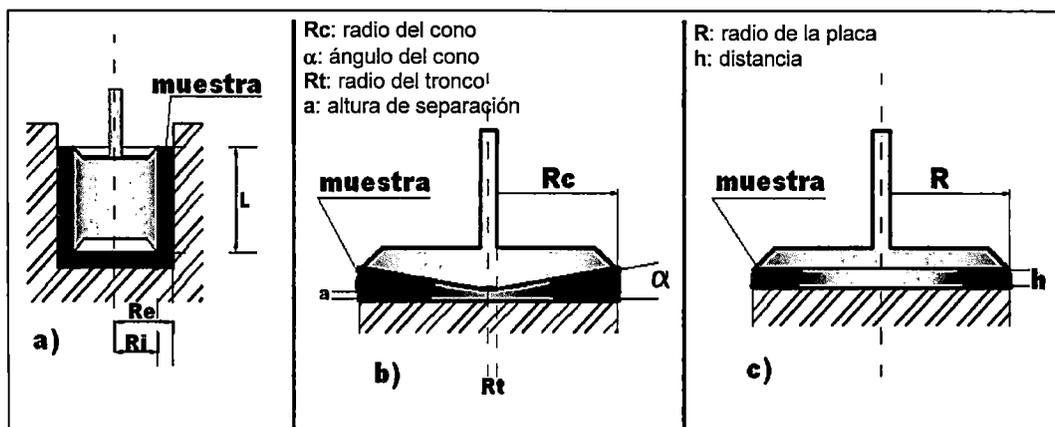


Figura 1.24. Reómetros rotacionales de medición absoluta: a) reómetro de cilindros concéntricos, b) reómetro cono-placa y c) reómetro de placas paralelas

Ref. Bib. [15]

Reómetro rotacional de cilindros concéntricos (CC): Consta de un vaso de medición cilíndrico (de radio R_e) que contiene en su interior un cilindro (de radio R_i) de forma que el fluido queda atrapado en la corona anular que dejan el vaso y el cilindro interior (Figura 1.24 a). En este reómetro, se procesa el esfuerzo de torsión medido, creado por la resistencia del fluido que es sometido a corte en el espacio entre vaso y cilindro. Sin embargo, existe un esfuerzo adicional en las

caras superior e inferior, por lo que se puede incurrir en error en la medida del esfuerzo, este error debe ser controlado seleccionando geometrías convenientes (generadores de vacío) que mitiguen tales efectos (Figura 1.25). Adicionalmente, para mitigar la propagación de errores en la experimentación, se debe reducir al mínimo posible el espacio anular entre cilindros, evitando así el flujo turbulento al desarrollar el experimento.

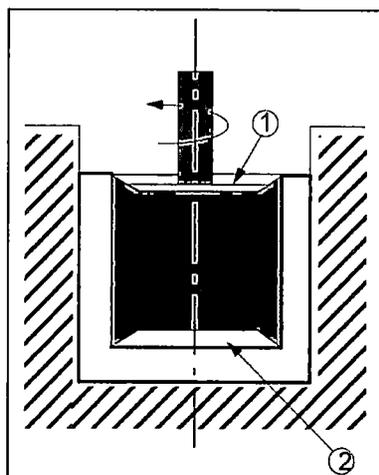


Figura 1.25. Diseño de reómetro estándar con hendiduras arriba y abajo

Ref. Bib. [15]

En la hendidura ② en la base del cilindro, encierra aire cuando se realiza el experimento. La burbuja de aire encerrada cubre el 90% o más de la cara inferior. Cuando el cilindro interior rota, el aire actúa como un amortiguador, evitando que la muestra sea sometida a corte por debajo del cilindro y elimina la contribución del esfuerzo de la cara inferior. La hendidura ① en la tapa del cilindro interior, permite que cualquier exceso de muestra se derrame por encima en esa cavidad, de modo que, al rotar, los cortes actúan solamente con la cara lateral, evitando una contribución al esfuerzo lateral.

Reómetro rotacional cono-placa (CP): Es un tipo de reómetro rotacional que consta que un cono circular plano y de una placa (plato) (Figura 1.26). Este sistema es elegido cuando se requiere una limpieza extrema para la prueba. Además, es usado cuando el tamaño de la muestra disponible es pequeña o muy valiosa (en algunos casos se puede experimentar con gotas de una muestra). Comparado con el reómetro de cilindros concéntricos, este debe mantener una alta sensibilidad y precisión, por la menor área de contacto involucrada en la experimentación.

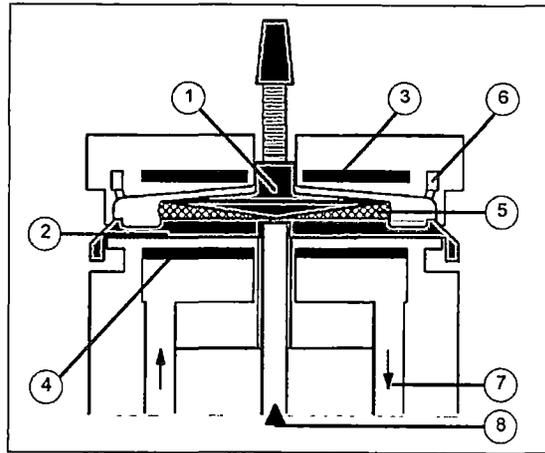


Figura 1.26. Diseño de reómetro rotacional cono-placa.

Ref. Bib. [15]

Dónde:

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| ① Cono de eje cerámico | ⑤ Muestra |
| ② Placa inferior | ⑥ Espacio anular de gas inerte |
| ③ Calentador superior | ⑦ Trayectoria de enfriamiento |
| ④ Calentador inferior | ⑧ Sensor de temperatura |

Su elección no es recomendada en la experimentación con muestras viscoelásticas, por su especial sensibilidad a las fuerzas normales generadas

Reómetro rotacional de placas paralelas (PP): Este reómetro es una buena alternativa al reómetro CP, pues aunque requiere un volumen mayor de muestra en un reómetro de igual radio, este sigue siendo una fracción pequeña, de lo necesario a usaren un reómetro CC.

Su ventaja radica en el hecho que con este sistema se evitan problemas con muestras que contienen agregados en suspensión (Figura 1.24 c). Además presentan una buena aproximación cuando las pruebas son sometidas a bajas velocidades de corte.

Una de sus desventajas, radica en cuanto el reómetro es utilizado para determinar la dependencia de la razón de corte, o de la viscosidad o de un fluido con un comportamiento no newtoniano, pues los resultados requieren una corrección por el efecto de Weissenberg, tomando en cuenta la variación de la velocidad de corte en función del radio de la placa.

A.2. DE ACUERDO AL CONTROL DEL PROCESO

Para estos reómetros, existen dos alternativas al control del proceso de experimentación:

Reómetro rotacional de esfuerzo controlado (CS): La orden de entrada es un esfuerzo definido y preseleccionado, producto de un momento de giro controlado. La resistencia originada por la viscosidad del fluido solo permite un gradiente de velocidad, es decir, un número de revoluciones característico, el cual es medido. Este instrumento es denominado Reómetro-CS (controlled stress).

Reómetro rotacional de velocidad controlada (CR): La orden de entrada es una razón o velocidad de corte definida y preseleccionada, que permita determinar un esfuerzo de corte resultante de la interacción con el fluido. Este instrumento es denominado Reómetro-CR (controlled rate).

Algunos reómetros modernos, tienen el potencial para trabajar en cualquiera de los dos tipos de experimentación.

A.3. DE ACUERDO AL SISTEMA DE MEDICIÓN

Según el sistema de medición, el diseño de un reómetro se basa en:

- Sistema Searle.
- Sistema Couette.

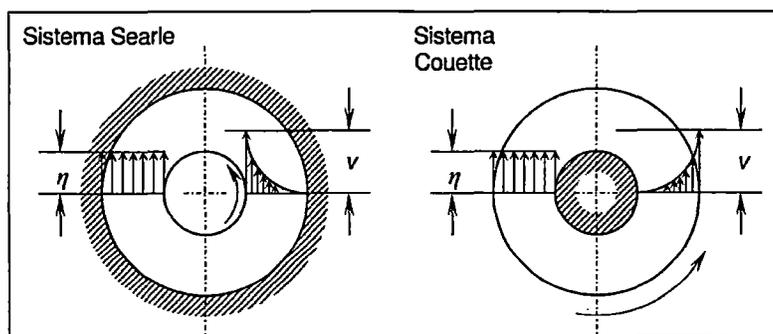


Figura 1.27. Perfiles de velocidad de flujo y de viscosidad en los sistemas de medición Searle y Couette.

Ref. Bib. [8]

Reómetro – CS con sistema Searle: Según este sistema de medición, el cilindro exterior trabaja como una taza inmóvil que permite un control en la temperatura del experimento, ya que puede estar envuelta por un fluido termal circulando constantemente. El cilindro interior funciona como un rotor, el cual es impulsado por un motor eléctrico especial “M” (Figura 1.28) para el cuál se han predefinido

valores de esfuerzo de torsión. La resistencia al movimiento ofrecida por la muestra que se encuentra en el espacio entre los cilindros versus el esfuerzo de corte permitirá que el rotor gire solamente a una velocidad que se relaciona con la velocidad de corte y la viscosidad para ese esfuerzo aplicado. El sistema de medición "Searle", en este contexto, significa que la velocidad del rotor y el esfuerzo de torsión se miden en el mismo eje.

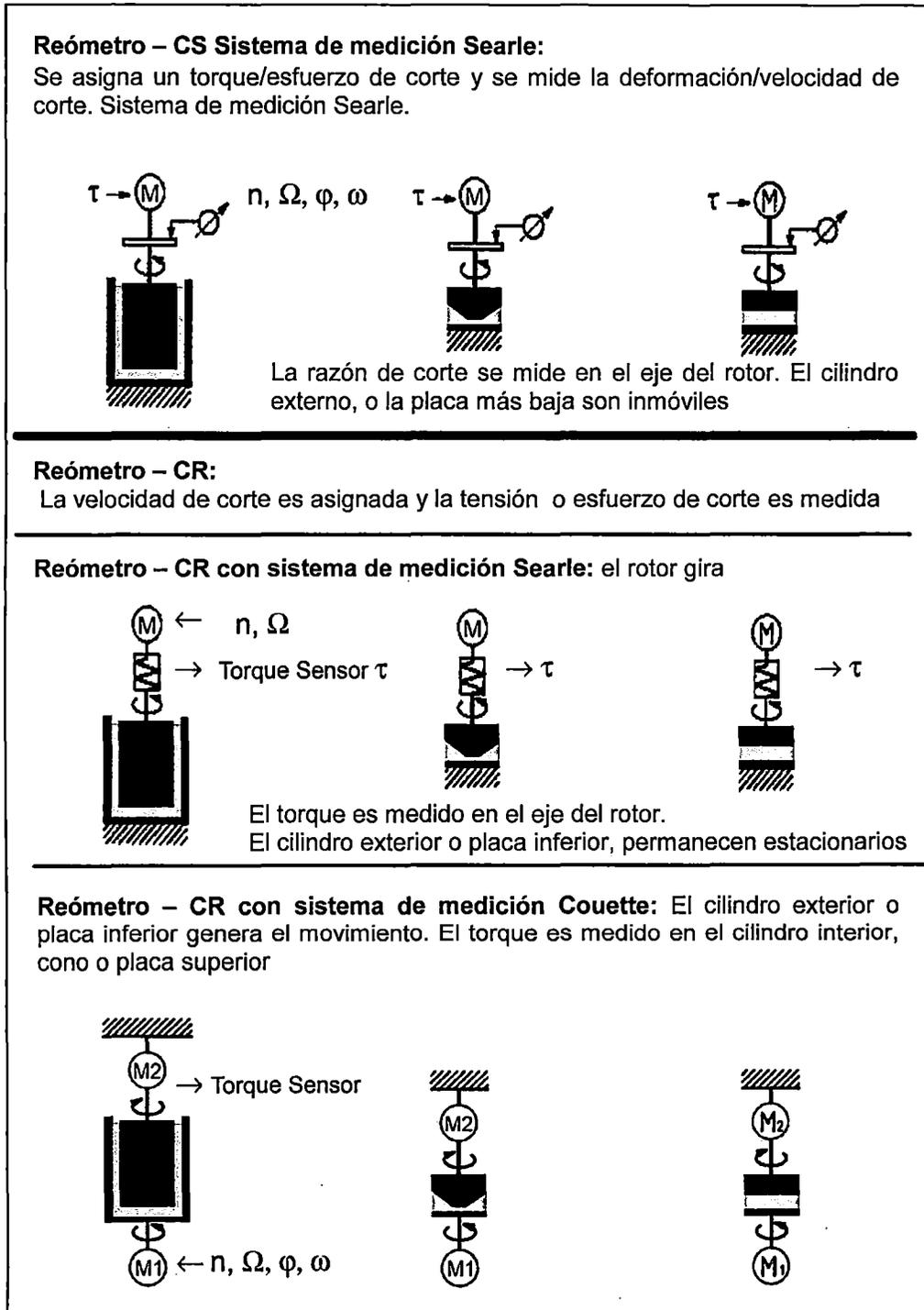


Figura 1.28. Tipos de reómetros rotatorios.

Ref. Bib. [15]

El sistema puede ser modificado de tal modo que la taza exterior se intercambie por una placa inferior y el cilindro interior, por un cono giratorio o una placa superior, manteniendo el mismo principio de medición.

Reómetro - CR con sistema Searle: En este sistema de medición, el cilindro interno o rotor es impulsado por un motor "M". La velocidad es controlada o programada para ser constante, mientras que el cilindro exterior se mantiene inmóvil. El fluido encontrado en espacio entre los cilindros es forzado a fluir. La resistencia del fluido que es sometido a corte entre los cilindros limitantes, origina un esfuerzo de corte, contrario al esfuerzo de torsión proporcionado por el motor impulsor. El sistema "Searle" significa que el impulso en el cilindro interno y el detector del esfuerzo de torsión actúan en el mismo eje del rotor.

Reómetro - CR con sistema Couette: En este sistema de medición, el cilindro externo que es impulsado por el motor "M1" (Figura 1.28) rota a una velocidad definida que fuerza el flujo en el espacio entre cilindros. La resistencia del fluido al esfuerzo de corte, transmite un esfuerzo de torsión relacionado a la viscosidad sobre el cilindro interno, que inducido por el fluido también rotará. Se mide este esfuerzo de torsión y se determina el valor del esfuerzo de torsión en contra requerido para que el cilindro interior se detenga.

El diseño del sistema de medición de "Couette" significa que la fuerza impulsora actúa en la taza o cilindro externo, mientras que el esfuerzo de torsión relacionado con la viscosidad, es medido en el eje del cilindro interno, el otro elemento del sistema sensorial. El motor secundario "M2" (Figura 1.28) que actúa en el eje del cilindro interno, es controlado para proporcionar datos a un contador de esfuerzo de torsión. En el caso de la geometría CP, el motor "M2" se coloca en el cono y en el caso de una geometría PP, la placa superior es la que lleva el motor "M2". En este método de prueba, las revoluciones resultantes para el motor secundario "M2" son una señal relacionada con la viscosidad de la prueba. En este tipo de sistemas de medición, se mantiene un flujo laminar aun cuando se prueban fluidos de viscosidad baja en las altas razones de corte, esta es la ventaja sobre los reómetros tipo Searle.

CAPITULO II: DESARROLLO DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

2.1 CONCEPCION DEL DISEÑO

2.1.1 Criterios básicos del diseño

Para la concepción del equipo de medición reológica, se tomó en cuenta criterios de diseño, que permitan la obtención de información útil, en un amplio rango de experimentación. Siendo el objetivo principal de esta investigación, determinar las propiedades reológicas en flujos hiperconcentrados, el diseño en mención debe cubrir tales expectativas en la obtención de estos parámetros. A continuación se desarrolla el proceso para la elección y fabricación de la instrumentación reológica.

A. Elección del tipo de instrumentación reológica

En el ítem 1.3 del capítulo I, se detallaron los tipos de reómetro/viscosímetro más comunes y de mayor difusión comercial. De estos, el grupo que más se orienta a posibilitar la medición de parámetros reológicos en flujos hiperconcentrados, es el grupo de reómetros rotacionales por las siguientes razones:

- Son instrumentos de medición absoluta, por lo que, los resultados obtenidos son parámetros físicos directos, que no dependen de correlaciones.
- El control de entrada de un reómetro rotatorio, permite generar una información histórica del comportamiento viscoso del flujo (reograma), ya sea aplicando una velocidad o esfuerzo de corte controlado.
- En la obtención de datos, es factible identificar el rango de esfuerzos donde se produce el esfuerzo de cedencia.

Estas razones sustentan la utilización de un reómetro rotacional. Queda definir la geometría adecuada para la experimentación.

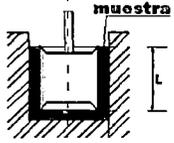
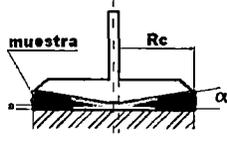
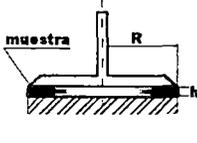
B. Elección de la geometría del equipo rotacional

En la elección de la geometría más adecuada del reómetro rotatorio para experimentar en flujos hiperconcentrados, se realizó una comparación de los mismos, tomando en cuenta sus ventajas y desventajas respecto a:

- características físicas (dimensión y forma), formas de experimentación,
- cantidades de muestra requerida, tamaño de grano en suspensión de la muestra,
- técnicas de experimentación,
- sensibilidad en la interacción con las muestras, etc.

En el cuadro presentado a continuación (Cuadro 2. 1), se detalla un comparativo entre estos reómetros rotatorios.

Cuadro 2. 1. Comparación entre reómetros rotacionales

CILINDROS CONCÉNTRICOS	CONO-PLACA	PLACAS PARALELAS
		
VENTAJAS		
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de medir propiedades reológicas en fluidos de baja concentración. - Sensible a flujos de baja viscosidad por la mayor superficie de contacto. - Detección del comportamiento tixotrópico o reopéctico del flujo. - Sistema de circulación termal que mantiene una temperatura constante de prueba. - Los errores de medida disminuyen al reducir el espacio ocupado por el material. - El cilindro interno tiene una geometría que minimiza efectos de interacción en sus caras superior e inferior. 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de medición en flujos de viscosidad media. - Se puede ensayar a altas velocidades de corte. - No presenta problemas de limpieza en parte cónica del equipo, especialmente cuando las muestras son valiosas y se necesita recuperar toda la muestra. - El volumen de muestra para experimentación es relativamente pequeño, varía de gotas hasta 30 mm. dependiendo del ángulo del cono. 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de medir propiedades reológicas en fluidos pastosos o de alta concentración - Se pueden realizar mediciones dinámicas y oscilatorias. - Se puede ensayar con fluidos no homogéneos con partículas grandes en suspensión. (el espacio "h" debe ser 3 veces el diámetro máximo del sólido en suspensión). - Pueden utilizarse en muestras a cortes muy bajos. - Utilizado para medir la elasticidad de semisólidos y muestras viscoelásticas con altos valores de cedencia, por la menor área de contacto comparado con el reómetro de cilindros concéntricos.

Cuadro 2. 1 Comparación entre reómetros rotacionales (...continuación)

CILINDROS CONCÉNTRICOS	CONO-PLACA	PLACAS PARALELAS
DESVENTAJAS		
<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere gran cantidad comparativa de muestra. (aproximadamente entre 5 y 50 cm³). - El cilindro exterior presenta problemas de limpieza óptima. 	<ul style="list-style-type: none"> - Solo se pueden medir fluidos pastosos o de alta concentración y sin partículas. - Se debe realizar un cálculo del ángulo del cono, que favorezca al fluido que se analice (la calidad de los resultados mejora con menores ángulos). - Son afectados por las fuerzas normales generadas en muestras viscoelásticas. - Muestras con partículas abrasivas, causan desgaste en el extremo del cono y en la placa 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren un volumen de muestra mayor que el reómetro de cono placa pero aún mucho menor que el reómetro de cilindros coaxiales. - La menor área de contacto con la muestra sometida a experimentación reduce la sensibilidad del ensayo.

Ref. Bib. [15]

Luego de comparar los reómetros rotacionales, para las condiciones de experimentación, se optó por el reómetro rotatorio de cilindros concéntricos.

La ventaja más importante, se da en la posibilidad de lograr una mayor área de contacto entre el equipo y la muestra sometida a experimentación (mayor sensibilidad), pues los resultados se basan en el esfuerzo necesario o calculado para generar o mantener un movimiento rotatorio respectivamente.

C. Elección del control de proceso y sistema de medición para un equipo rotacional de cilindros concéntricos

En el ítem 1.3.4.1 B se desarrollaron las dos alternativas al control del proceso de experimentación en reómetros rotacionales:

- Reómetros que trabajan a Esfuerzo Controlado (CS).
- Reómetros que trabajan a velocidad de Corte Controlada (CR).

Los reómetros rotacionales CS, están diseñados para proporcionar una alta sensibilidad en el proceso de experimentación y distinguir diferencias muy sutiles entre muestras aparentemente similares a baja velocidad de corte. En el caso de

flujos hiperconcentrados, las respuestas que se obtienen a diversas concentraciones de flujo, ofrecen una variación de resistencia tal que, un reómetro CR bien puede medir y distinguir tales diferencias en su comportamiento. En el caso que la variación del comportamiento requiera de mayor sensibilidad, se puede incrementar el área de contacto entre el fluido-cilindro

Los reómetros CS, en comparación a los reómetros CR, discriminan mejor el comportamiento reológico no newtoniano de semisólidos y fluidos viscoplásticos. Su diferencia fundamental radica en la capacidad de determinar el "esfuerzo de cedencia" característico de cada fluido y concentración de manera precisa (Figura 2.1). Sin embargo, el elevado costo de lograr esta precisión, no es comparable a la posibilidad de conocer el rango o umbral donde se da este esfuerzo que puede obtenerse al trabajar con un reómetro CR.

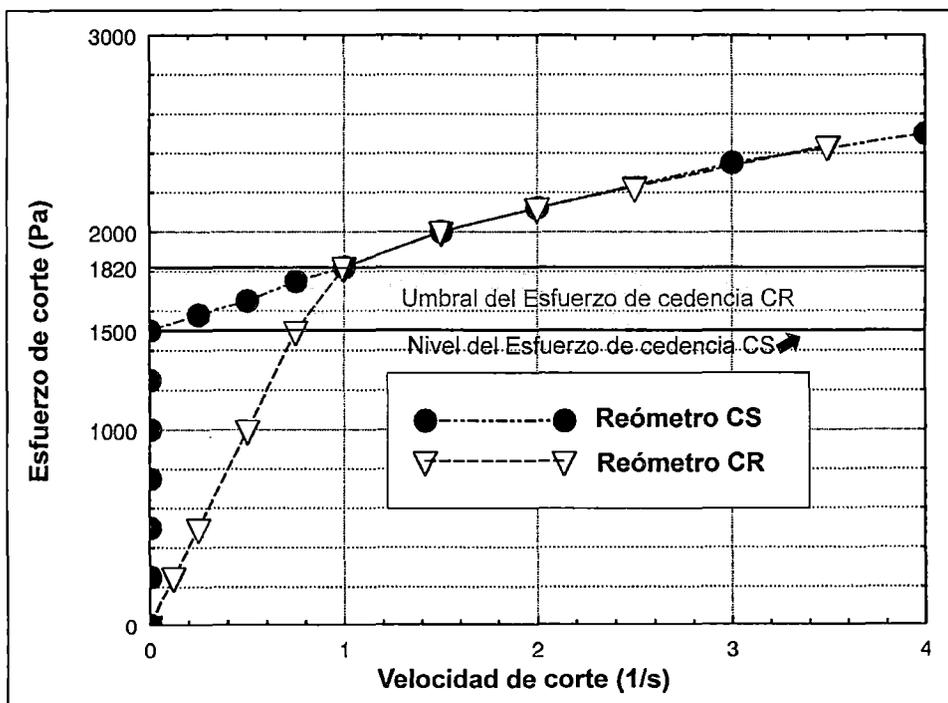


Figura 2. 1 Comparación del esfuerzo de cedencia en Reómetros CS y CR.

Ref. Bib. [15]

En el diseño del equipo rotacional de medición reológica, se optó por la velocidad de corte controlada (reómetro CR). Además, para simplificar el instrumento de medición reológica al uso de un solo motor, se optó por el sistema de medición Searle, descrito en el ítem 1.3.4.1 C.

2.1.2 Ecuaciones que gobiernan el diseño del reómetro rotacional de cilindros concéntricos.

A. Hipótesis de diseño

En el planteamiento de las ecuaciones que gobiernan el diseño del reómetro rotacional de cilindros concéntricos, se han considerado las siguientes hipótesis:

- Existencia de flujo laminar y constante en el espacio anular entre cilindros.
- El efecto en los bordes del cilindro interior se suponen insignificantes respecto al generado por la interacción entre muestra y cilindro.
- El fluido es incompresible
- La temperatura de la sustancia permanece constante durante el ensayo.
- La sustancia del ensayo carece de deslizamiento respecto a las paredes del instrumento.
- la velocidad radial inducida en el flujo se considera nulo.

Las ecuaciones básicas presentadas a continuación, se aplican para el sistema de rotación Searle donde el cilindro interior gira a velocidad constante y el cilindro exterior es estacionario. En tal configuración, el instrumento reométrico mide el torque (M) requerido para mantener una velocidad angular (Ω) constante del cilindro interior. El torque opositor se convierte en el esfuerzo de corte ejercido por el flujo al cilindro interior.

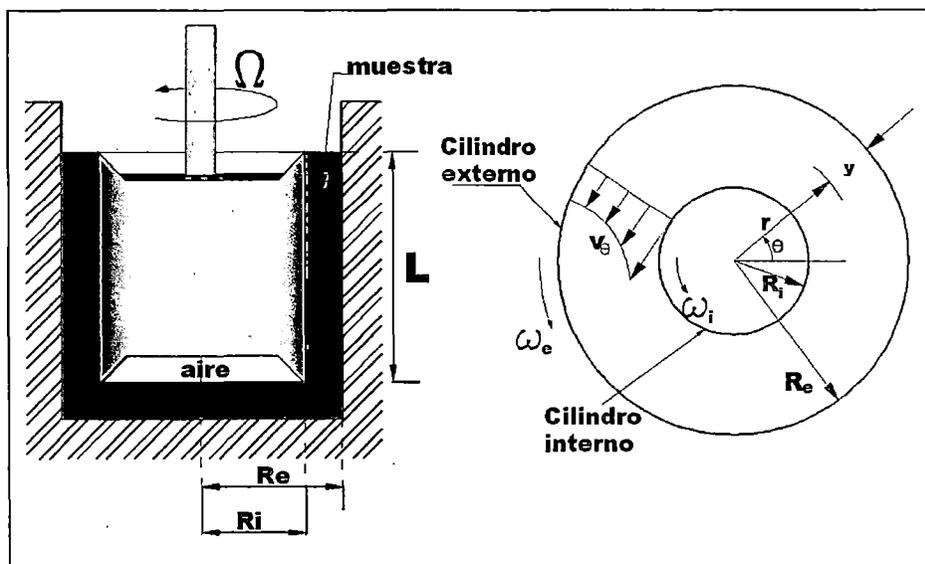


Figura 2. 2. Componentes de un Reómetro de Cilindros Concéntricos
Ref. Bib. [15]

Velocidad de Corte:

$$\dot{\gamma}_i = 2 \omega_i \frac{R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \quad \dots \text{ (Ec. 2. 1)}$$

Dónde:

R_i : Radio interior del equipo rotacional

R_e : Radio exterior del equipo rotacional

ω_i : Velocidad angular del cilindro interior (rad/s).

Esfuerzo de corte:

El esfuerzo de corte para el reómetro rotatorio de cilindros concéntricos, se obtiene de la interacción física entre el fluido y el cilindro interior. La fuerza (F) que ofrece oposición al flujo está en función del esfuerzo generado en la superficie del cilindro interior (τ_i) y la superficie lateral de contacto (A). Esta superficie está determinada por:

$$A = 2\pi \cdot R_i \cdot L \quad \dots \text{ (Ec. 2. 2)}$$

Se genera un momento (M) de resistencia con un brazo de longitud R_i .

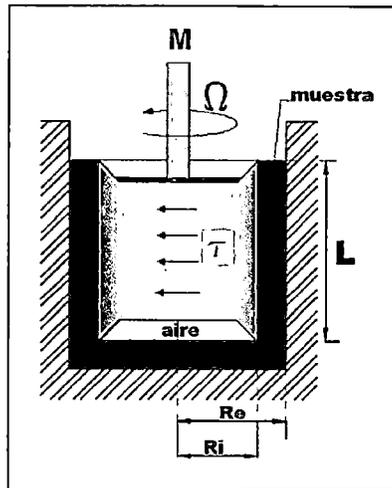


Figura 2. 3. Cilindro rotatorio
 Ref. Bib. [15]

Se tiene:

$$\tau_i = \frac{M}{2\pi \cdot L \cdot R_i^2} \quad \dots \text{ (Ec. 2. 3)}$$

2.1.3 Planeamiento y construcción del equipo experimental

La conceptualización de diseño del reómetro, se muestra a continuación:

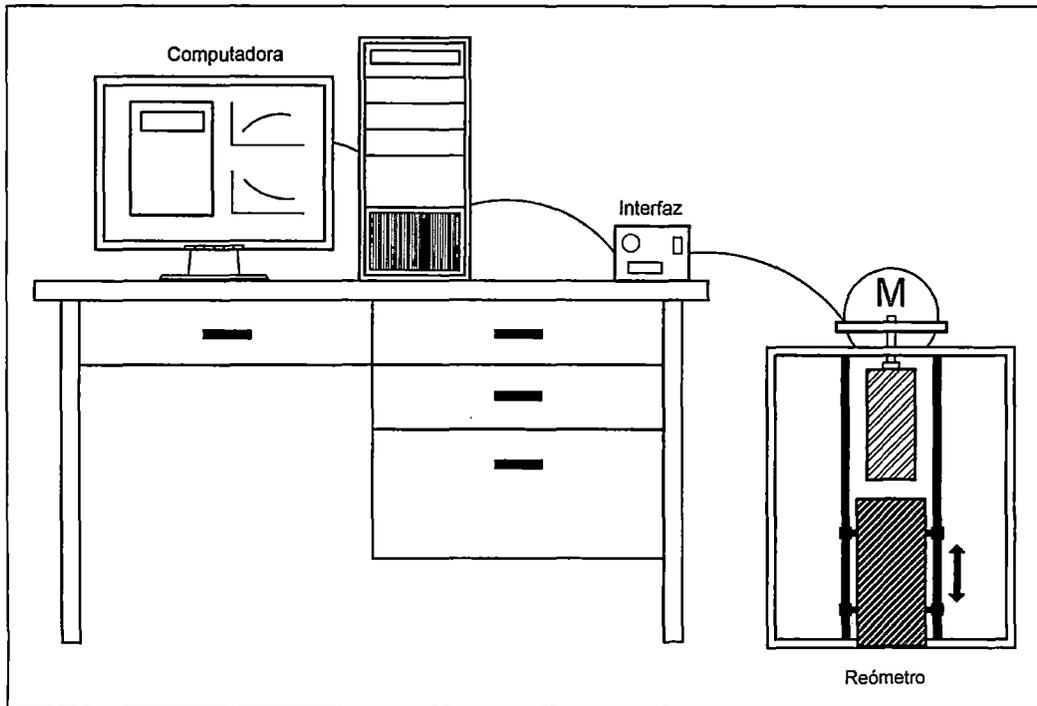


Figura 2. 4. Esquema de funcionamiento

Fuente: Elab. propia

Según se observa en el esquema (Figura 2.4), el equipo experimental, cuenta con tres componentes: una computadora personal (con software instalado del control de interfaz), un interfaz electrónico-mecánico y un equipo rotacional. A continuación se describe cada componente según el esquema de funcionamiento.

A. Computadora personal (software controlador)

Se considera un software controlador instalado en una computadora personal, que permita el ingreso de órdenes y lectura de resultados producto de la experimentación. Elaborado en un lenguaje de programación visual gráfico, como el labVIEW, este software se plantea con la siguiente secuencia de manejo:

- El ingreso manual de la velocidad de rotación (en revoluciones por minuto), acompañado de una gráfica velocidad vs. Tiempo que se genere a tiempo real

- Un control manual que genere y detenga el de giro del motor que acciona el reómetro.
- Luego alcanzar la velocidad deseada, se pueda dar inicio a la adquisición y almacenamiento de data relevante como: voltaje, intensidad, temperatura del flujo y velocidad de giro, esto a tiempo real.

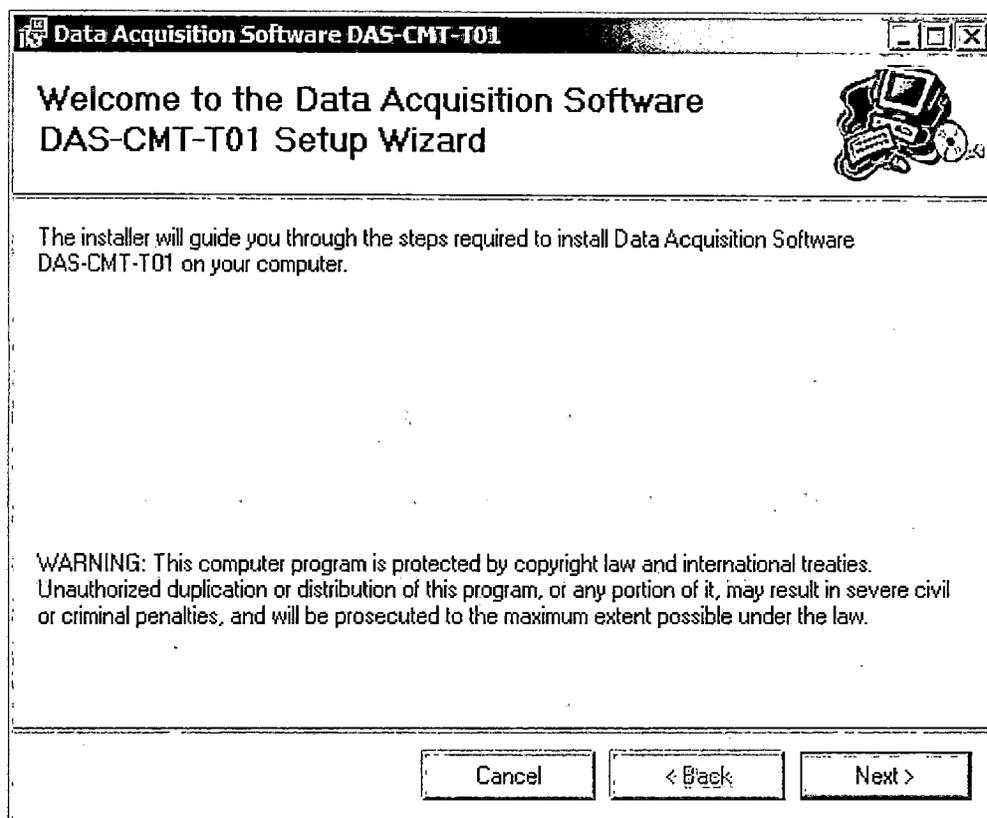
Los requisitos mínimos de sistema son los siguientes:

- Procesador Core i3 o superior (1.2 GHz de procesamiento).
- 4 GB. de memoria RAM DDR3.
- Sistema operativo Windows XP, Windows Vista, Windows 7 y Windows 8.1.

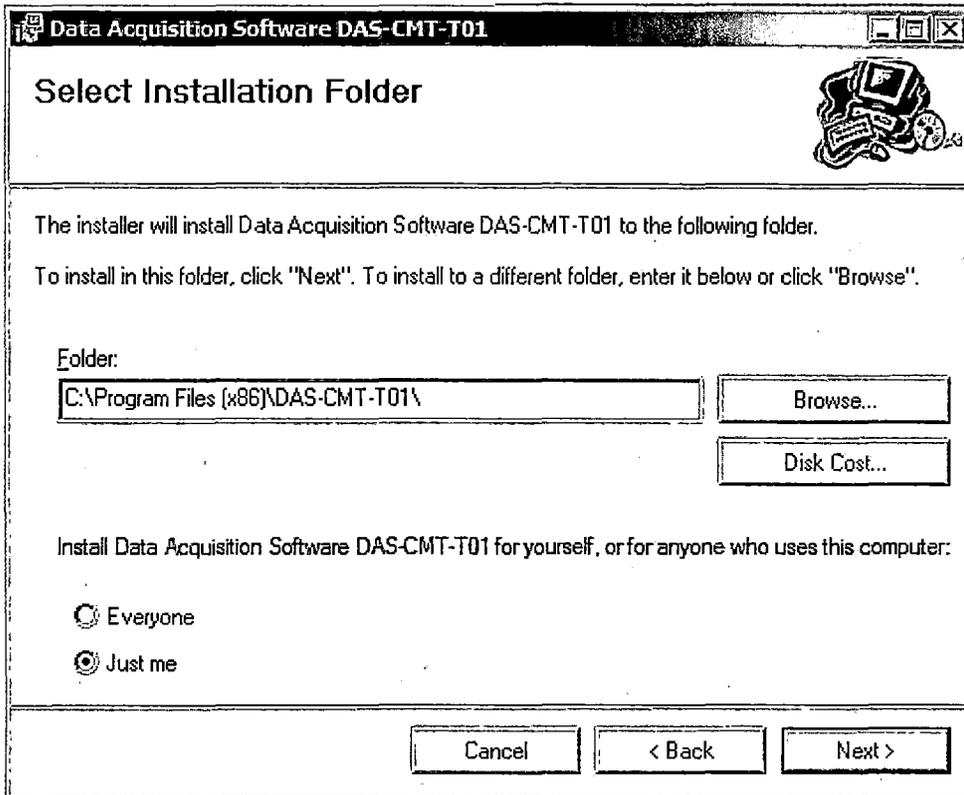
A.1. INSTALACIÓN DE SOFTWARE CONTROLADOR (DAS-CMT-T01)

Para la instalación del software controlador es necesario que el antivirus de su ordenador se encuentre desactivado y ejecutar en modo de administrador. La secuencia de instalación se describe a continuación.

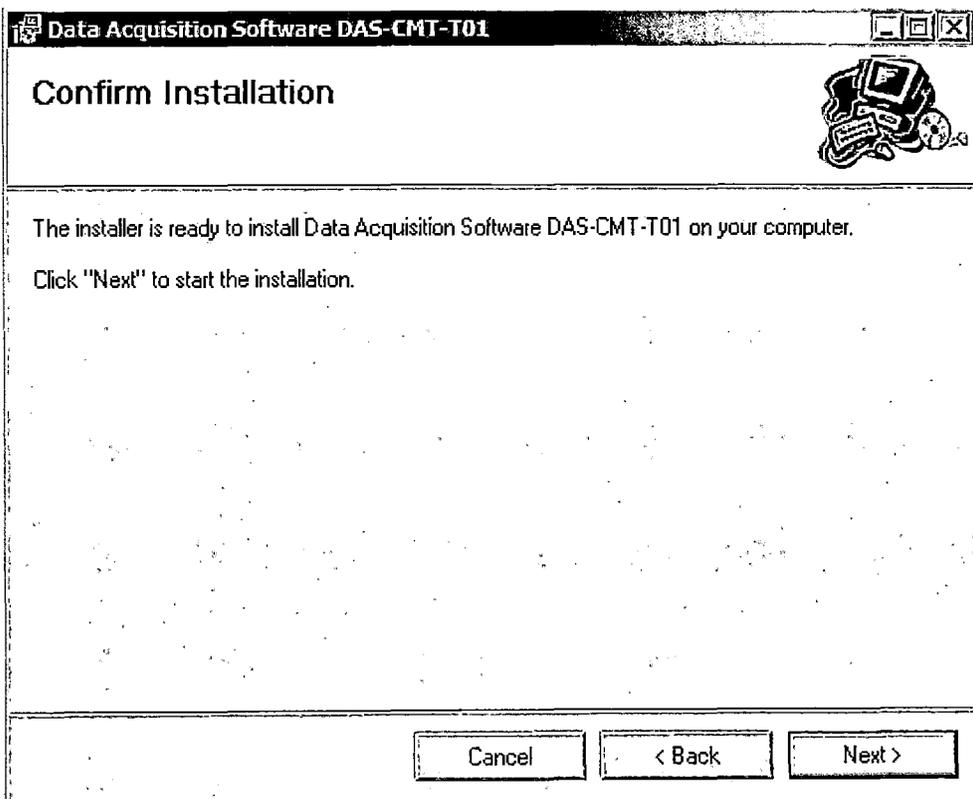
- Ubicar la carpeta DAS-Installer y correr el ejecutable Setup.Exe. A continuación aparece el siguiente cuadro de dialogo. Dar click a "Next":



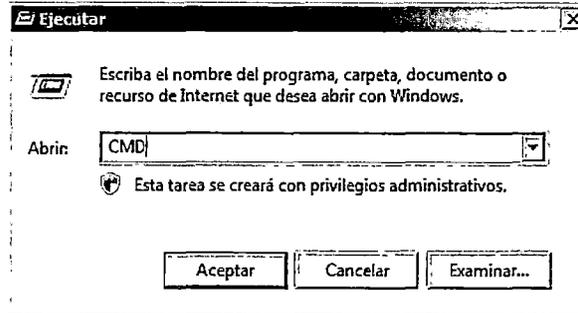
- En "Browse" elegir la carpeta de instalación del programa, elegir los permisos correspondientes. Dar click a "Next"



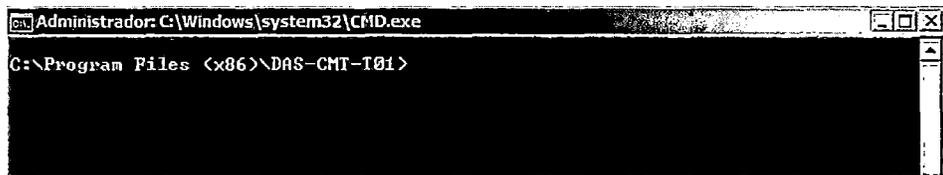
- Para confirmar la instalación dar click a "Next"



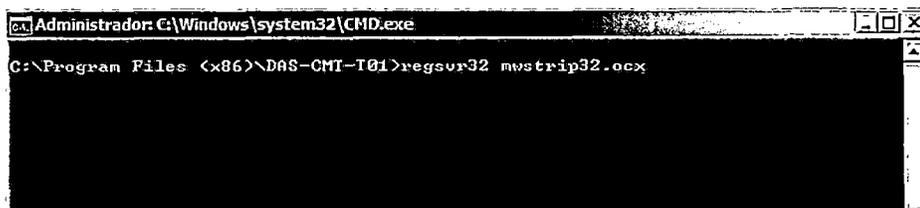
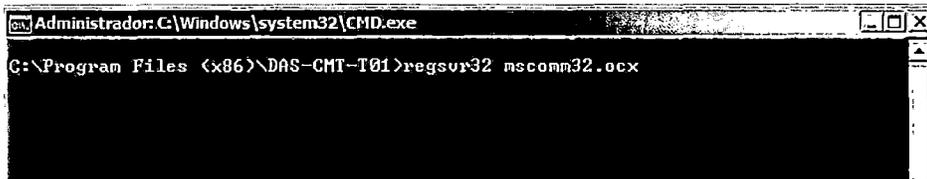
- Completa la instalación, para salir dar click a “close”
- Una vez completa la instalación, para registrar los componentes, activar el comando RUN (ejecutar) de Windows (WINDOWS+R) y ejecutar el comando CMD (command) que permite abrir la consola MS-DOS.



- Ubicar la carpeta de instalación en la consola MS-DOS.



- Registrar las librerías “mscomm32.ocx” y “mwstrip.ocx”. Con esto se finaliza la instalación.



- Luego ubicar en el escritorio (desktop) el icono de acceso directo al ejecutable.



- Al ejecutar el software instalado se tiene la siguiente presentación:

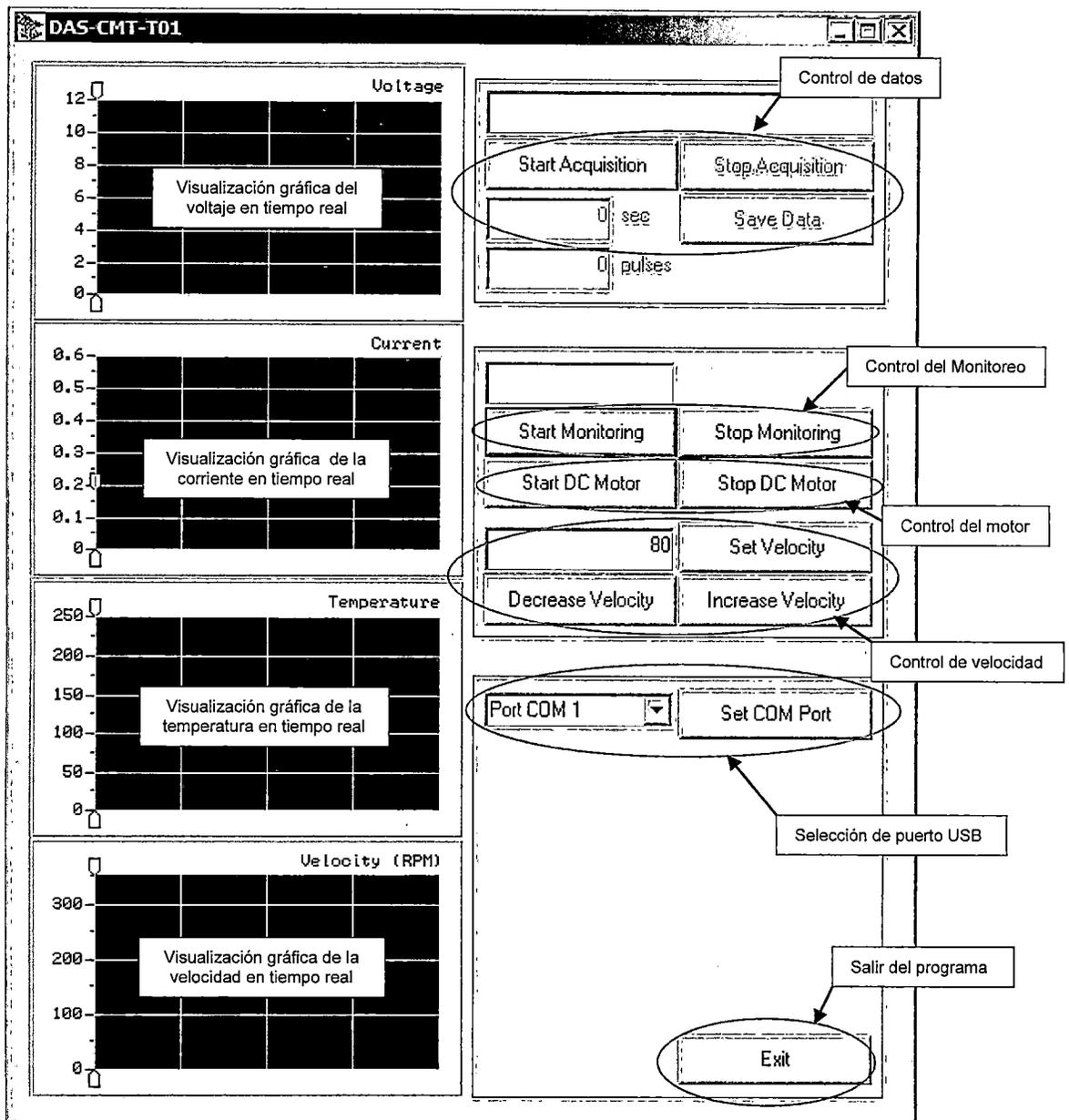


Figura 2. 5. Ventana de dialogo principal del programa

Fuente: Elab. propia

B. Interfaz electrónico-mecánico

Trata de la fabricación de un interfaz electrónico-mecánico para controlar datos de entrada y salida, procesar parcialmente la información obtenida y controlar sensorialmente actividades adicionales en el proceso de experimentación. La descripción del funcionamiento básico se detalla a continuación:

- Una tarjeta electrónica implementada con un microcontrolador programado que recibe y procesa órdenes a través de una conexión serial RS-232, que

resulta en un conjunto de actividades que originan una velocidad de giro controlado.

- Además, controle el incremento de tal velocidad de giro y para cada condición de análisis, registre y envíe al ordenador la data relevante, a tiempo real

Básicamente cuenta con los terminales sensoriales mostrados a continuación:

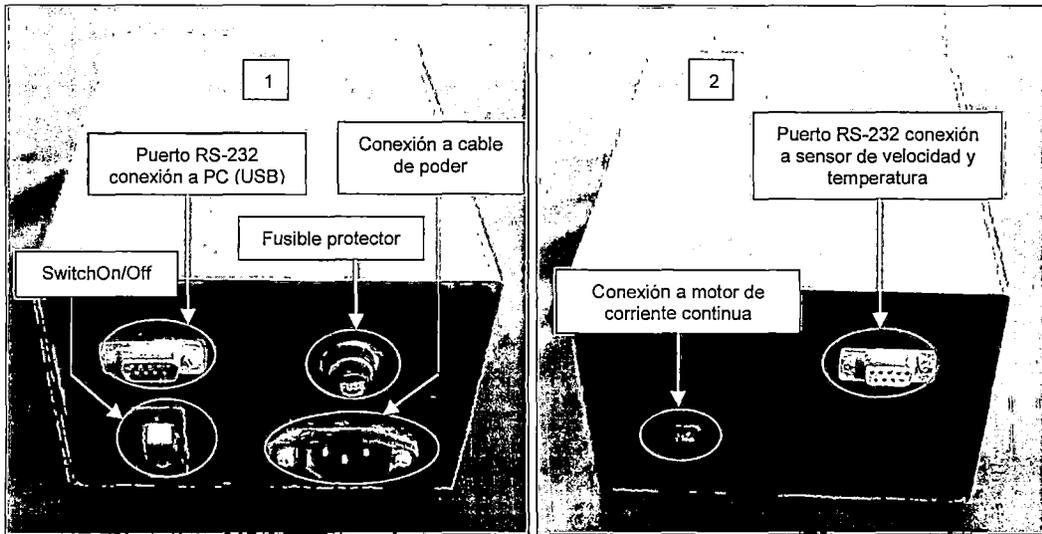


Figura 2. 6. Interfaz electrónico - mecánico. 1) Vista frontal. 2) Vista posterior.

Fuente: Elab. propia

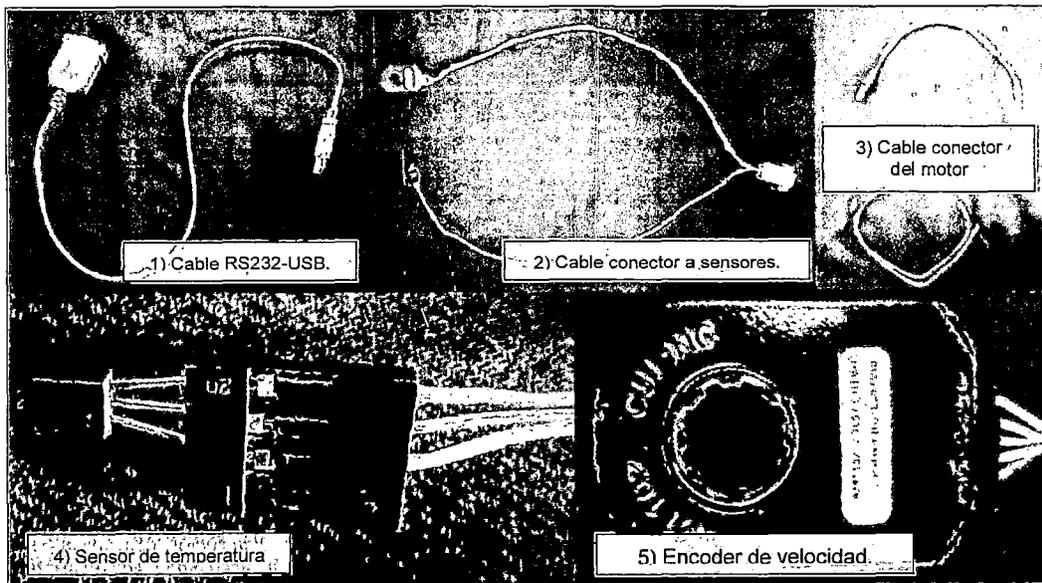


Figura 2. 7. Terminales del interfaz.

Fuente: Elab. propia

C. Equipo rotacional

Consta de tres partes: Un juego de cilindros concéntricos exterior e interior, una base y soporte mecánico, un motor de corriente continua y un encoder contador de rotación.

C.1. BASE METÁLICA Y DISCOS DE ROTACIÓN VARIABLE.

Esta parte del equipo instrumental es la que sirve de soporte para los cilindros rotatorios, motor eléctrico de rotación, encoder de velocidad y para los discos de variación de velocidad (Figura 2.8). La base del equipamiento mecánico comprende un armazón metálico paralelepédico construido para contener y posibilitar las adaptaciones necesarias que generen la gama de velocidades de giro requeridas en el cilindro interior.

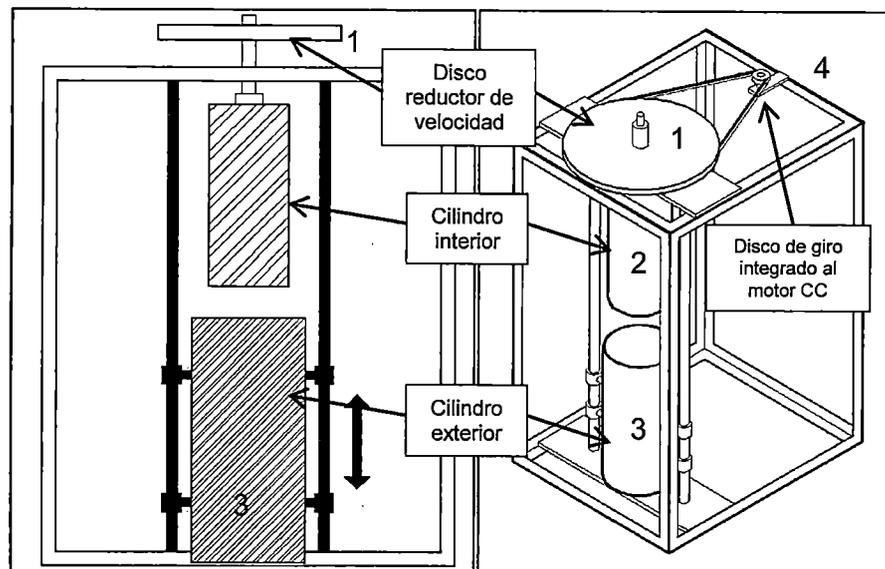


Figura 2. 8. Esquema de base y soporte mecánico del equipo rotacional

Fuente: Elab. propia

El disco de mayor diámetro (1) tiene la finalidad de reducir en un número de veces el giro originado en el eje del motor (4), y de esta manera lograr velocidades de rotación reducidas. Para experimentar en flujos hiperconcentrados se requieren velocidades de rotación menores a 30 r.p.m.

El cilindro interior se integra a esta base de manera permanente, para no variar las condiciones iniciales de operación asociados al montaje y desmontaje del mismo.

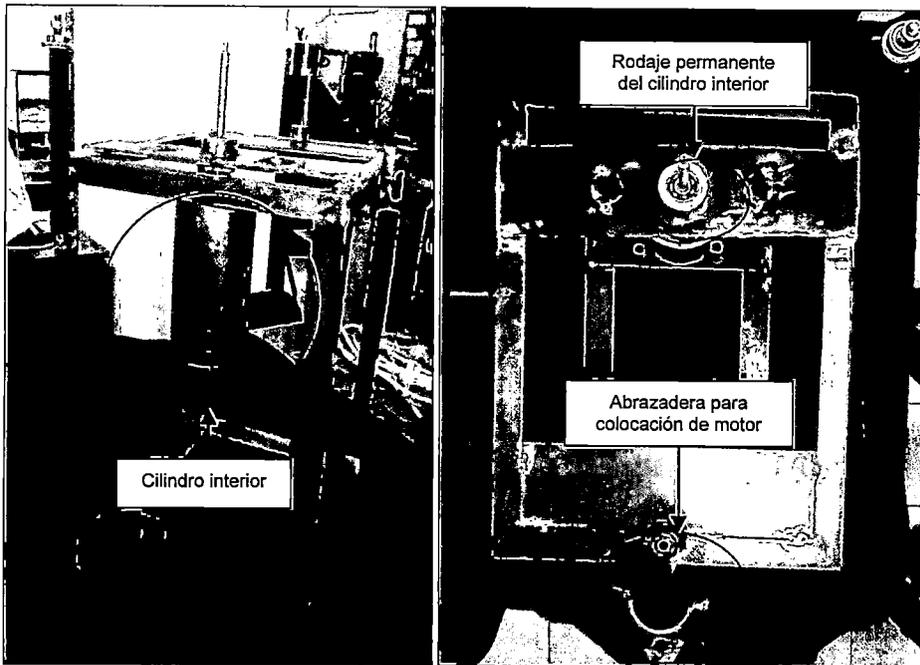


Figura 2. 9. Base metálica y cilindro interior.

Fuente: Elab. propia

C.2. DISCOS DE ROTACION VARIABLE

La finalidad de los discos es generar una gama de velocidades de rotación útiles para la experimentación (Figura 2.10). Mediante combinaciones adecuadas y conectados a través de fajas elásticas, estos discos transfieren la rotación generada por el motor hacia el cilindro interior, con velocidades de rotación reducidas en comparación a la rotación original del motor.

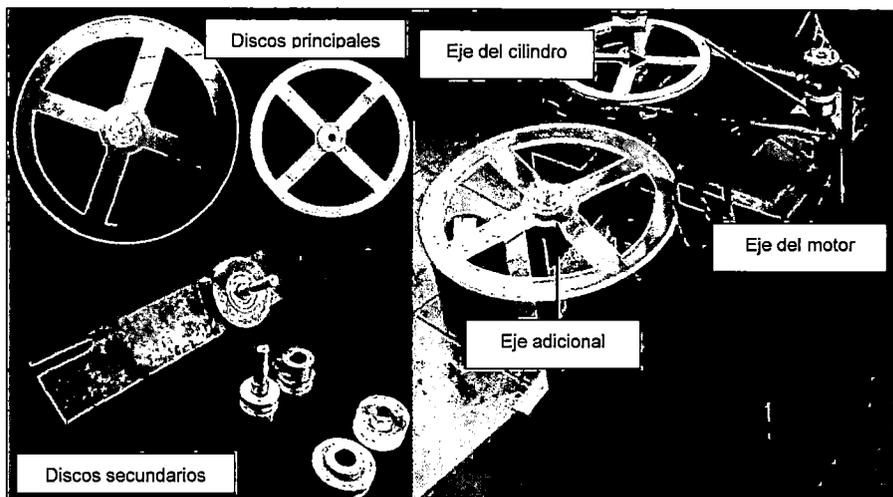


Figura 2. 10. Disposición de los discos en el equipo rotatorio.

Fuente: Elab. propia

C.3. CILINDROS CONCÉNTRICOS INTERIOR Y EXTERIOR

El cilindro interior del equipo (Figura 2.11), es un accesorio rotatorio diseñado con el fin de interactuar con el fluido. Es metálico, vacío y con un recubrimiento protector que mitigue el desgaste y rayaduras en el cilindro, para evitar la distorsión de los resultados experimentales.

El espesor del cilindro interior debe ser mínimo (1 mm. o menos), pues se requiere que este sea ligero para generar velocidades de rotación con el mínimo de potencia eléctrica requerida, y de esta manera tener un mayor rango de aplicación en experimentación con fluidos altamente viscosos. Sus dimensiones son:

Cuadro 2. 2. Dimensiones del cilindro interior.

Descripción	Diámetro efectivo (cm.)	Altura (cm.)
Cilindro interior	8.79	18.00

Fuente: Elab. propia

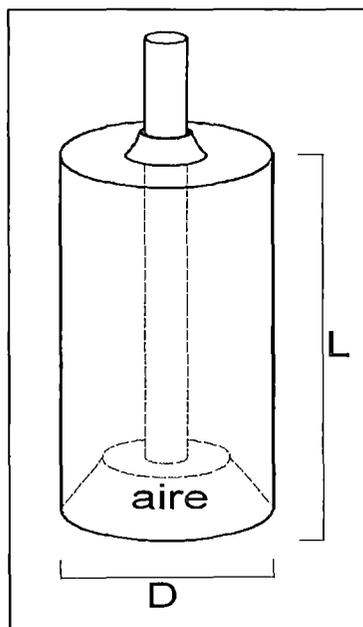


Figura 2. 11. Esquema del cilindro interior
Fuente: Elab. propia

Dónde:

L: altura del cilindro interior.

D: diámetro del cilindro interior.

Se recomienda una tapa tronco-cónica ubicada en la cara inferior del cilindro, para atrapar una burbuja de aire, que evite la interacción con la mezcla fluida en esta zona, que puede generar fricción entre la base del cilindro y el fluido cuando este es sometido a experimentación.

La tapa superior, debe fabricarse de un espesor mayor, pues se necesita una adherencia rígida al eje de giro.

El cilindro exterior es un accesorio metálico que consta de un cilíndrico hueco en un lado, utilizado como recipiente del fluido sometido a experimentación. Su interior debe ser liso para reducir factores que distorsionen la naturaleza del experimento (Figura 2.12).

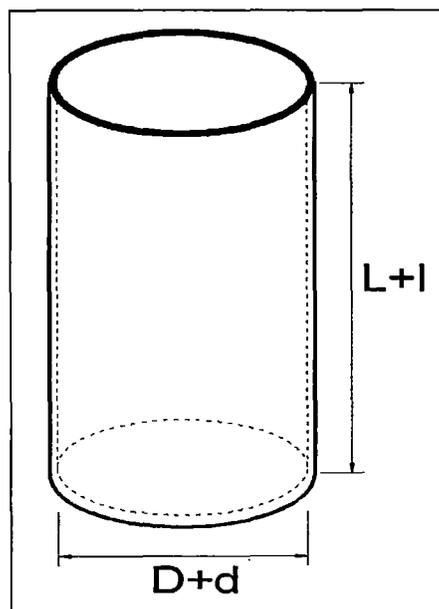


Figura 2. 12. Esquema de cilindro exterior.
Fuente: Elab. propia

Dónde:

L+I: altura del cilindro exterior. **L** es la altura que mide el cilindro interior y **I** es la altura mínima de operación (como mínimo 3 cm.).

D+d: diámetro del cilindro exterior. **D** es el diámetro del cilindro interior y **d** es el espaciamiento mínimo de operación (entre 2 y 5 mm.).

Este cilindro es conectado a la base del equipo rotatorio mediante barras verticales que le permiten ascender y descender (Figura 2.13). Además permite

una colocación concéntrica con el eje del cilindro interior y proporciona rigidez al sistema en su conjunto. Con un radio mayor en 0.5 cm. respecto al radio del cilindro interior, para contener en condiciones cuasi estacionarias el fluido sometido a flujo en la experimentación.

Para lograr un fácil manejo del fluido de experimentación, este cilindro tiene la posibilidad de ascender y descender en forma concéntrica al cilindro interior, a través de dos barras verticales desmontables.

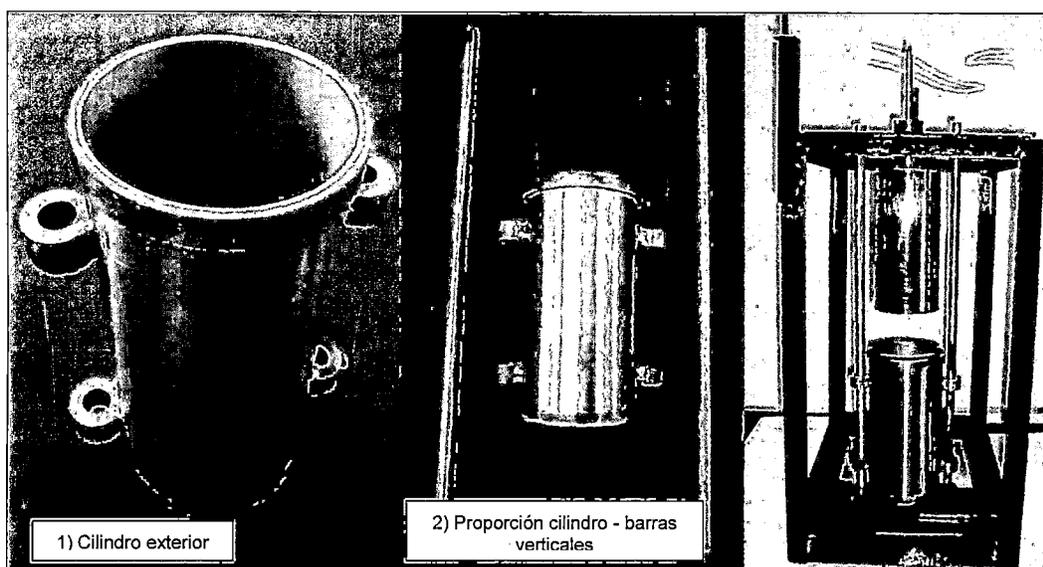


Figura 2. 13. Disposición de cilindro exterior en el equipo rotatorio
 Fuente: Elab. propia

Sus dimensiones son:

Cuadro 2. 3. Dimensiones del cilindro Exterior.

Descripción	Diámetro efectivo (cm.)	Altura (cm.)
Cilindro exterior	9.38	20.35

Fuente: Elab. propia

C.4. MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

El motor de rotación (véase especificaciones en anexo A.5.1), debe la suplir la demanda del esfuerzo que provoca la interacción del cilindro con la mezcla fluida y que la misma signifique un consumo considerable de su potencia máxima, esto para obtener la sensibilidad requerida.

La velocidad de rotación del motor se controla por combinación del aumento o disminución del voltaje y amperaje regulados por el interfaz electrónico-mecánico.

Sus requerimientos son:

- En revoluciones bajas, un movimiento rotacional constante, sin saltos en el eje de rotación.
- El motor debe tender a desarrollar la misma velocidad de rotación, cuando la resistencia ofrecida por el sistema eje-cilindro se incremente por interacción con el fluido. Cabe señalar que el control de la velocidad será realizado por un encoder dispuesto en el eje de giro a fin de estabilizar el giro a la velocidad de rotación especificada.

El objetivo de la rotación controlada es obtener una lectura de la potencia utilizada por el motor en giro libre y en giro sumergido. Luego mediante una resta aritmética, obtener la resistencia que ofrece el flujo al movimiento (en watts), para así calcular el esfuerzo de corte generado por el flujo hiperconcentrado.

El motor elegido es de corriente continua de 12 voltios y 2 amperios, que originalmente cuenta con una velocidad de giro en el rango de 4200 revoluciones por minuto (RPM).

A través de una caja de engranajes reductores de velocidad, este motor produce un giro efectivo de 420 RPM. Algunas características se muestran a continuación:

Cuadro 2. 4. Características del motor.

Descripción	Medida
Voltaje Nominal (Voltios)	12
Potencia de salida (watts)	7.0
Velocidad sin carga después de reductor (RPM)	420
Velocidad de operación después de reductor (RPM)	365
Torque medido después de reductor (kg-cm)	1.5

Fuente: Elab. propia

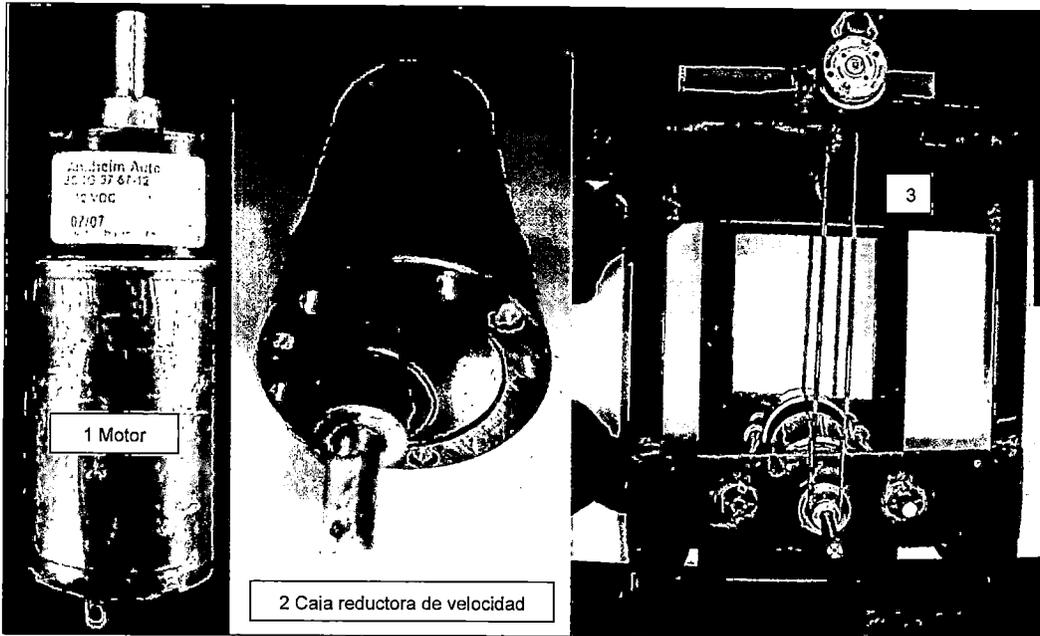


Figura 2. 14. Disposición del motor en el equipo rotatorio.
Fuente: Elab. propia

2.1.4 Secuencia de experimentación

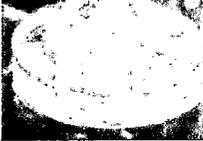
Se plantea la siguiente secuencia de experimentación:

- a. Posicionar los cilindros concéntricos e ingresar la mezcla fluida en el espacio anular entre los mismos.
- b. Por medio de un ordenador, equipado con el software controlador, ordenar una velocidad de giro, que ejecuta el motor eléctrico, que es controlado y monitoreado por el interfaz.
- c. Sensorialmente, el interfaz genera, monitorea y regula la acción mecánica de rotación, de acuerdo a los requerimientos de potencia eléctrica. Se emiten los resultados hacia el ordenador que se muestran a tiempo real.
- d. Cuando los datos resultantes del experimento se estabilizan, se procede a almacenar la data relevante (voltaje, amperaje, velocidad de rotación y temperatura de la mezcla fluida).
- e. Luego de almacenar información suficiente, repetir el proceso desde el paso b, con una orden de velocidad diferente.

2.1.5 Configuraciones de rotación

Para cubrir toda la gama de velocidades de rotación necesarias para caracterizar reológicamente un flujo hiperconcentrado, y debido a las limitaciones en la reducción de la velocidad del motor eléctrico, se definen configuraciones de rotación que involucra la utilización de discos reductores de velocidad, funcionando de manera combinada y por separado.

Cuadro 2. 5 Discos reductores de velocidad

ID	CÓD	IMAGEN	DESCRIPCIÓN	ϕ_{exterior} (cm)	ϕ_{efectivo} (cm)
1	M		Disco único instalado coaxialmente en el eje del motor, para estabilizar y absorber el esfuerzo de tensión ejercido al eje del motor.	2.08	1.36
2	DCC		Disco instalado en el eje del cilindro interior, cuya finalidad es la de posibilitar un rango de altas velocidades en la experimentación (75 – 150 rpm.)	2.02	1.48
3	PG		Disco grande instalado en el eje adicional, cuya finalidad es la de ampliar la gama de velocidades bajas de experimentación (05 – 50 rpm.)	30.00	29.75
4	PM		Disco mediano instalado en el eje adicional, cuya finalidad es la de ampliar la gama de velocidades intermedias de experimentación (15 – 75 rpm.)	4.60	4.35
5	PC		Disco pequeño instalado el eje adicional, cuya finalidad es la de ampliar la gama de velocidades altas de experimentación (50 – 125 rpm.)	2.05	1.75
6	DGC		Disco instalado en el eje del cilindro interior, cuya finalidad es la de posibilitar una gama de velocidades medias (15 – 30 rpm.)	20.80	20.50

Fuente: Elab. propia

De la combinación de estos discos, se han definido configuraciones de rotación y sus coberturas de velocidad de rotación generada, presentados a continuación en el Cuadro 2. 6:

Cuadro 2. 6 Configuraciones de velocidad y velocidades de rotación

VELOCIDADES DE ROTACIÓN (RPM)	CONFIGURACIONES DE ROTACIÓN				
	M_PC/PG_DCC	M_DGC	M_PG/PM_DCC	M_PM/PC_DCC	M_DCC
5	x				
6	x				
7	x				
8	x				
9	x				
10	x				
12	x				
15	x	x	x		
18	x	x	x		
20	x	x	x		
25		x	x		
30		x	x		
50				x	
75				x	x
100				x	x
125				x	x
150					x

Fuente: Elab. propia

La (X), marca la posibilidad de ejecutar la experimentación en la configuración de rotación y velocidad de rotación indicada.

2.2 CALIBRACION DEL EQUIPO INSTRUMENTAL

2.2.1 Potencia consumida por el equipo rotatorio de medición reológica

En el proceso de experimentación, parte de potencia eléctrica generada por el motor de corriente continua, es consumida en sí por el equipo rotatorio de medición reológica, para accionar y mantener el giro de todas las configuraciones de rotación, además de un consumo necesario para vencer la inercia y lograr la rotación del cilindro interior.

Este consumo de potencia eléctrica utilizada por el sistema en giro libre (sin contacto con ninguna mezcla fluida), es el mismo para cualquier proceso de experimentación en el que no se hayan modificado las condiciones iniciales de experimentación y como tal, debe ser descontado al calcular la potencia consumida producto de la rotación del cilindro interior sumergido en la mezcla a ensayar, pues en ese caso, el interés se centra en la obtención de la potencia

eléctrica consumida por la resistencia a fluir de la sustancia, a una velocidad controlada.

Como parte del proceso de calibración del equipo reométrico de medición reológica, se ha calculado la potencia eléctrica consumida para generar rotación en “giro libre”, a diversas velocidades controladas y bajo diferentes configuraciones, cuyos resultados en potencia eléctrica se muestran a continuación (Cuadro 2. 7):

Cuadro 2. 7 Consumos de potencia eléctrica en giro libre.

ID	VELOCIDADES DE ROTACIÓN (RPM)	CONFIGURACIONES DE ROTACIÓN				
		M_PC/PG_DCC	M_DGC	M_PG/PM_DCC	M_PM/PC_DCC	M_DCC
		POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)				
1	5	0.366				
2	6	0.434				
3	7	0.586				
4	8	0.633				
5	9	0.824				
6	10	1.033				
7	12	1.329				
8	15	1.982	0.915	0.579		
9	18	2.555	1.175	0.724		
10	20	3.444	1.438	0.897		
11	25		2.058	1.286		
12	30		2.762	1.710		
13	50				2.356	
14	75				3.811	0.753
15	100				5.371	1.124
16	125				6.859	1.567
17	150					2.129

Fuente: Elab. propia

2.2.2 Obtención de la eficiencia del motor eléctrico

El motor de corriente continua, utilizado como parte del equipo rotacional, es esencialmente un convertidor de energía eléctrica en mecánica, con un alto consumo de la energía eléctrica generada en el proceso.

Cuando el motor eléctrico entra en funcionamiento, el estator se alimenta de la red eléctrica y absorbe una potencia inicial:

$$P_E = V \cdot I \quad \dots \text{(Ec. 2. 4)}$$

Dónde:

P_E :Potencia eléctrica inicial producida (Watts)

V :Voltaje inicial (Voltios)

I :Intensidad inicial (Amperios)

Parte de la potencia inicial se consume (disipa) en la resistencia R del devanado (bobinado) del estator, ocasionando la primera pérdida eléctrica (ΔP_r), luego se produce una pérdida magnética en el campo del estator (ΔP_m). Además, está la pérdida por la disipación de potencia en cubrir pérdidas eléctricas del rotor (ΔP_e).

Adicionalmente, de acuerdo a la configuración del motor de corriente continua, existen pérdidas mecánicas por rozamiento en las escobillas reductoras de velocidad (ΔP_{fric}) y pérdidas propias del movimiento rotatorio para vencer su inercia inicial (ΔP_{adic}).

Finalmente, se obtiene una potencia mecánica efectiva (P_M) restando de la potencia eléctrica producida, las pérdidas en el proceso de generación del movimiento rotatorio:

$$P_M = P_E - \Delta P_r - \Delta P_m - \Delta P_e - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic} \quad \dots \text{ (Ec. 2. 5)}$$

La potencia mecánica resultante entonces, puede entenderse como un porcentaje de la potencia eléctrica generada, a lo que se denomina eficiencia de un motor (η_{motor}). La eficiencia se define:

$$\eta_{motor} = \frac{P_M}{P_E} \quad \dots \text{ (Ec. 2. 6)}$$

Dado que la implementación del software controlador para el proceso de experimentación permite una lectura directa del consumo de voltaje y amperaje involucrado en el proceso de generación del movimiento a una velocidad controlada, la obtención de la potencia eléctrica total consumida, en condiciones controladas de rotación, se obtiene de la multiplicación de ambos parámetros (Ec. 2.6).

Para definir la eficiencia del motor eléctrico, es necesario conocer la potencia mecánica involucrada en el proceso (asociado al mismo evento de generación de potencia eléctrica). En tal sentido, es necesario implementar un sistema físico

que proporcione de manera sencilla un valor comparable de potencia mecánica. A continuación se plantea el sistema físico para obtener la potencia mecánica asociada a un evento de rotación del motor de corriente continua:

- Ubicar e instalar el equipo rotatorio de medición reológica donde se opere con facilidad.
- Realizar pruebas de rotación en el equipo y calcular los consumos promedio de potencia eléctrica en giro libre (giro del cilindro interior sin rozamiento externo al sistema) para cada velocidad de rotación deseada, con la finalidad de detectar únicamente la potencia consumida por agentes externos al equipo rotatorio.
- Instalar un sistema de polea simple (una sola polea), con un peso normado a un extremo y sujeto al cilindro interior en el otro que permita realizar el levantamiento de la masa mediante la rotación del cilindro a velocidad controlada y de esta manera lograr el ascenso del cuerpo (Figura 2.15).
- Realizar este proceso para todas las velocidades de giro y configuraciones del equipo rotatorio necesarias que permitan un valor comparativo de la eficiencia en cada situación de experimentación.

La obtención de la eficiencia del motor en cada configuración y velocidad controlada del equipo rotatorio (Ec. 2.6), obedece al siguiente desarrollo:

$$\eta_{motor} = \frac{P_M}{P_E} = \frac{F.V_e}{V_p.I_p} \quad \dots \quad (\text{Ec. 2. 7})$$

Dónde:

P_M :Potencia mecánica efectiva promedio obtenida en el proceso de rotación

P_E :Potencia eléctrica promedio producida en el proceso de rotación

V_p :Voltaje promedio del proceso de rotación

I_p :Intensidad promedio del proceso de rotación

V_e :Velocidad controlada en el proceso de rotación

F : Fuerza necesaria para elevar la masa normada a una velocidad de ascenso controlada

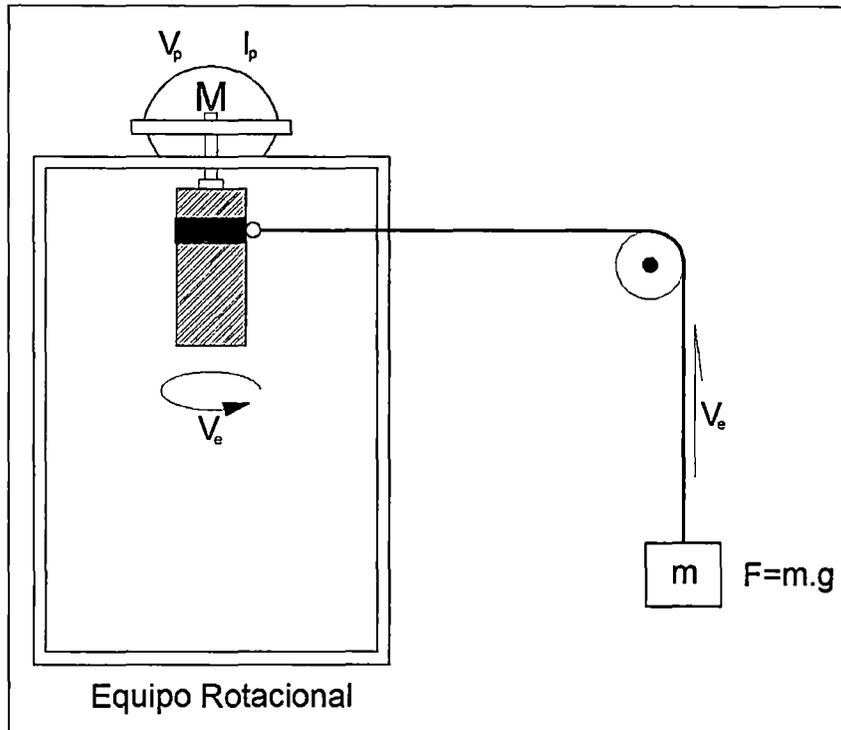


Figura 2. 15. Esquema de sistema polea-equipos rotatorio para determinar la eficiencia del motor eléctrico.

Fuente: Elab. propia

Como parte del proceso de calibración del equipo reométrico de medición reológica, se ha calculado la eficiencia del motor eléctrico para generar rotación a diversas velocidades controladas y bajo diferentes configuraciones, cuyos resultados se muestran a continuación (Cuadro 2.8):

Cuadro 2. 8 Resultados de la eficiencia.

CONFIGURACION DE ROTACIÓN	EFICIENCIA
M_PC/PG_DCC	0.320
M_DGC	0.575
M_PG/PM_DCC	0.533
M_PM/PC_DCC	0.550
M_DCC	0.383

Fuente: Elab. propia

CAPITULO III: MANUAL DE OPERACIONES

3.1 ASPECTOS PRELIMINARES.

Este capítulo trata de los requisitos generales y principios básicos que permitan el funcionamiento del equipo rotacional de medición reológica de un modo eficaz y seguro, además del desarrollo de las actividades complementarias al proceso de medición, selección, manejo y preparación de las muestras sometidas a experimentación de una forma adecuada.

3.1.1 Advertencias y precauciones

La preparación de muestras, así como el proceso de experimentación reológica en flujos hiperconcentrados, implica un protocolo de seguridad en salvaguarda de la integridad y salud del encargado. Al respecto se describen los procesos principales y las precauciones a tener en cada parte del proceso.

Recepción de la muestra: Dependiendo del contenido de humedad de la muestra, la misma debe ser almacenada en un envase plástico hermético que permita conservar sus condiciones iniciales. Los implementos de seguridad a utilizar son guantes de goma y un mandil de laboratorio.

Secado de muestra: Se debe realizar en un horno de laboratorio, ingresando la muestra en un envase adecuado que permita la pérdida rápida del contenido de humedad (por ejemplo una fuente plana resistente al calor). El horno debe estar ubicado en una instalación ventilada o abierta, pues en muchos casos, el vapor emanado por la muestra puede presentar toxicidad y contaminar ambientes cerrados. Los implementos de seguridad a utilizar al ingreso y retiro de las muestras en el horno son guantes para horno industrial, mandil de laboratorio, mascarillas de seguridad industrial acondicionadas con filtros para partículas y lentes de seguridad.

Preparación de la muestra: Una vez seca, la muestra debe ser molida en una instalación cerrada o aislada, pues la volatilidad del polvo seco puede afectar instalaciones cercanas. Los implementos de seguridad a utilizar son guantes quirúrgicos, mandil de laboratorio, mascarillas de seguridad industrial y lentes de seguridad.

Preparación del fluido: Con el material sólido molido se procede a preparar muestras a distintas concentraciones (concentración en volumen). En esta etapa se debe tener especial cuidado con la volatilidad de la muestra seca. Los implementos de seguridad a utilizar son guantes quirúrgicos, mandil de laboratorio, mascarillas de seguridad industrial y lentes de seguridad.

Fase de experimentación: En la fase de experimentación se debe tener cuidado en aislar la muestra de la implementación electrónica del equipo reométrico. Los implementos de seguridad a utilizar son guantes quirúrgicos, mandil de laboratorio, mascarillas de seguridad industrial y lentes de seguridad.

3.2 INSTALACIONES BÁSICAS.

Para el desarrollo de las actividades relacionadas con la experimentación de flujos hiperconcentrados (relaves mineros), las instalaciones deben tener ciertos requisitos y contar con instrumentación básica similares a las de un laboratorio con características descritas a continuación:

3.2.1 Requisitos mínimos de las instalaciones

Ventilación. La ventilación de las instalaciones puede ser de carácter natural o artificial, debiendo evitarse la formación de corrientes de aire que puedan afectar al material en estudio (por su alta volatilidad), o al encargado de la experimentación. Cualquiera que sea el sistema de ventilación, es necesario disponer de extinguidores en caso de incendio.

Iluminación. La iluminación de las instalaciones debe ser adecuada y conveniente en relación con la ubicación del equipo de medición reométrica. Si es de carácter natural, debe evitarse que los rayos solares formen reflejos molestos o alteren la temperatura del laboratorio (la temperatura es muy importante en procesos reométricos). Si es de carácter artificial, es recomendable polarizar las entradas de luz y debe tomarse en cuenta que la luz de las bombillas no debe ser directa y debe formar un ángulo de iluminación.

Instalaciones de agua y desagüe. Se debe contar con conexiones de agua potable y desagüe, para poder realizar todas las actividades dependientes de

estos servicios. Se incluye entre estas la preparación de las muestras, su experimentación y la limpieza de las instalaciones luego del proceso.

Instalaciones eléctricas. Se debe considerar la accesibilidad hacia los tomacorrientes y que estos estén fuera de los lugares de paso. Como mínimo se debe disponer de tres tomacorrientes para la instalación del equipo reométrico y periféricos.

Almacenamiento. Se debe considerar dentro de las instalaciones la ubicación de un almacén de muestras para antes y después de la experimentación.

3.2.2 Equipamiento auxiliar

Para la preparación de las muestra de fluido hiperconcentrado y posterior experimentación, requiere la implementación de recursos básicos que posibiliten estas actividades.

Horno eléctrico. En general, las muestras en estado original, presentan una alta humedad que imposibilitan su molienda. Además, en ese estado no es posible agregar cantidades controladas de agua que caractericen su concentración (en volumen o en peso). En tal sentido, se hace indispensable la utilización de un horno eléctrico para el secado de la muestra.



Figura 3. 1.Horno eléctrico de laboratorio.

Fuente: Elab. propia

Mesa de trabajo. Se debe instalar una mesa de trabajo de material resistente de acero inoxidable o material laminado, donde se pueda realizar la molienda de la muestra

Juego de tamices granulométricos. Con la finalidad de definir la granulometría de la muestra seca que irá a combinarse con agua para formar el fluido hiperconcentrado, se debe realizar el ensayo granulométrico según Norma ASTM C 136.

Balanza electrónica. La balanza electrónica, debe tener una aproximación mínima al décimo de gramo y soportar un peso máximo de 6 Kg. para poder realizar la preparación de las muestras a experimentar.

Otros. Está referido a la utilización de probetas, pipetas, recipientes, guantes quirúrgicos, desarmadores, alicates, llaves Stillson, llaves hexagonales, envases plásticos e implementos de seguridad adecuados.

3.3 PROCEDIMIENTO DE EXPERIMENTACIÓN.

3.3.1 Instalación del equipo reométrico.

La instalación del equipo reométrico, consta de las siguientes etapas:

Etapa 01. Instalación del software controlador (DAS-CMT-T01) del reómetro en un ordenador que cumpla con los requisitos mínimos de sistema según lo indica el ítem 2.1.3.1. Una vez realizada la instalación, conectar el cable USB que permita el reconocimiento del mismo por parte del ordenador.

Etapa 02. Conectar los terminales al interfaz electrónico mecánico como son:

- Cable USB - RS232 (hembra) que conecta el ordenador con el interfaz.
- Cable RS232 (macho) que conecta al interfaz con los terminales sensoriales de velocidad y temperatura.
- Cable de poder para alimentar de energía eléctrica al interfaz.
- Cable conector al motor de corriente continua.

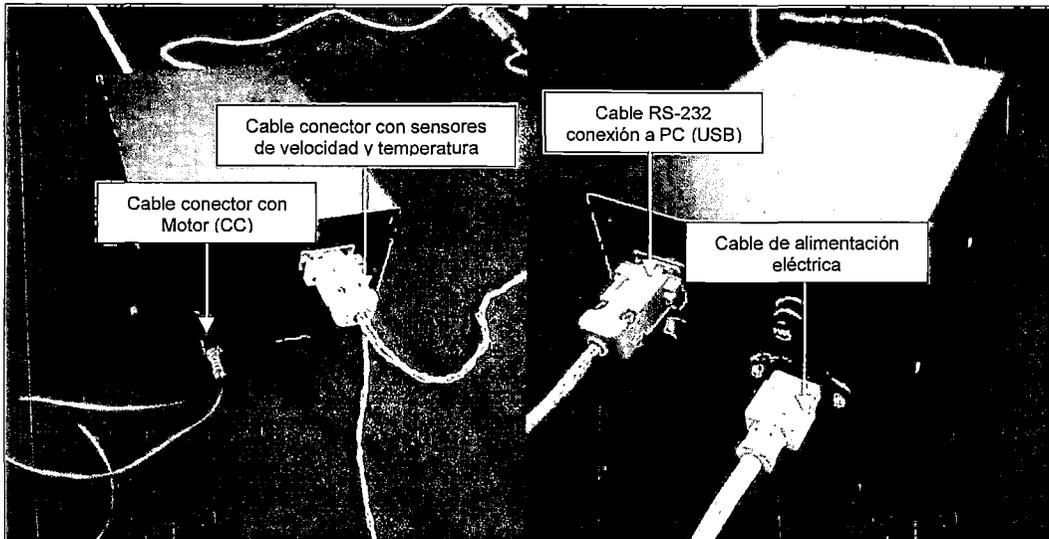


Figura 3. 2. Conexión a terminales al interfaz electrónico - mecánico.

Fuente: Elab. propia

- Etapa 03. Implementar la base del equipo mecánico, con los cilindros (interior y exterior), los discos de rotación (según la configuración deseada), el motor de corriente continua y el sensor de velocidad. Una vez realizada la implementación, proceder a conectar los terminales del motor de corriente continua.

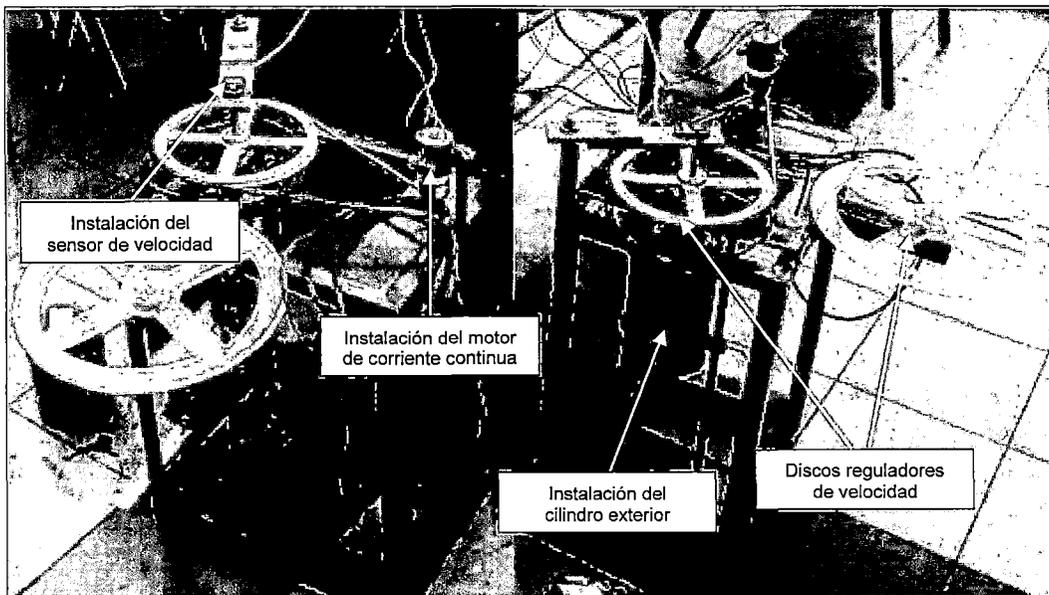


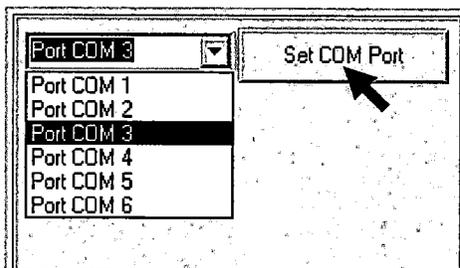
Figura 3. 3. Implementación de equipo mecánico.

Fuente: Elab. propia

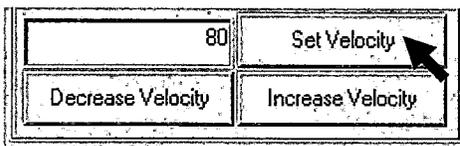
3.3.2 Procedimiento para el registro de datos.

Según procedimiento, seguir la siguiente secuencia:

- a) Instalado el equipo reométrico y conectados los terminales, encender el interruptor del interfaz e iniciar el programa DAS-CMT-T01.
- b) Indicar en la pantalla el número de puerto USB de conexión interfaz-ordenador. Luego presionar el botón “set COM Port”



- c) Digitar el valor de la velocidad de experimentación en el recuadro correspondiente. Luego presionar “Set Velocity”. Posteriormente, cuando el cilindro interior se encuentre girando, se puede incrementar o reducir la velocidad de rotación, presionando “Increase Velocity” o “Decrease Velocity” respectivamente.



- d) Iniciar la conexión ordenador-interfaz pulsando el botón “Start Monitoring”. El ordenador comienza a recibir información a tiempo real sobre el voltaje, amperaje consumido por el sistema y la temperatura sensorial y velocidad de rotación del cilindro interior. Inicialmente solo la gráfica de temperatura indica pulsos con valores de temperatura del ambiente, mientras que las gráficas del voltaje, amperaje y velocidad indican pulsos con valor de cero (no hay consumo del sistema).

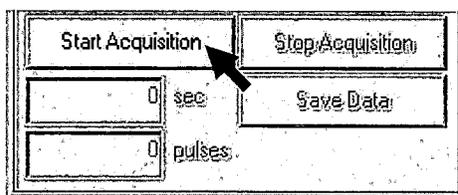


- e) Iniciar la rotación del motor pulsando el botón “Start DC Motor”. El motor iniciará la rotación e incrementará su velocidad hasta que el cilindro interior gire a la velocidad requerida. Este proceso es controlado por el sensor de velocidad ubicado sobre el eje del cilindro interior; en este instante las

gráficas de voltaje amperaje y velocidad indicarán pulsos de ascenso hasta lograr una estabilización en la lectura.



- f) Estabilizada la rotación (evidenciado por la similitud en el valor de los pulsos), proceder a almacenar la data de voltaje, amperaje, temperatura y velocidad de rotación pulsando el botón "Start Acquisition". Luego de un periodo de almacenamiento (entre 20 a 30 segundos), detener el almacenamiento de datos pulsando el botón "Stop Acquisition". Acto seguido pulsar el botón "Save Data"



- g) Guardar la data con la extensión xls. Se recomienda un nombre de archivo que caracterice la velocidad y condiciones de rotación.
- h) Incrementar o decrecer la velocidad de rotación a una nueva velocidad de experimentación.



- i) Repetir los pasos f), g) y h).

3.3.3 Calibración del equipo en rotación libre

Con la finalidad de definir las condiciones iniciales, antes del proceso de experimentación con flujos hiperconcentrados, es necesario conocer los consumos de potencia eléctrica propios del equipo reométrico en rotación libre, para cada configuración de rotación elegida y en todas las velocidades de rotación necesarias.

Este proceso inicial permite almacenar la data de potencia eléctrica que consume el equipo reométrico en cada velocidad de rotación, para luego cuando se almacene la data de potencia eléctrica consumida por el equipo reométrico en rotación sumergida (cilindro interior inmerso en fluido hiperconcentrado), pueda

obtenerse por diferencia la data de potencia consumida por el esfuerzo cortante que actúa sobre el área de contacto del cilindro interior.

3.3.4 Experimentación con flujos hiperconcentrados

Una vez instalado el equipo reométrico y habiendo realizado la calibración en rotación libre, la experimentación debe realizarse de acuerdo al procedimiento siguiente:

- Seleccionar en el ordenador la velocidad de giro deseada. El cilindro interior comenzará a rotar con una velocidad ascendente hasta alcanzar la velocidad indicada.
- Elevar el cilindro exterior a través de las barras verticales, hasta que contenga totalmente al cilindro interior, sin generar rozamiento entre ambos cilindros.
- Verter la muestra de fluido hiperconcentrado en el espacio anular existente entre ambos cilindros. Puede apoyarse con un embudo para lograr este cometido. El proceso provoca una disminución en la velocidad de rotación, pero el microprocesador del interfaz logra una compensación incrementando la potencia eléctrica consumida por el sistema hasta conseguir la velocidad de rotación deseada.
- Una vez lograda la estabilización de la potencia eléctrica consumida, almacenar la data de potencia eléctrica consumida y proceder a cambiar la velocidad de rotación deseada en el ordenador (incrementar o decrecer); luego de la estabilización de la rotación en la nueva velocidad de giro, proceder al almacenamiento de la data de potencia consumida.
- Continuar este proceso las veces necesarias hasta almacenar la data de potencia consumida en todas las velocidades de rotación previstas para la experimentación.

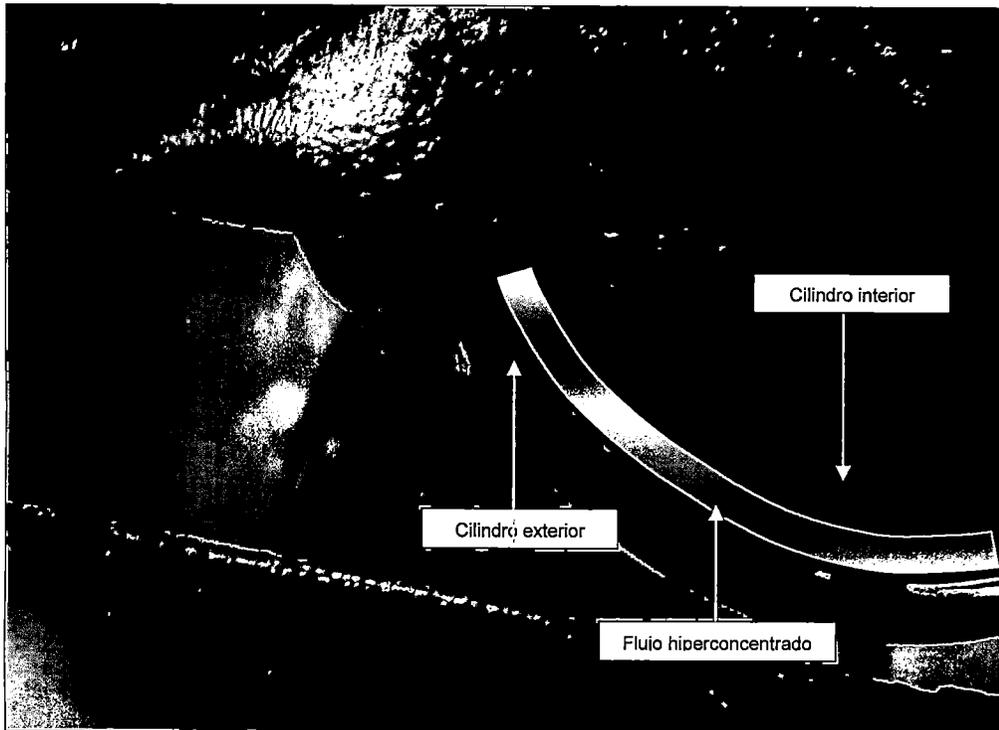


Figura 3. 4. Flujo hiperconcentrado entre cilindros interior y exterior.

Fuente: Elab. propia

3.4 TRATAMIENTO DEL REGISTRO DE DATOS.

La data almacenada en la experimentación (archivo Excel) para cada velocidad de corte analizada, tiene la siguiente presentación:

	Voltaje	Amperaje	Temperatura	Velocidad (rpm)
1	6.28332	0.519039	23.7143	152
2	6.214	0.514661	24.3223	164
3	6.17752	0.51612	24.5656	158
4	6.16292	0.52293	24.2007	152
5	6.19576	0.514174	23.8359	146
6	6.25778	0.504932	23.8359	138
7	6.29426	0.50931	24.0791	140
8	6.23589	0.517579	24.0791	158
9	6.14103	0.517579	23.9575	164
10	6.28697	0.505418	23.7143	140
11	6.33075	0.508337	23.8359	144
12	6.27967	0.513688	24.0791	158
13	6.18846	0.517093	23.9575	164
14	6.20305	0.522444	24.0791	164
15	6.17752	0.517579	24.0791	152
16	6.214	0.503959	23.5927	136
17	6.15927	0.517093	24.0791	162
18	6.16657	0.518066	23.7143	156

Figura 3. 5. Data de experimentación almacenada (en este caso para 150 rpm).

Fuente: Elab. propia

- Las cuatro columnas (A, B, C y D) muestran la data almacenada de: voltaje, amperaje, temperatura y velocidad (rpm) en ese orden respectivo.
- Cada fila presenta la información de un pulso registrado y almacenado previamente en la memoria temporal del interfaz.

3.4.1 Eliminación de pulsos anómalos

En el proceso de experimentación y almacenamiento de datos, se generan ciertas perturbaciones (ruidos), especialmente cuando se trabaja a bajas velocidades de corte. Dichas perturbaciones se evidencian en pulsos almacenados con información anómala que debe eliminarse para no distorsionar el promedio final de datos almacenados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
37	2.99251	0.163446	33.5648	4							
38	2.96697	0.1615	33.6864	5							
39	3.1202	0.165392	33.0784	5							
40	-6543	382	32.7136	67							
41	-4792	189	32.9568	83							
42	-8732	873	32.9568	97							
43	-7563	390	33.8081	83							
44	-6381	762	33.2	107							
45	-5835	653	33.5648	280							
46	-5249	701	34.4161	173							
47	-4680	296	33.3216	183							
48	-4107	107	33.2	165							
49	-3286	368	33.5648	225							
50	-2865	296	34.781	167							
51	-2087	392	34.4161	134							
52	-1872	815	33.8081	122							
53	-1195	396	33.6864	93							
54	-659	163	34.2945	82							
55	3.03264	0.166851	33.4432	5							
56	3.08007	0.1615	33.2	4							
57	2.94143	0.175607	33.5648	5							
58	2.94508	0.174148	33.5648	4							

Figura 3. 6. Ubicación de pulsos anómalos en data almacenada (para 5 rpm).

Fuente: Elab. propia

3.4.2 Promedio de datos

Luego de la verificación y eliminación de pulsos anómalos, los datos almacenados (voltaje, amperaje, temperatura y velocidad) se numeran y promedian para obtener un único juego de datos que caracterice el experimento bajo las condiciones indicadas.

ID	VOLTAJE (V)	AMPERAJE (A)	TEMPERATURA (°C)	VELOCIDAD (RPM)
362	4.3278	0.383807	29.43	100
363	4.30591	0.386239	30.0381	96
364	4.3424	0.378456	29.43	96
365	4.31686	0.380401	29.5516	104
366	4.30956	0.382834	29.3084	110
367	4.23659	0.383807	29.43	108
368	4.20011	0.381374	30.1597	102
369	4.24024	0.380888	29.6733	98
370	4.24389	0.381861	29.6733	90
371	4.28037	0.371159	29.6733	88
372	4.38618	0.362889	29.1868	86
373	4.31686	0.380888	29.6733	112
374	4.26943	0.382834	29.5516	108
375	4.20741	0.384779	29.9165	104
376	4.19646	0.376996	29.6733	100
377	4.21835	0.382347	29.6733	94
378	4.24024	0.367267	29.6733	86
379	4.32051	0.367267	29.43	84
380	4.37158	0.368727	29.5516	90
381	4.36793	0.372618	29.3084	100
Promedio de datos obtenidos en cada pulso				
	4.308772715	0.371703366	29.47954848	99.92797784

Figura 3. 7. Promedio de datos (para 100 rpm).

Fuente: Elab. propia

3.4.3 Cálculo de la potencia eléctrica en giro sumergido

El promedio de datos obtenido en la experimentación con el cilindro sumergido en el fluido, se almacena y se calcula la potencia eléctrica según la Ec. 2.4 detallada en el ítem 2.2.2.

Cuadro 3. 1 Cuadro parcial de almacenamiento y cálculo de la potencia eléctrica.

Concentración Volumétrica: 40%		CONFIGURACIÓN DE ROTACIÓN		
		M_PC/PG_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	3.084	0.185	0.570
2	6	3.429	0.194	0.664
3	7	4.087	0.210	0.860
4	8	4.308	0.214	0.920
5	9	4.941	0.233	1.153
6	10	5.615	0.249	1.399
7	12	6.626	0.281	1.861
8	15	8.076	0.333	2.690
9	18	9.382	0.363	3.409
10	20	10.548	0.384	4.049

Fuente: Elab. propia

El Cuadro 3. 1 muestra la data almacenada para el ordenamiento M_PC/PG_DCC, cuya configuración de giro conecta el disco sobre el motor (M), con el disco de plexiglass en su diámetro más pequeño (PC). A su vez, el diámetro mayor del disco de plexiglass (PG) se conecta con el disco de menor diámetro sobre el cilindro interior (DCC). Los resultados muestran la potencia eléctrica en giro sumergido de un flujo hiperconcentrado al 40 % de concentración en volumen. Este ordenamiento solo permite el cálculo de parámetros reológicos entre las velocidades de 5 rpm a 20 rpm.

3.4.4 Cálculo de la potencia eléctrica efectiva

Entiéndase como potencia eléctrica efectiva a la potencia eléctrica consumida únicamente por el flujo hiperconcentrado, descontada ya, de la potencia eléctrica en giro sumergido, la potencia eléctrica de calibración en giro libre. (Ítem 2.2.1).

3.4.5 Potencia mecánica efectiva

Luego de obtener la potencia eléctrica efectiva (P_E), de acuerdo a la eficiencia (n) calculada para cada ordenamiento, se obtiene la potencia mecánica efectiva (P_M). (Ítem 2.2.2).

$$P_M = n \cdot P_E \quad \dots \text{(Ec. 3. 1)}$$

3.4.6 Cálculo de parámetros reológicos

Luego de obtener la potencia mecánica efectiva, de acuerdo a las ecuaciones Newtonianas que gobiernan el diseño, se obtiene la velocidad de corte y el esfuerzo de corte que caracteriza el flujo hiperconcentrado. Además se puede visualizar su comportamiento en un reograma y definir parámetros reológicos adicionales, como son el esfuerzo de cedencia, la viscosidad dinámica para cada velocidad de rotación registrada y la viscosidad aparente.

CAPITULO IV: APLICACIÓN A FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

4.1 JUSTIFICACIÓN.

En este capítulo se muestra el proceso de experimentación en flujos hiperconcentrados, comenzando con la realización de los ensayos, el procesamiento de la data y el análisis de los resultados obtenidos.

Los flujos hiperconcentrados fueron obtenidos luego de preparar diversas matrices de concentración sólido-líquido, utilizando dos tipos de relave minero.

La razón por la que se procedió a utilizar relaves mineros, obedece a que su composición granulométrica fina y mezcla relativamente homogénea, posibilitan la realización de los ensayos en un reómetro de cilindros concéntricos, donde existe solo un espacio anular de 0.005 m. entre el cilindro exterior e interior.

Además se utilizaron dos tipos diferentes de relave minero, con la finalidad de analizar, además del comportamiento de un flujo a diversas concentraciones, el comportamiento característico de cada relave bajo la aplicación de una velocidad de corte similar, ensayado a la misma concentración volumétrica.

4.2 MUESTRAS ANALIZADAS

El relave, es el material desecho de procesos mineros, que por lo general contiene altas concentraciones de químicos y elementos tóxicos.

Su granulometría, dependiendo del proceso, presenta tamaños entre arenas y limos. Su transporte y depósito se realiza en forma de lodos, mezcla de suelo, mineral, roca y agua.

Para esta investigación se utilizaron 2 muestras de relave:

- Muestra de relave de la mina Cobriza, perteneciente a la firma DoeRun Perú. Ubicada a 390 kilómetros al sudeste de La Oroya, en el distrito de San Pedro de Coris, provincia de Churcampa, región Huancavelica.
- Muestra de relave de la compañía minera Volcan, UEA - MAHR. TUNEL, depósito de relaves N° 03.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

4.3.1 Descripción visual de la muestra

Muestra de relave Cobriza. Luego del secado al horno y molienda, la muestra de relave Cobriza presentó una coloración marrón clara y una uniformidad en grano fino. Cabe mencionar además, que en el proceso de secado al horno del relave, este produjo una emanación tóxica de vapor y en el proceso de molienda, la muestra presentó una dispersión de partículas sólidas en el ambiente, comparativamente menor que el otro relave analizado.



Figura 4. 1. Muestra seca y molida del relave Cobriza.

Fuente: Elab. propia

Muestra de relave Volcan. Luego del secado al horno y molienda, la muestra de relave Volcán presentó una coloración gris clara y una granulometría de grano uniforme, a excepción de algunos pedazos de roca de entre 2 a 3 mm. de diámetro que fueron detectados en la molienda del material.



Figura 4. 2. Muestra seca y molida del relave Volcan.

Fuente: Elab. propia

4.3.2 Propiedades físicas analizadas

Densidad de la muestra

Para el análisis de la densidad del componente sólido de la muestra, se procedió a realizar el ensayo del picnómetro, según procedimientos indicados en la norma ASTM 854. El resultado de los ensayos realizados a ambos relaves se encuentra en el anexo de esta investigación.



Figura 4. 3. Método del picnómetro realizado a 4 muestras del relave Volcan.
Fuente: Elab. propia

En promedio, las muestras de relave analizado presentan los siguientes valores de gravedad específica:

Cuadro 4. 1 Resultados de Gravedad Específica.

	Muestras Analizadas	Gs (g/cm³)
1	Muestra relave Cobriza	3.63
2	Muestra relave Volcan	2.89

Fuente: Elab. propia

Granulometría de la muestra

Por la finura del grano obtenido, el ensayo granulométrico se efectuó por el método del hidrómetro, el cual siguió el procedimiento establecido en la norma ASTM D 422. El resultado del método se encuentra en el anexo A.3 de esta investigación.

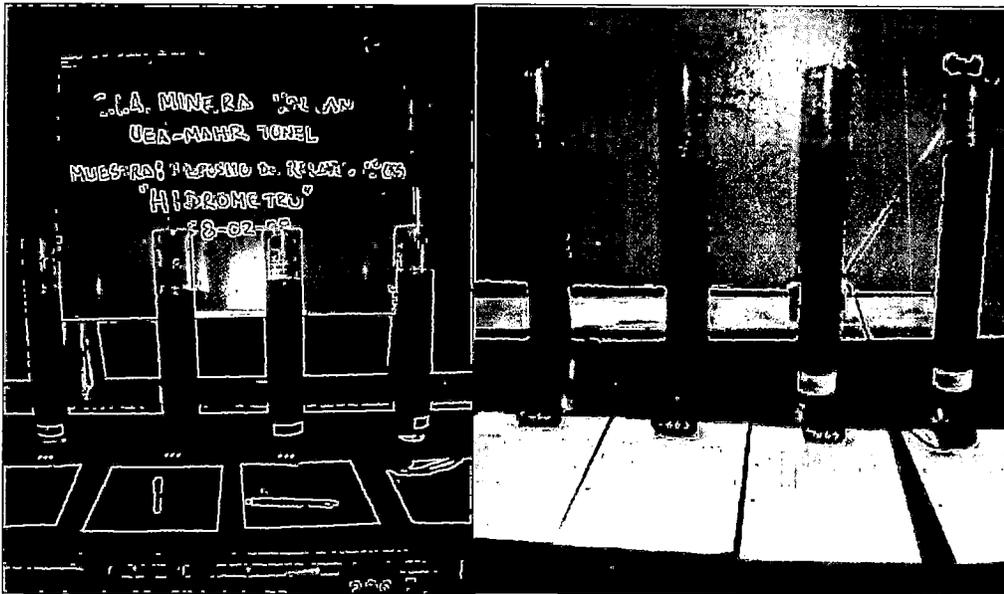


Figura 4. 4. Prueba del hidrómetro: Relave Volcan (Izq.). Relave Cobriza (Der.)
 Fuente: Elab. propia

Cabe mencionar que las pruebas realizadas a los dos relaves evidenciaron comportamientos diferentes. Las muestras de relave Volcan experimentaron una decantación de partículas sólidas muy lenta, tal es así que a las 4 horas de control, aun podía visualizarse una turbidez considerable en la probeta analizada. Por el contrario Las muestras de relave Cobriza, experimentaron una decantación inicial violenta (en la primera hora), pudiendo visualizar una transparencia del líquido contenido en la probeta, a las 4 horas de ensayo (Figura 4.4).

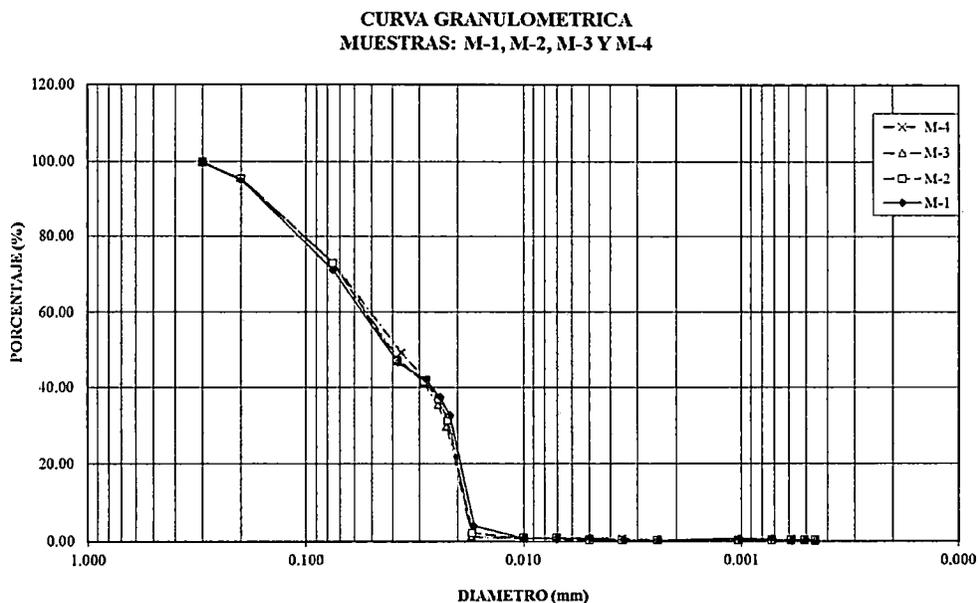


Figura 4. 5. Granulometría Muestras de relave Cobriza
 Fuente: Elab. propia

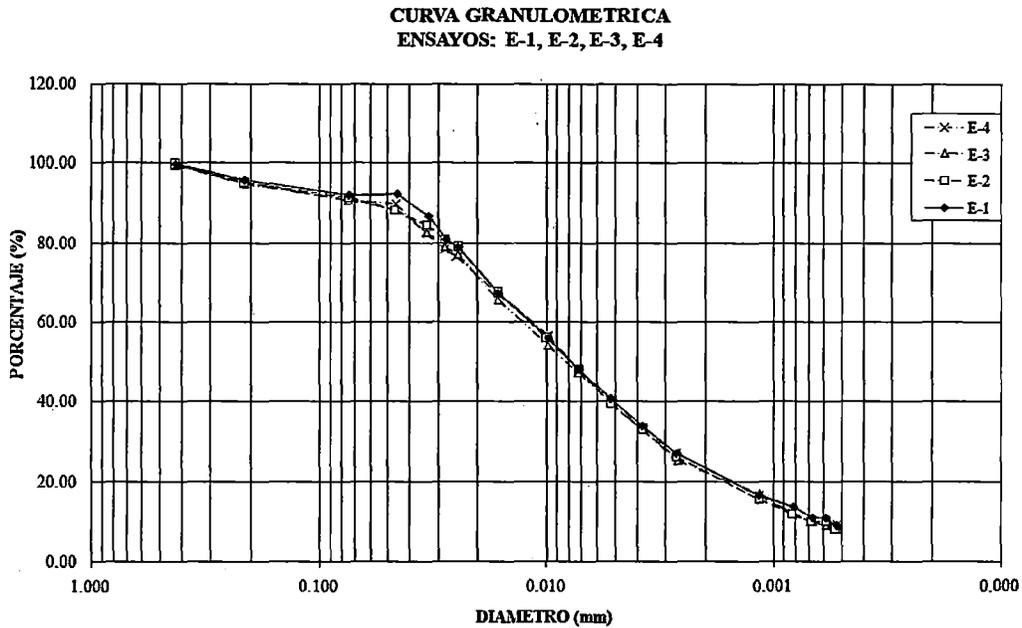


Figura 4. 6. Granulometría Muestras de relave Volcan

Fuente: Elab. propia

Esta información experimental fue de gran utilidad en la realización de los ensayos, pues se tuvo mayor cuidado con las muestras de relave Cobriza al experimentar en bajas velocidades de corte. Las pruebas se desarrollaron batiendo la mezcla hiperconcentrada cada vez que se realizó una matriz de ensayos. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

4.3.3 Propiedades químicas analizadas

Medición del Potencial de Hidrógeno (pH)

Como parte de la experimentación en flujos hiperconcentrados, se hace relevante el conocer la medida de la acidez o alcalinidad de las muestras de relave minero. Esto con la finalidad de establecer la condición inicial de las muestras en una propiedad química que incide en la viscosidad de los flujos hiperconcentrados.

Se realizó la medición del pH para los dos relaves, bajo diferentes concentraciones. Los resultados de las pruebas realizadas se muestran a continuación:

Cuadro 4. 2 Resultados de pH.

Código de muestra	Muestra de relave	Potencial de hidrógeno (pH)
M-1	Cobriza	6.84
M-2		6.68
M-3		6.57
M-4		6.56
M-9		---
M-5	Volcan	7.07
M-6		7.06
M-7		7.02
M-8		---

Fuente: Elab. propia

4.4 EXPERIMENTACIÓN

4.4.1 Concentración sólida de muestras

Para la experimentación con relaves, se preparó la matriz de ensayos basado en la concentración volumétrica del componente sólido de la mezcla final. El cuadro siguiente lista las concentraciones ensayadas.

Cuadro 4. 3 Concentración sólida de la muestra.

ID	Procedencia	Código	Concentración	
			En volumen Cv (%)	En peso Cw (%)
1	Cobriza	M-1	35.00	63.97
2		M-2	40.00	69.40
3		M-3	45.00	72.60
4		M-4	50.00	75.60
5		M-9	55.00	79.11
6	Volcan	M-5	35.00	56.08
7		M-6	38.00	59.15
8		M-7	40.00	60.77
9		M-8	45.00	65.50

Fuente: Elab. propia

4.4.2 Temperatura de experimentación

La temperatura del fluido, como parámetro fundamental en el comportamiento viscoso del fluido, fue controlado al inicio y final de cada experimentación. El cuadro siguiente muestra los controles realizados.

Cuadro 4. 4 Temperatura de experimentación.

ID	Procedencia	Código	Temperatura (°C)
1	Cobriza	M-1	26.9
2		M-2	27.1
3		M-3	27.8
4		M-4	27.8
5		M-9	----
6	Volcan	M-5	27.8
7		M-6	28.7
8		M-7	28.2
9		M-8	----

Fuente: Elab. Propia

En el siguiente ítem se muestran los resultados experimentales, producto de la investigación con muestras de flujo hiperconcentrado preparadas en base a los dos relaves descritos.

La experimentación se realizó en base a nueve muestras preparadas, de las cuales, por variadas circunstancias debido al comportamiento intrínseco de cada material, solo se logró ensayar con siete muestras.

Los resultados experimentales se llevaron a dos modelamientos, con la finalidad de caracterizar los resultados obtenidos mediante simulaciones, obteniendo resultados interesantes respecto a su comportamiento.

4.4.3 Resultados de la experimentación

Muestra M-1 (Relave Cobriza $C_v=35\%$)

Cuadro 4. 5 Resultados muestra M-1.

Configuración*	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	Viscosidad (Pa.s)
M_PC/PG_DCC	5.20	37.00	7.11
	6.24	31.32	5.02
	7.28	33.02	4.53
	8.33	32.81	3.94
	9.37	35.82	3.82
	10.41	32.88	3.16
	12.49	36.71	2.94
M_PG/PM_DCC	15.61	40.30	2.58
	18.73	39.31	2.10
	20.81	41.04	1.97
	26.02	38.39	1.48
	31.22	44.73	1.43
M_PM/PC_DCC	52.03	43.21	0.83
	78.05	33.49	0.43
	104.07	30.34	0.29
	130.09	35.99	0.28

(*) Las configuraciones de rotación se detallan en el ítem 2.1.4

Fuente: Elab. propia

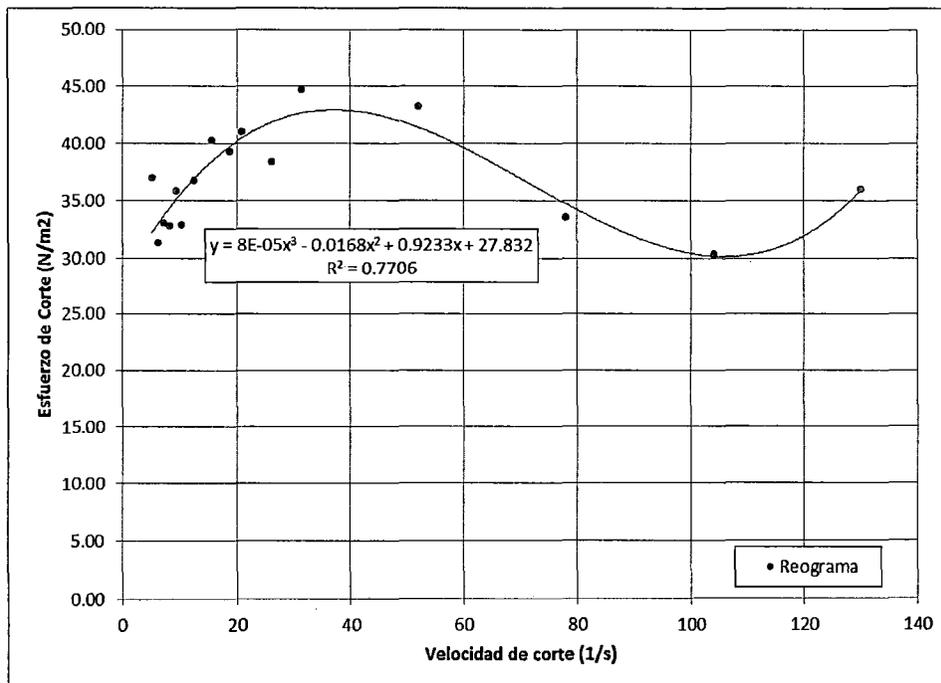


Figura 4. 7. Curva de fluidez M-1

Fuente: Elab. propia

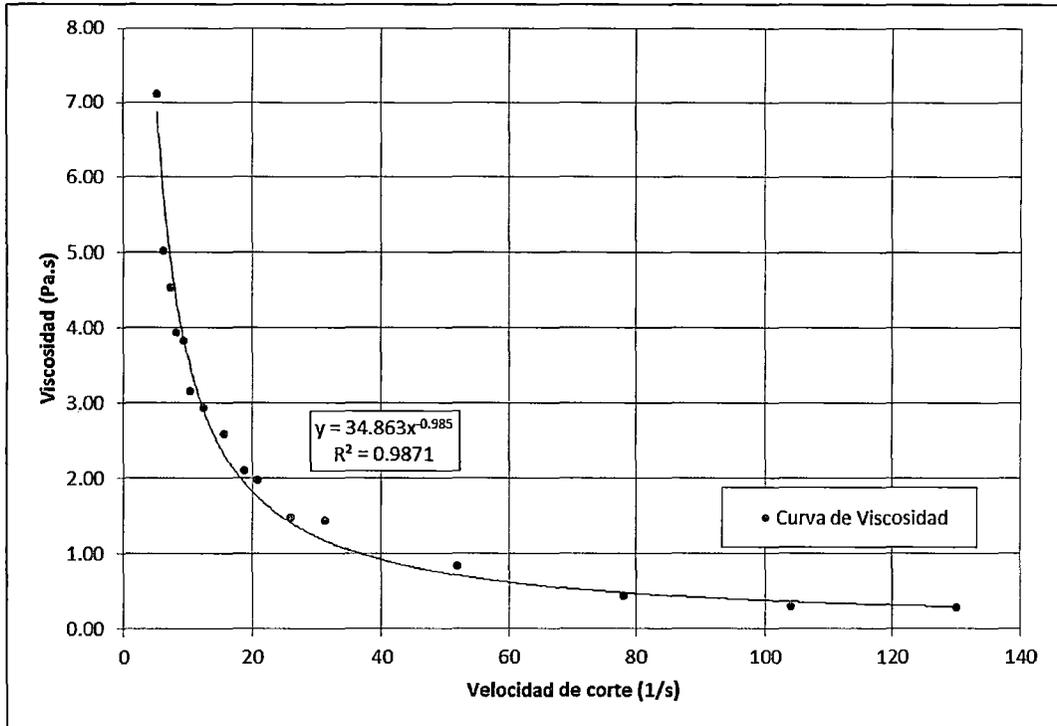


Figura 4. 8. Curva de viscosidad M-1

Fuente: Elab. propia

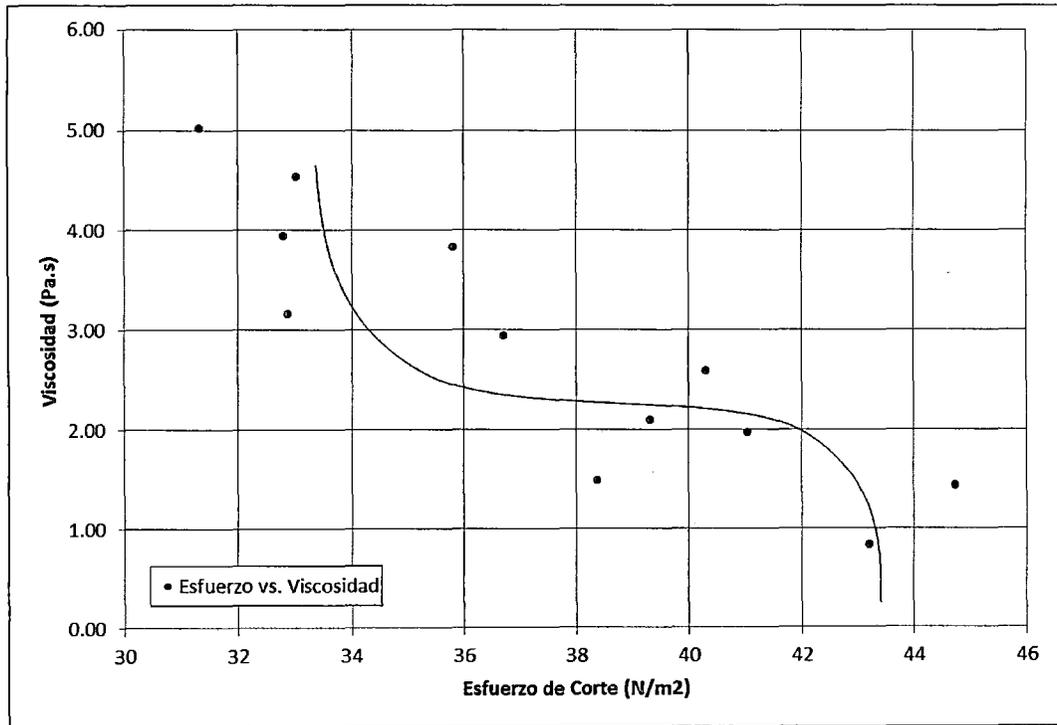


Figura 4. 9. Curva de esfuerzo-viscosidad M-1

Fuente: Elab. propia

Muestra M-2 (Relave Cobriza Cv=40%)

Cuadro 4. 6 Resultados muestra M-2.

Configuración	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	Viscosidad (Pa.s)
M_PC/PG_DCC	5.20	34.64	6.66
	6.24	32.48	5.20
	7.28	33.14	4.55
	8.33	30.41	3.65
	9.37	30.97	3.31
	10.41	30.96	2.97
	12.49	37.53	3.01
M_PG/PM_DCC	15.61	40.13	2.57
	18.73	39.29	2.10
	20.81	41.76	2.01
	26.02	41.59	1.60
	31.22	48.18	1.54
M_PM/PC_DCC	52.03	46.22	0.89
	78.05	33.74	0.43
	104.07	35.16	0.34
	130.09	36.95	0.28

Fuente: Elab. propia

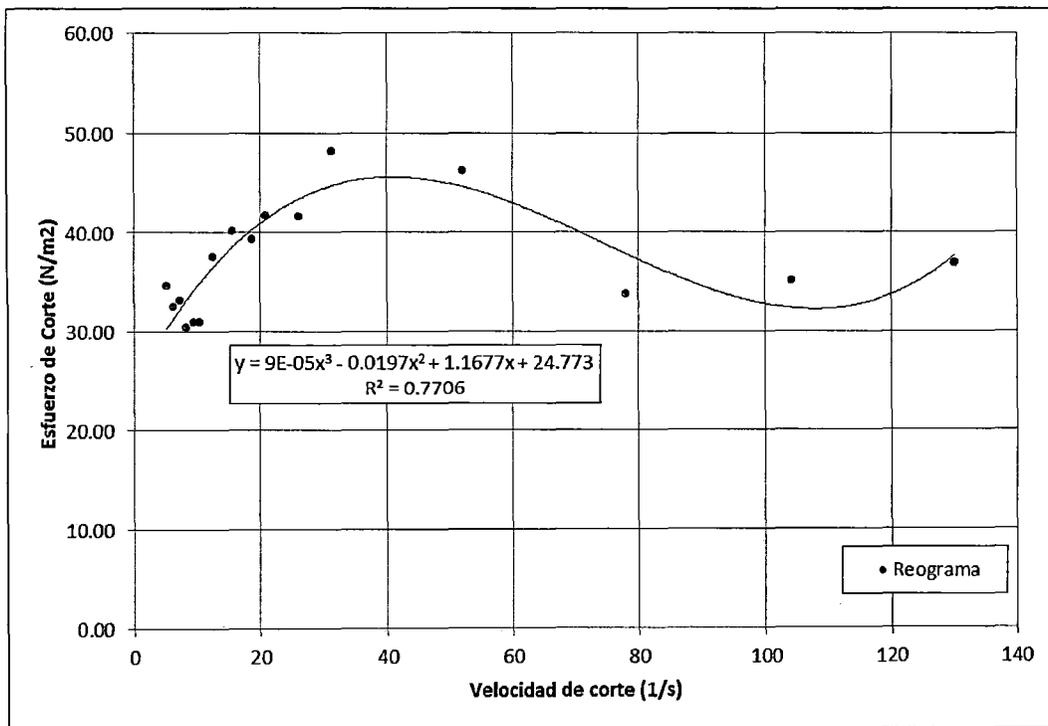


Figura 4. 10. Curva de fluidez M-2

Fuente: Elab. propia

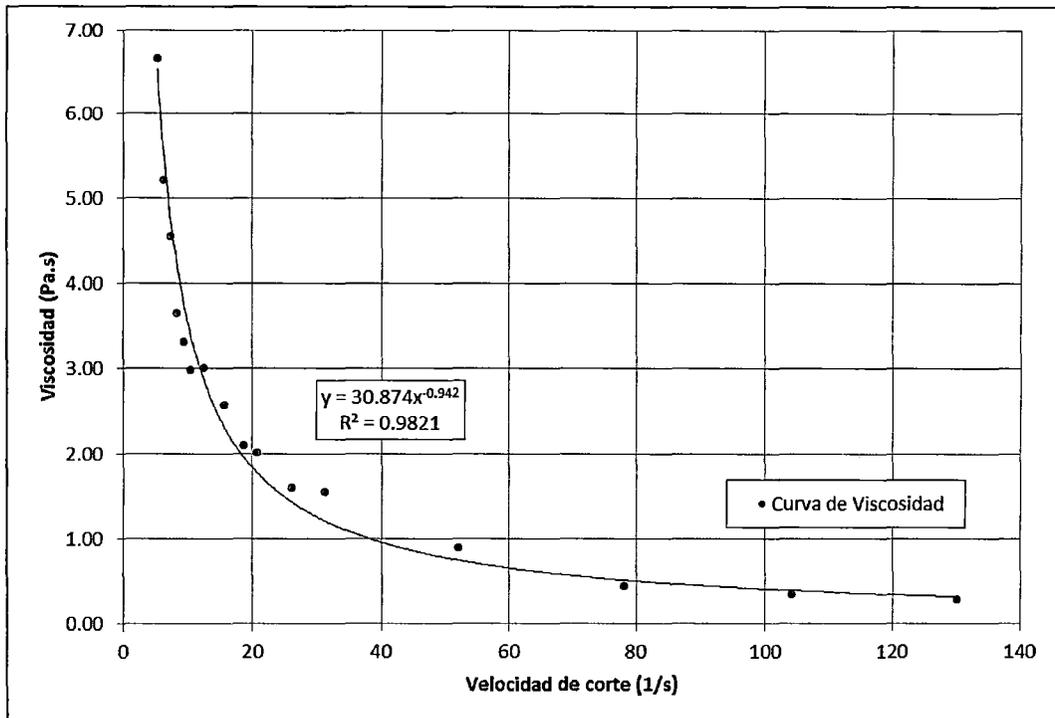


Figura 4. 11. Curva de viscosidad M-2

Fuente: Elab. propia

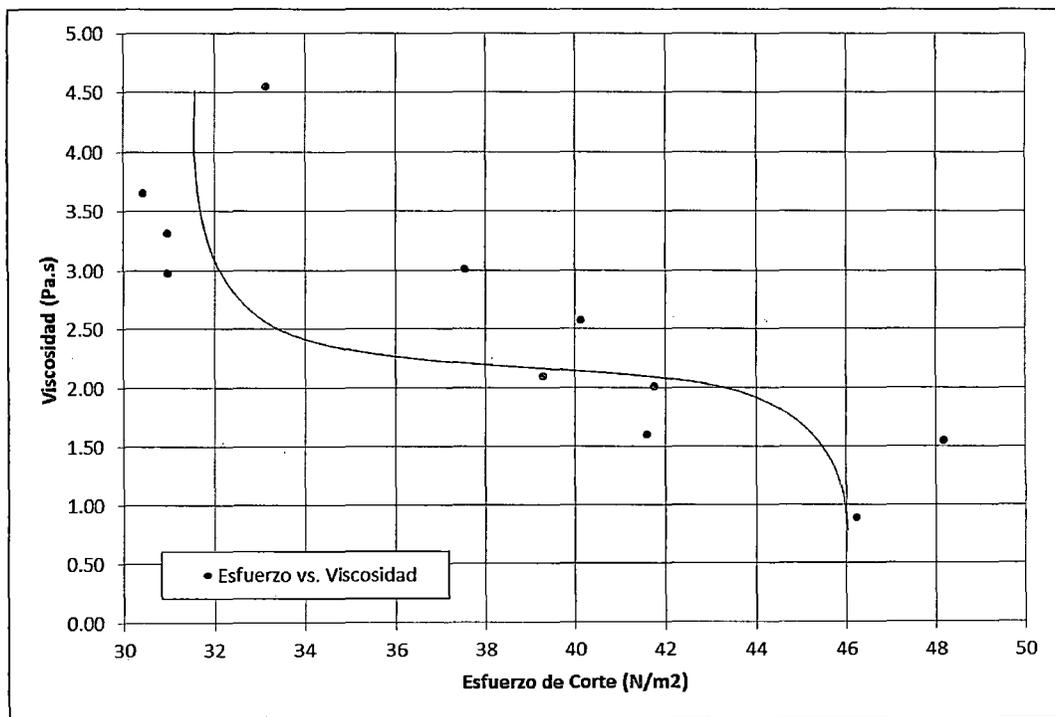


Figura 4. 12. Curva esfuerzo-viscosidad M-2

Fuente: Elab. propia

Muestra M-3 (Relave Cobriza Cv=45%)

Cuadro 4. 7 Resultados muestra M-3.

Configuración	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	Viscosidad (Pa.s)
M_PC/PG_DCC	5.20	45.75	8.79
	6.24	36.72	5.88
	7.28	42.00	5.76
	8.33	42.20	5.07
	9.37	47.08	5.03
	10.41	35.91	3.45
	12.49	45.97	3.68
M_PG/PM_DCC	15.61	50.79	3.25
	18.73	50.57	2.70
	20.81	57.22	2.75
	26.02	63.58	2.44
	31.22	67.22	2.15
M_PM/PC_DCC	52.03	66.20	1.27
	78.05	53.12	0.68
	104.07	50.82	0.49
	130.09	65.15	0.50

Fuente: Elab. propia

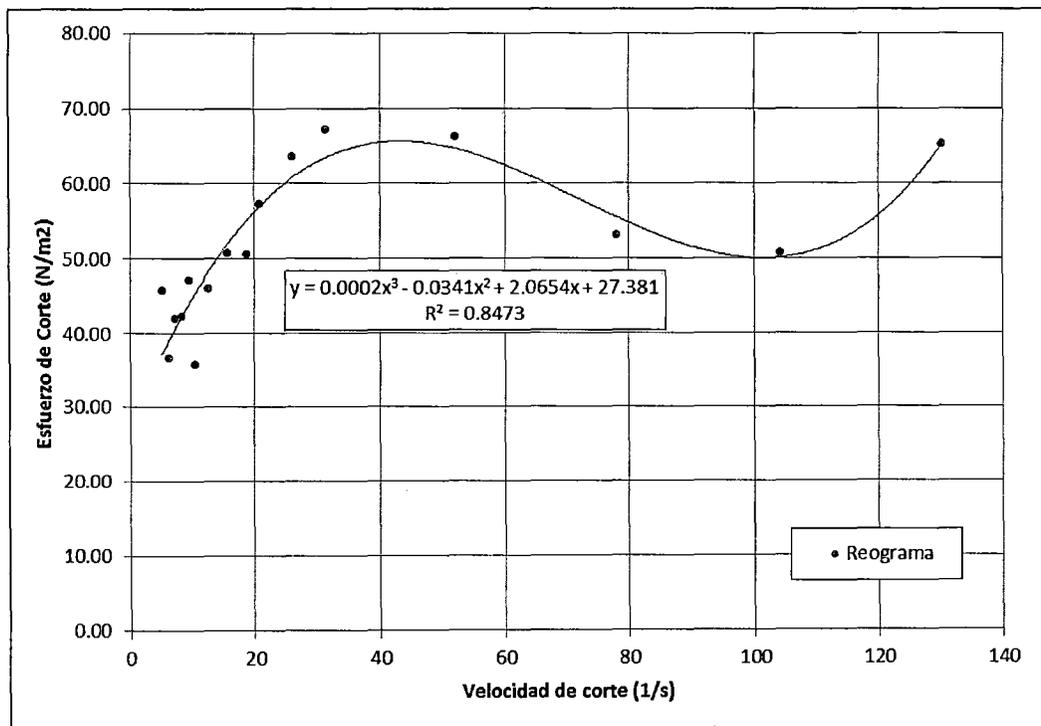


Figura 4. 13. Curva de fluidez M-3

Fuente: Elab. propia

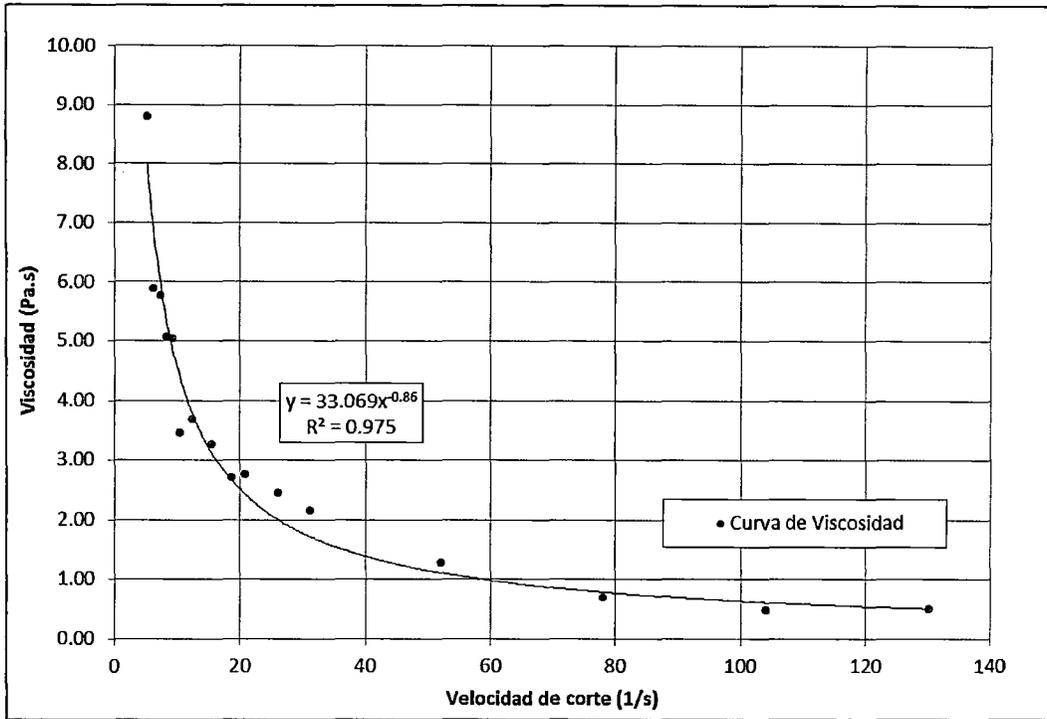


Figura 4. 14. Curva de viscosidad M-3

Fuente: Elab. propia

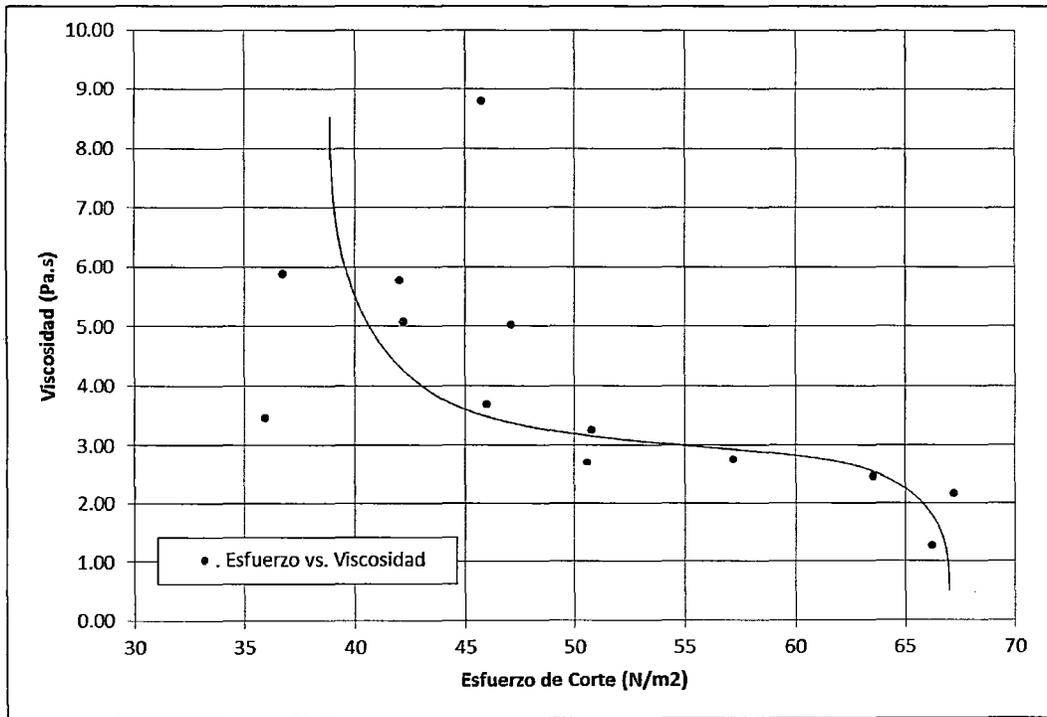


Figura 4. 15. Curva de esfuerzo-viscosidad M-3

Fuente: Elab. propia

Muestra M-4 (Relave Cobriza Cv=50%)

Cuadro 4. 8 Resultados muestra M-4.

Configuración	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	Viscosidad (Pa.s)
M_PC/PG_DCC	5.20	59.91	11.51
	6.24	53.29	8.54
	7.28	55.68	7.64
	8.33	54.62	6.56
	9.37	63.28	6.76
	10.41	67.14	6.45
	12.49	70.50	5.65
M_PG/PM_DCC	15.61	79.97	5.12
	18.73	87.52	4.67
	20.81	96.50	4.64
	26.02	109.48	4.21
	31.22	114.85	3.68
M_PM/PC_DCC	52.03	118.40	2.28
	78.05	100.55	1.29
	104.07	97.09	0.93
	130.09	80.10	0.62

Fuente: Elab. propia

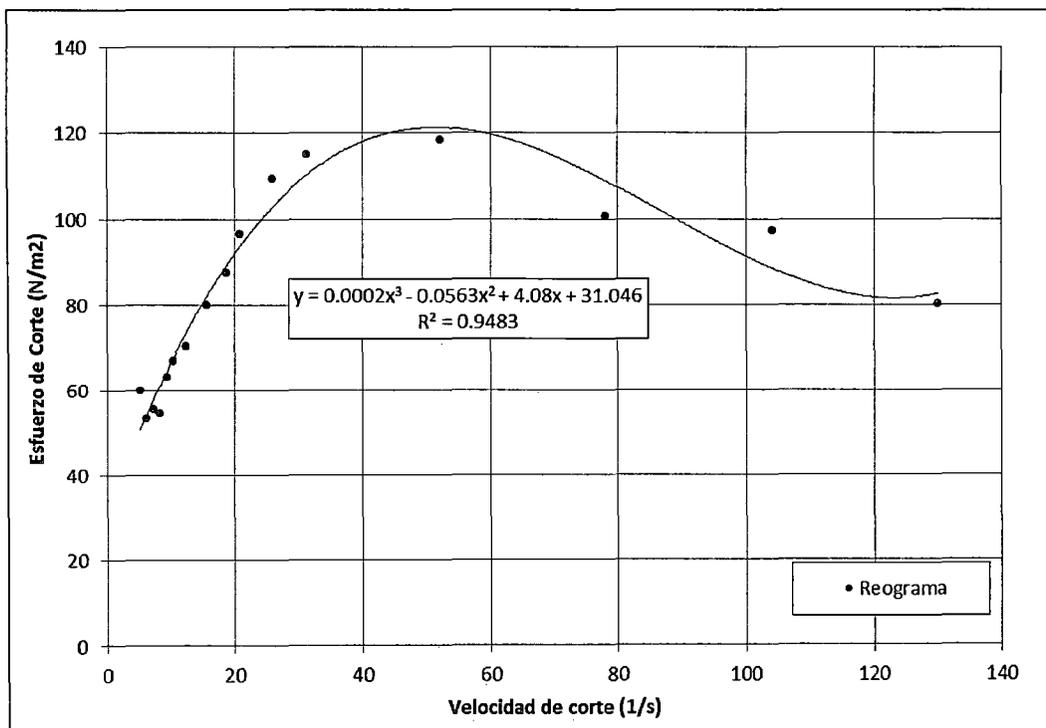


Figura 4. 16. Curva de Fluidez M-4

Fuente: Elab. propia

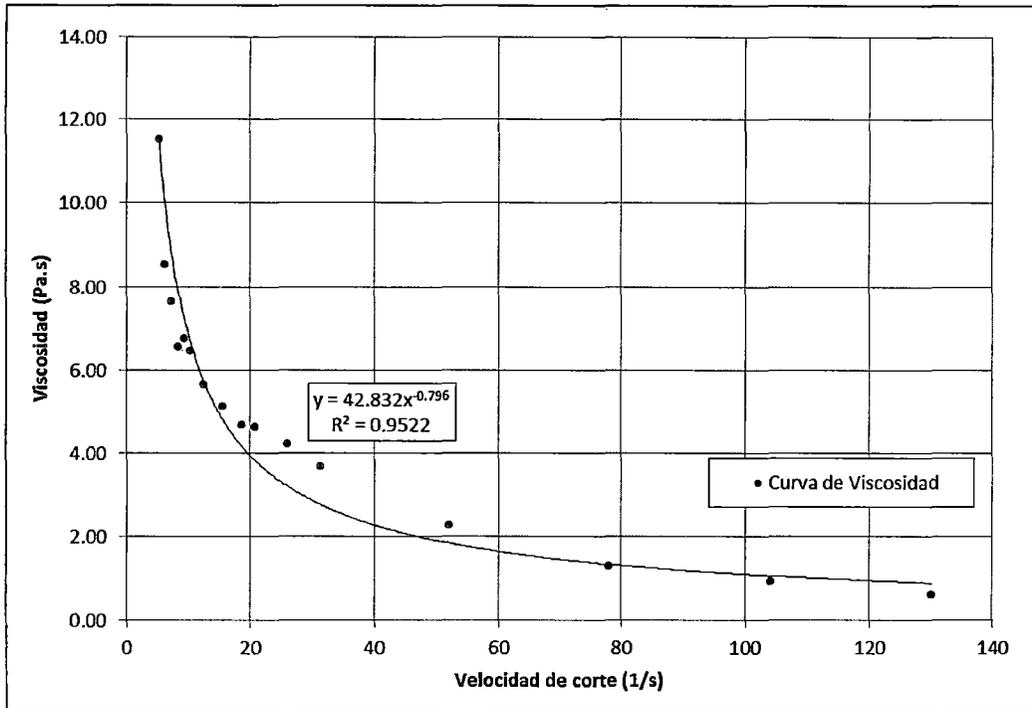


Figura 4. 17. Curva de viscosidad M-4

Fuente: Elab. propia

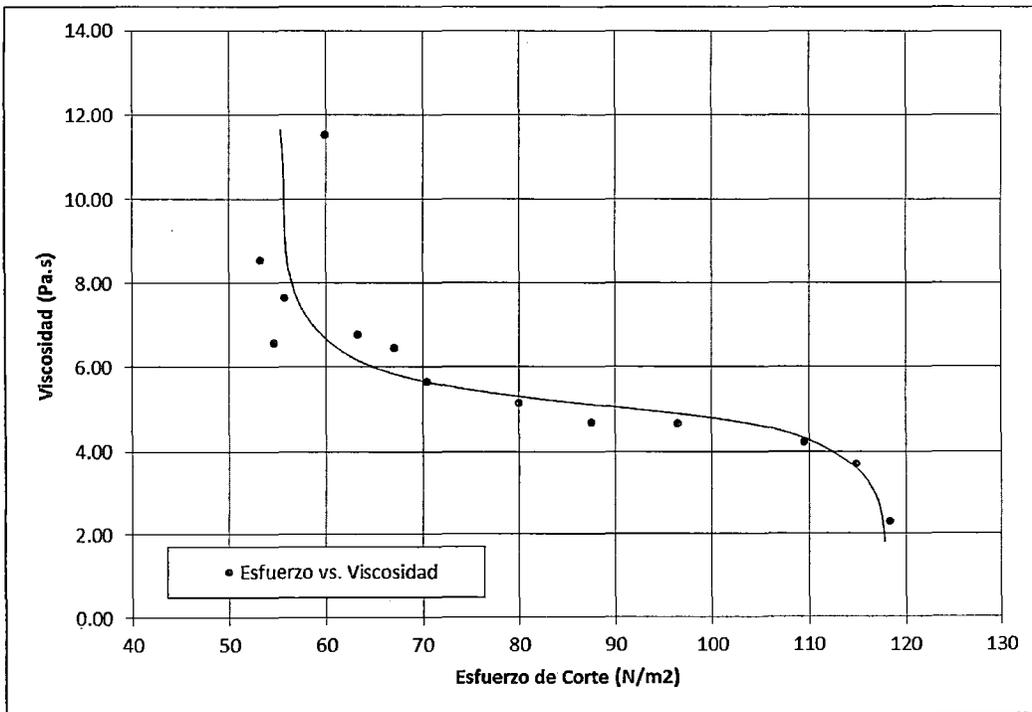


Figura 4. 18. Curva de esfuerzo-viscosidad M-4

Fuente: Elab. propia

Muestra M-5 (Relave Volcan Cv=35%)

Cuadro 4. 9 Resultados muestra M-5.

Configuración	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	Viscosidad (Pa.s)
M_PC/PG_DCC	5.20	55.62	10.69
	6.24	44.92	7.19
	7.28	53.10	7.29
	8.33	56.24	6.75
	9.37	61.91	6.61
	10.41	62.38	5.99
	12.49	67.73	5.42
M_PG/PM_DCC	15.61	77.11	4.94
	18.73	81.69	4.36
	20.81	85.36	4.10
	26.02	98.32	3.78
	31.22	96.88	3.10
M_PM/PC_DCC	52.03	93.38	1.79
	78.05	87.43	1.12
	104.07	70.51	0.68
	130.09	68.69	0.53

Fuente: Elab. propia

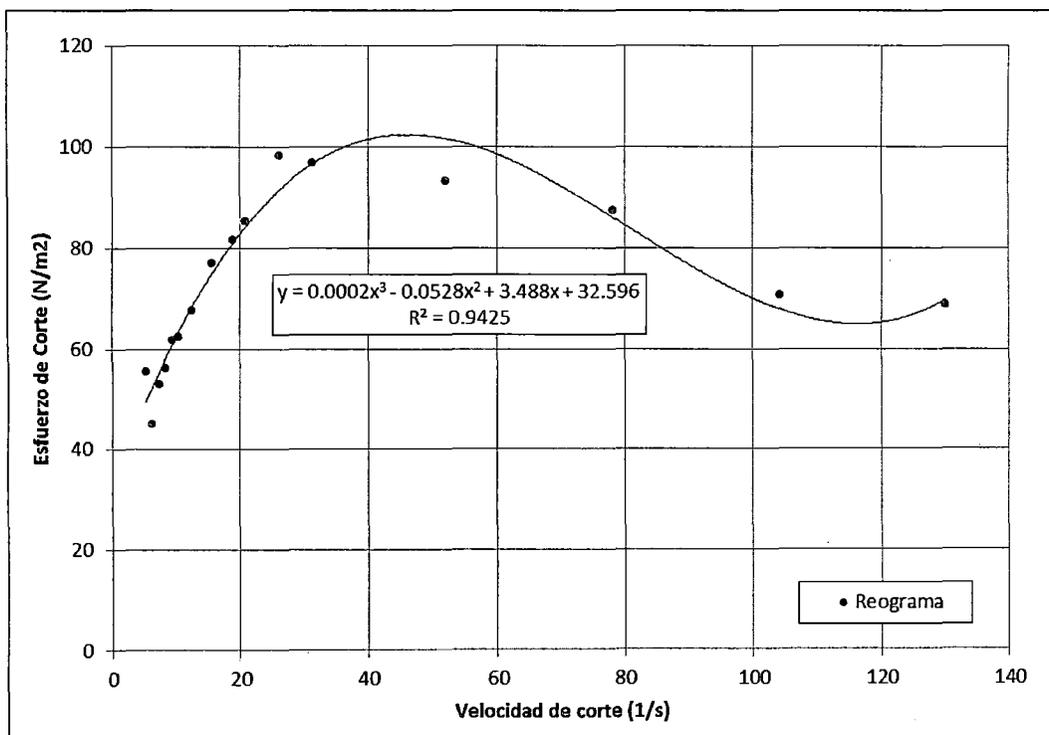


Figura 4. 19. Curva de fluidez M-5

Fuente: Elab. propia

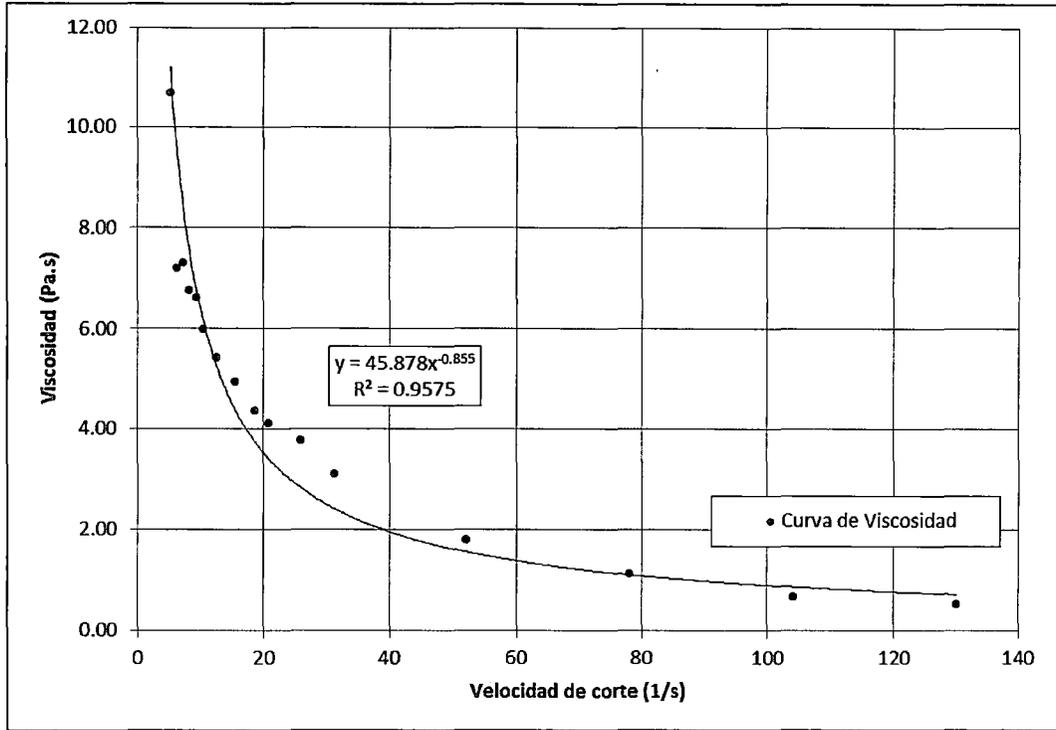


Figura 4. 20. Curva de viscosidad M-5

Fuente: Elab. propia

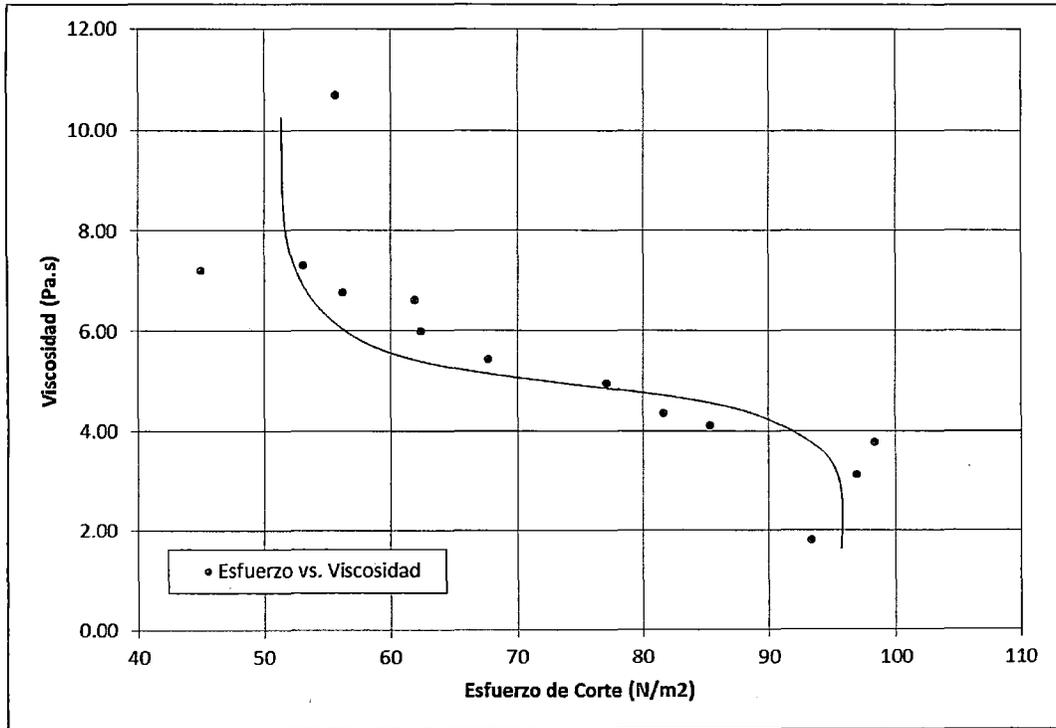


Figura 4. 21. Curva esfuerzo-viscosidad M-5

Fuente: Elab. propia

Muestra M-6 (Relave Volcan Cv=38%)

Cuadro 4. 10 Resultados muestra M-6.

Configuración	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	Viscosidad (Pa.s)
M_PC/PG_DCC	5.20	96.02	18.45
	6.24	94.30	15.10
	7.28	100.42	13.78
	8.33	115.42	13.86
	9.37	109.97	11.74
	10.41	126.86	12.19
	12.49	146.10	11.70
M_PG/PM_DCC	15.61	159.60	10.22
	18.73	163.34	8.72
	20.81	174.16	8.37
	26.02	176.78	6.79
	31.22	179.69	5.76
M_PM/PC_DCC	52.03	175.39	3.37
	78.05	154.84	1.98
	104.07	141.72	1.36

Fuente: Elab. propia

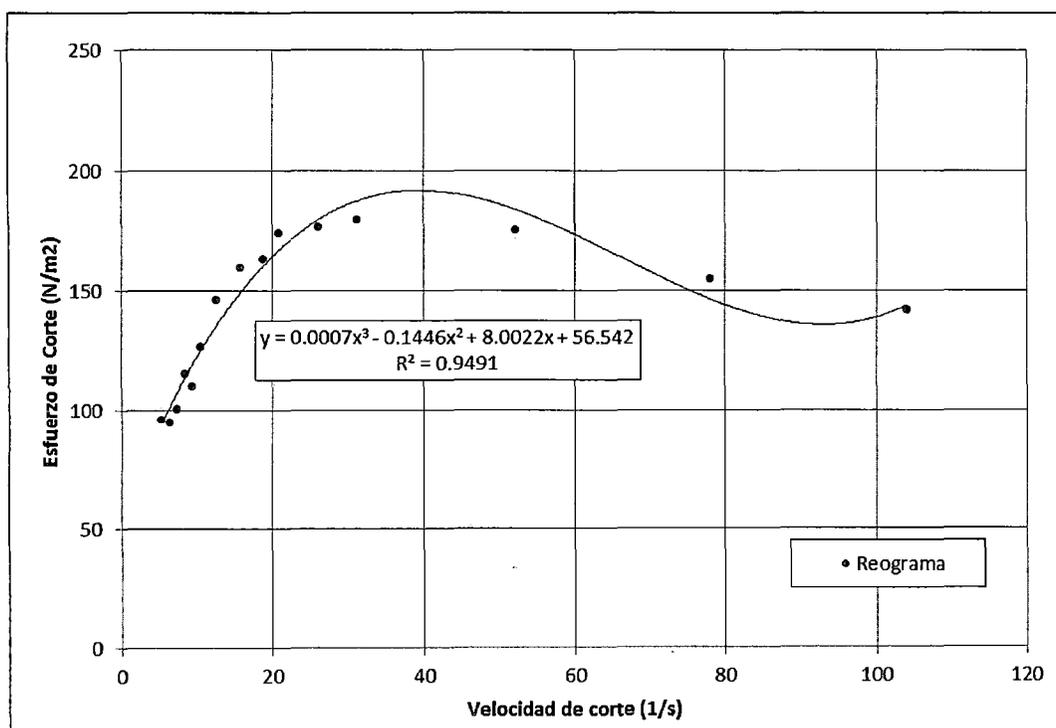


Figura 4. 22. Curva de fluidez M-6

Fuente: Elab. propia

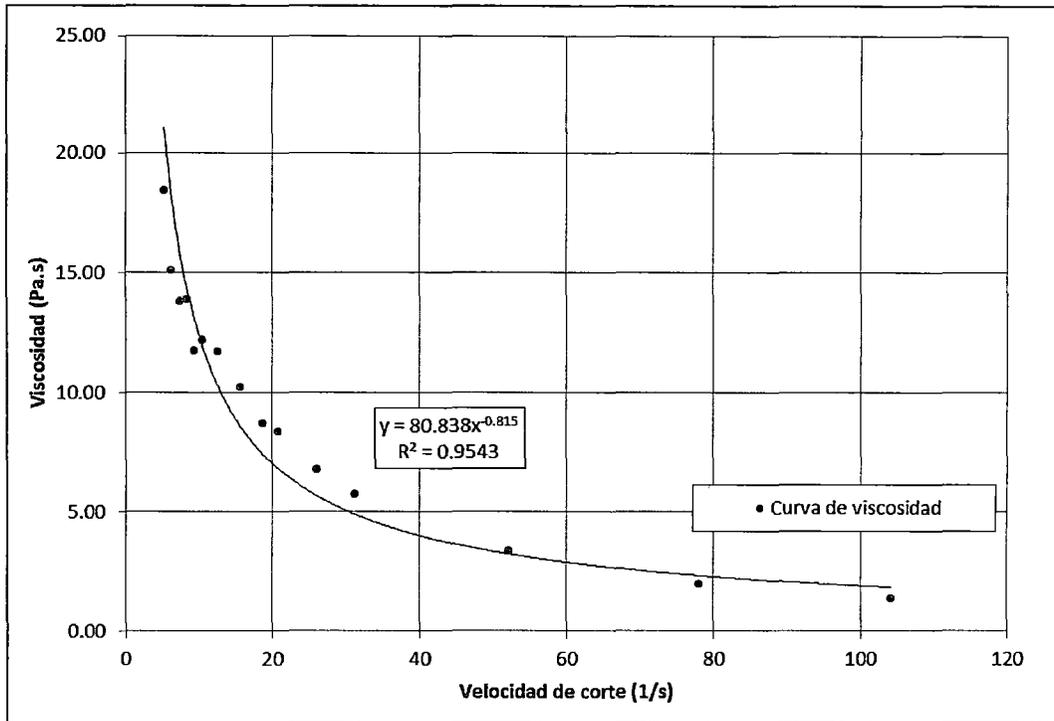


Figura 4. 23. Curva de viscosidad M-6

Fuente: Elab. propia

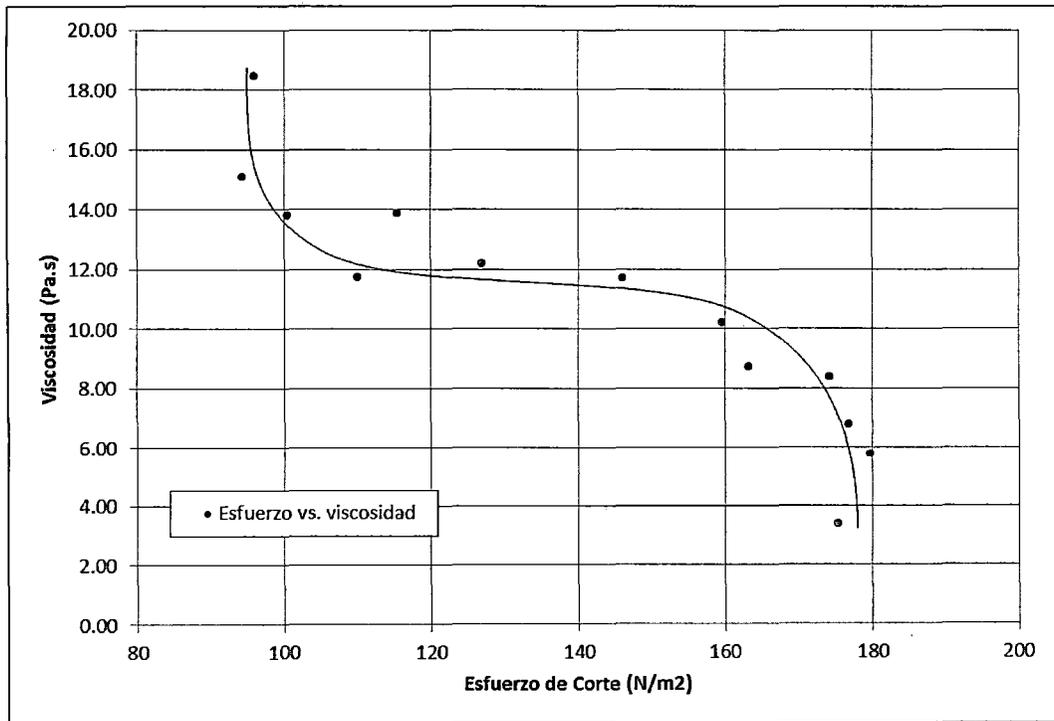


Figura 4. 24. Curva de esfuerzo-viscosidad M-6

Fuente: Elab. propia

Muestra M-7 (Relave Volcan Cv=40%)

Cuadro 4. 11 Resultados muestra M-7.

Configuración	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	Viscosidad (Pa.s)
M_PC/PG_DCC	5.20	112.44	21.61
	6.24	109.61	17.55
	7.28	109.06	14.97
	8.33	127.04	15.26
	9.37	136.11	14.53
	10.41	153.80	14.78
	12.49	172.87	13.84
M_PG/PM_DCC	15.61	187.95	12.04
	18.73	201.03	10.73
	20.81	210.63	10.12
	26.02	225.13	8.65
	31.22	235.27	7.54
M_PM/PC_DCC	52.03	231.09	4.44
	78.05	202.33	2.59
	104.07	192.36	1.85

Fuente: Elab. propia

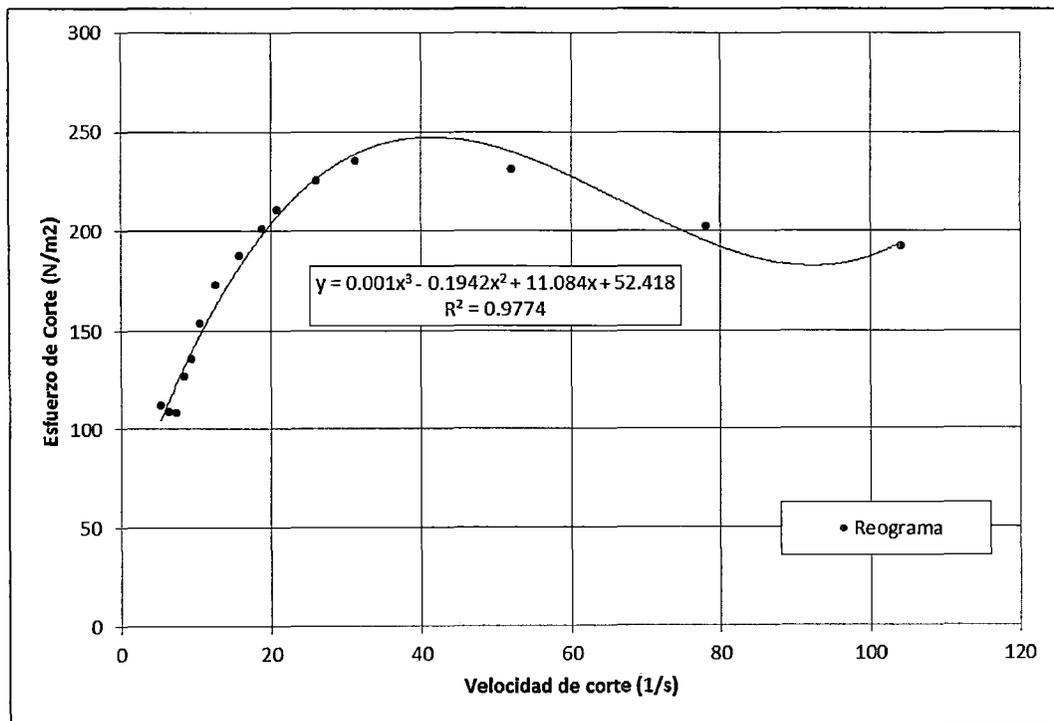


Figura 4. 25. Curva de fluidez M-7

Fuente: Elab. propia

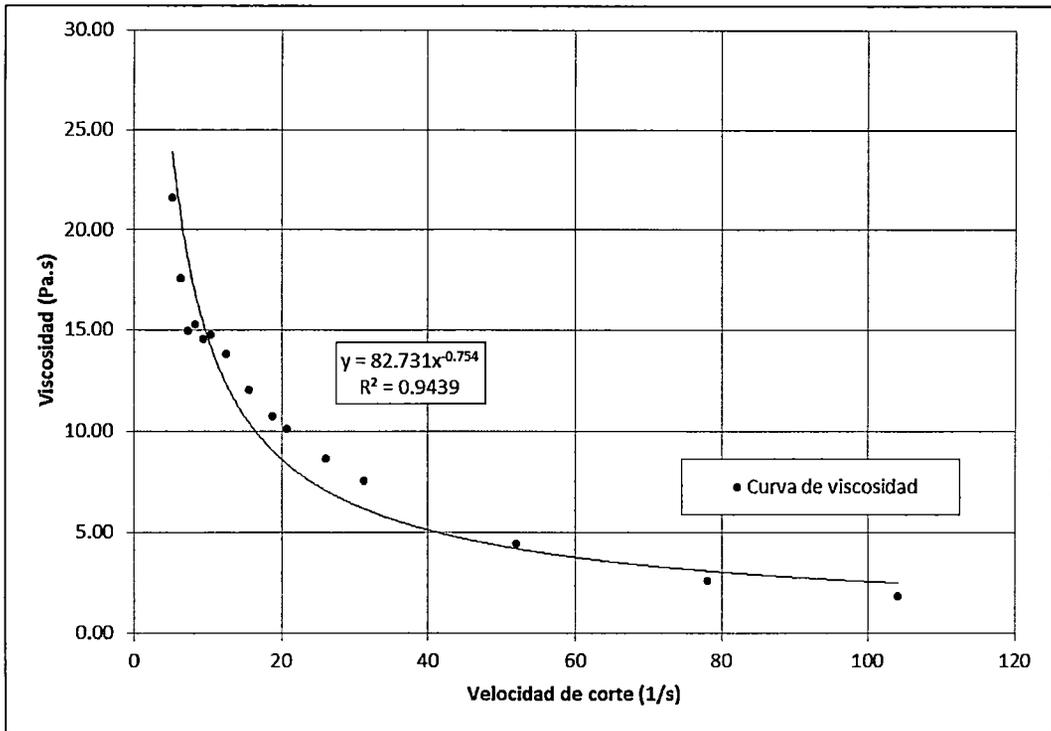


Figura 4. 26. Curva de viscosidad M-7

Fuente: Elab. propia

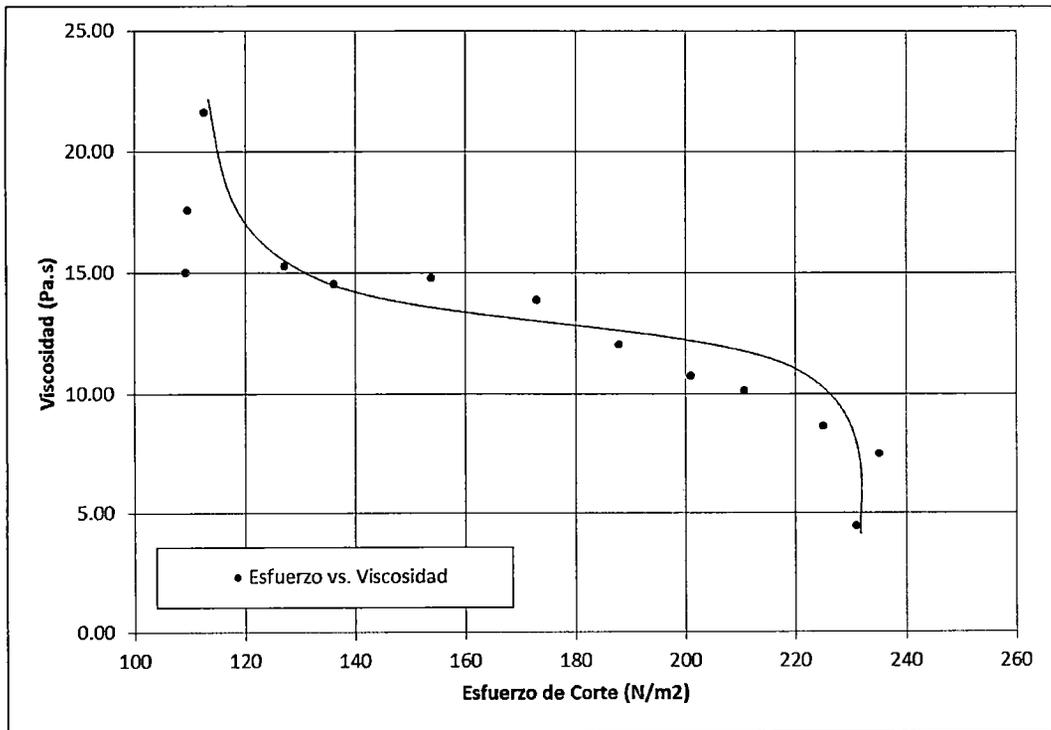


Figura 4. 27. Curva de esfuerzo-viscosidad M-7

Fuente: Elab. propia

4.5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.5.1 Cálculo del esfuerzo de cedencia (τ_y)

Según lo expuesto en el Capítulo II, ítem 2.1.1.3, el esfuerzo de cedencia de un reómetro con control de la velocidad de corte (Reómetro-CR), se determina como sigue:

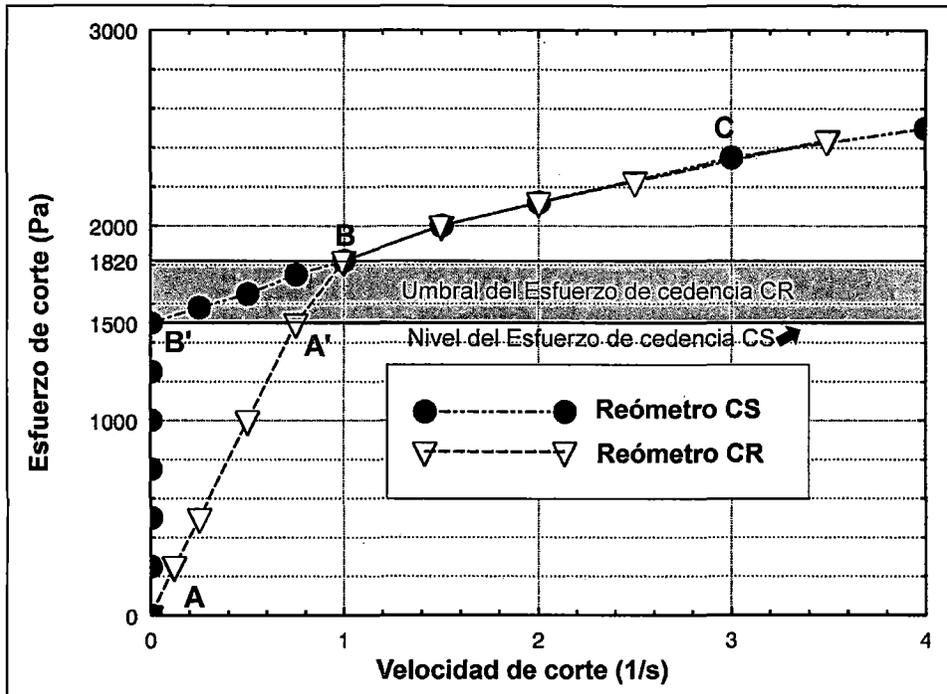


Figura 4. 28. Rango donde se ubica el esfuerzo de cedencia.

Ref. Bib. [15]

- En el reograma resultado de la experimentación, se ubica el primer cambio de tendencia en la secuencia de datos ploteados (τ vs. $\dot{\gamma}$). Nótese el cambio en la tendencia de los datos comprendidos entre A y B respecto a los comprendidos entre B y C de la Figura 4.28.
- Este cambio en la tendencia, se encuentra a bajas velocidades de corte. Experimentalmente se encontró este valor antes de los 15 s^{-1} de velocidad de corte.
- El esfuerzo de cedencia se encuentra en el punto B', que corresponde al penúltimo dato antes del cambio en la tendencia de los resultados A', dependiendo este valor de la precisión del reómetro.
- El reómetro fabricado para esta investigación (reómetro CS), tiene una escala de ascenso con una precisión de 1 rpm, que se traduce a una precisión aproximada de 1 s^{-1} en velocidad de corte. Para el cálculo del

esfuerzo de cedencia, dicha precisión en el equipo limita su exactitud y puede reducir su valor real. Se plantea entonces calcular el esfuerzo de cedencia como un valor que se encuentre dentro del umbral CR (Figura 4.28). Considerando así el valor de dicho esfuerzo, como el promedio de los 2 últimos datos antes del cambio de tendencia en la secuencia de datos experimentales.

- Al coleccionar y procesar la información, se obtuvo para algunas muestras, ciertos datos que por un mal control en el experimento, distorsionan la tendencia en la secuencia de datos experimentales. Dicha información, que forma parte del reograma experimental, no será considerada en la formación de tendencia en la secuencia de datos a fin de no distorsionar la misma.
- Se presentan los resultados experimentales generados a baja velocidad de corte (menor a 30 s^{-1}), donde la influencia de las fuerzas viscosas es representativa en la muestra. Las tendencias se linealizan, a fin de evidenciar el cambio de las mismas, no siendo el comportamiento tácito de la secuencia de datos obtenidos en el reograma.

M-1 (Relave Cobriza Cv=35%)

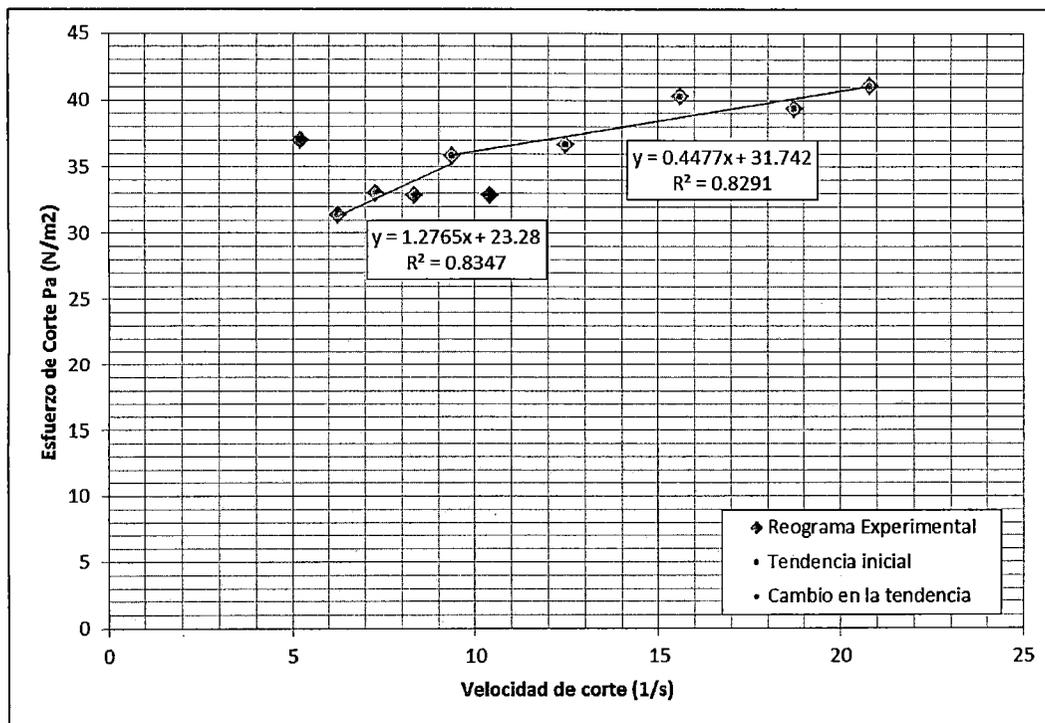


Figura 4. 29. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-1.

Fuente: Elab. propia

M-2 (Relave Cobriza Cv=40%)

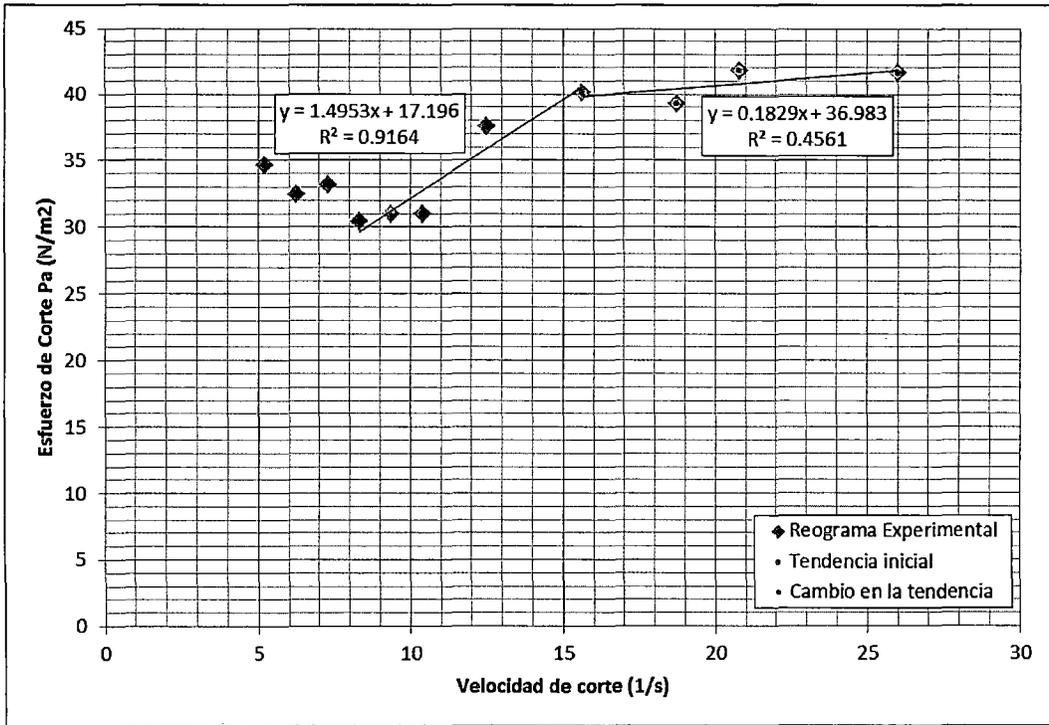


Figura 4. 30.Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-2.

Fuente: Elab. propia

M-3 (Relave Cobriza Cv=45%)

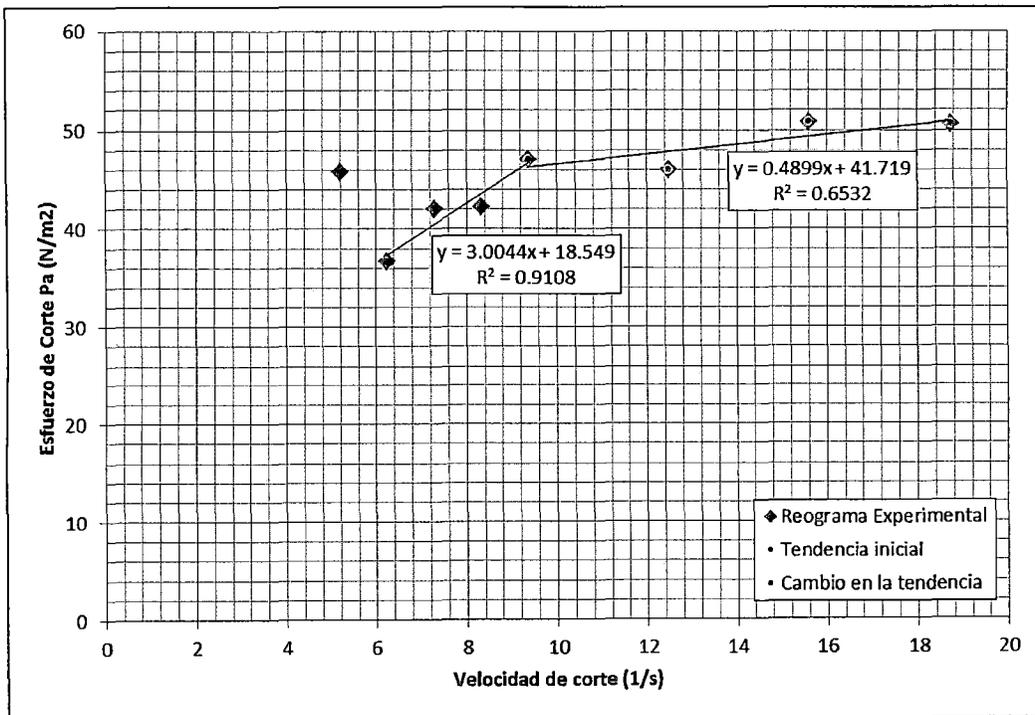


Figura 4. 31. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-3.

Fuente: Elab. propia

M-4 (Relave Cobriza Cv=50%)

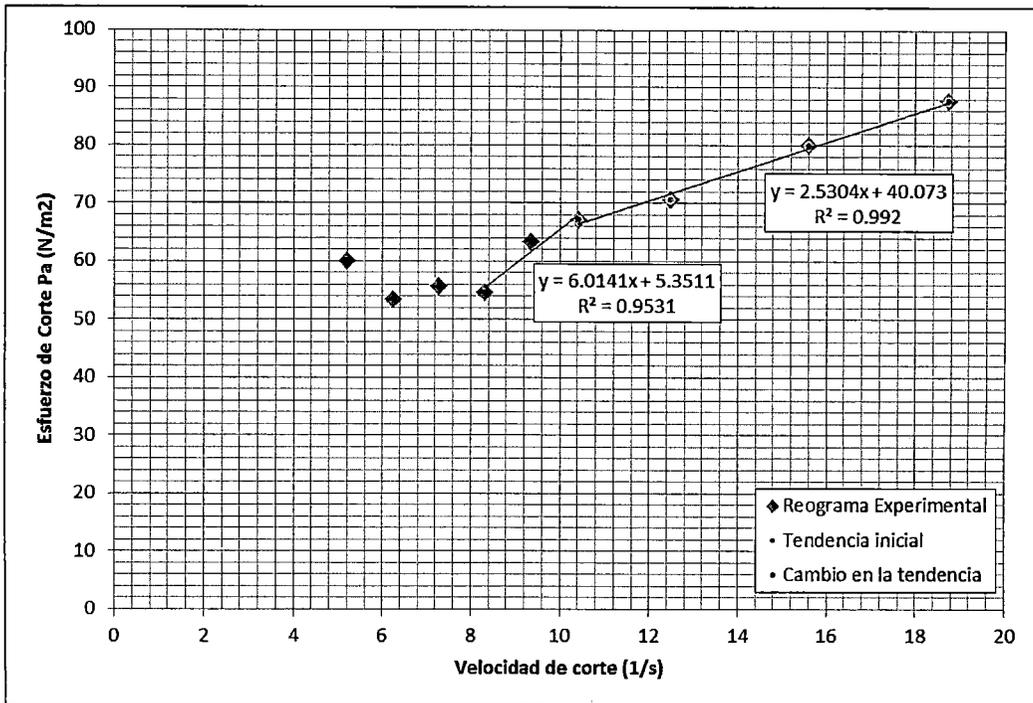


Figura 4. 32. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-4.

Fuente: Elab. propia

M-5 (Relave Volcan Cv=35%)

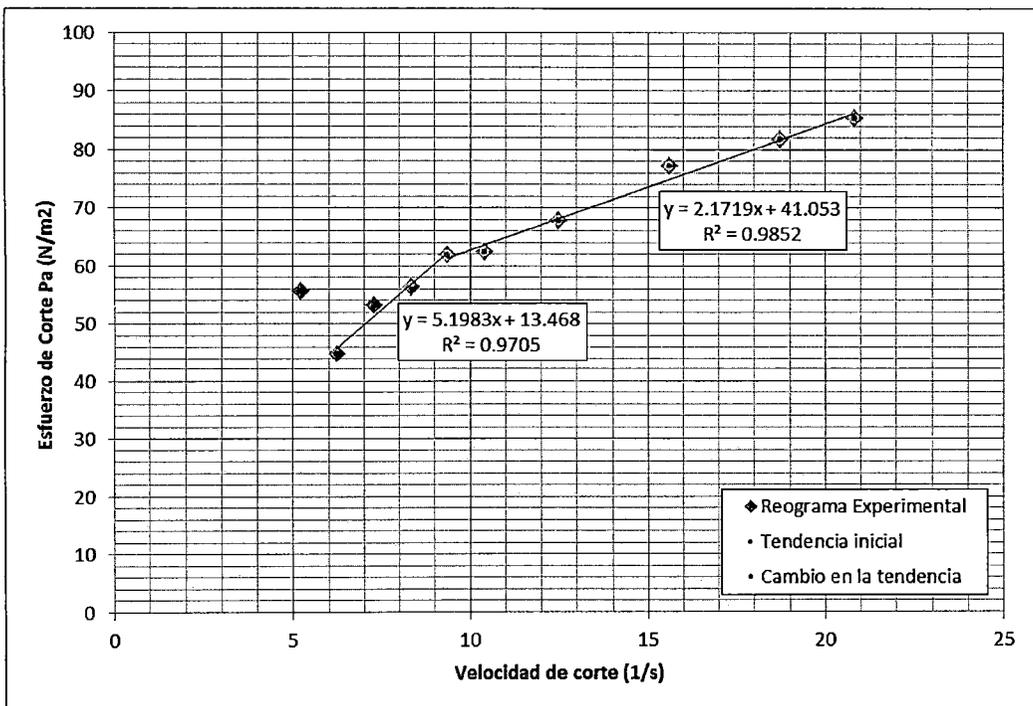


Figura 4. 33. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-5.

Fuente: Elab. propia

M-6 (Relave Volcan Cv=38%)

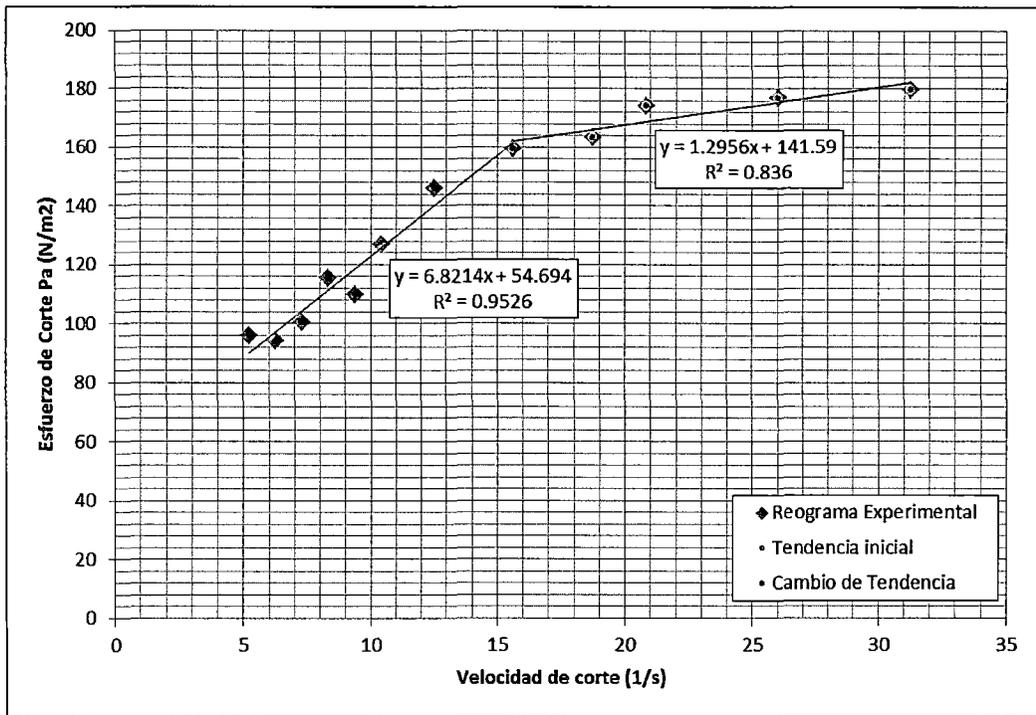


Figura 4. 34. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-6.

Fuente: Elab. propia

Muestra M-7 (Relave Volcan Cv=40%)

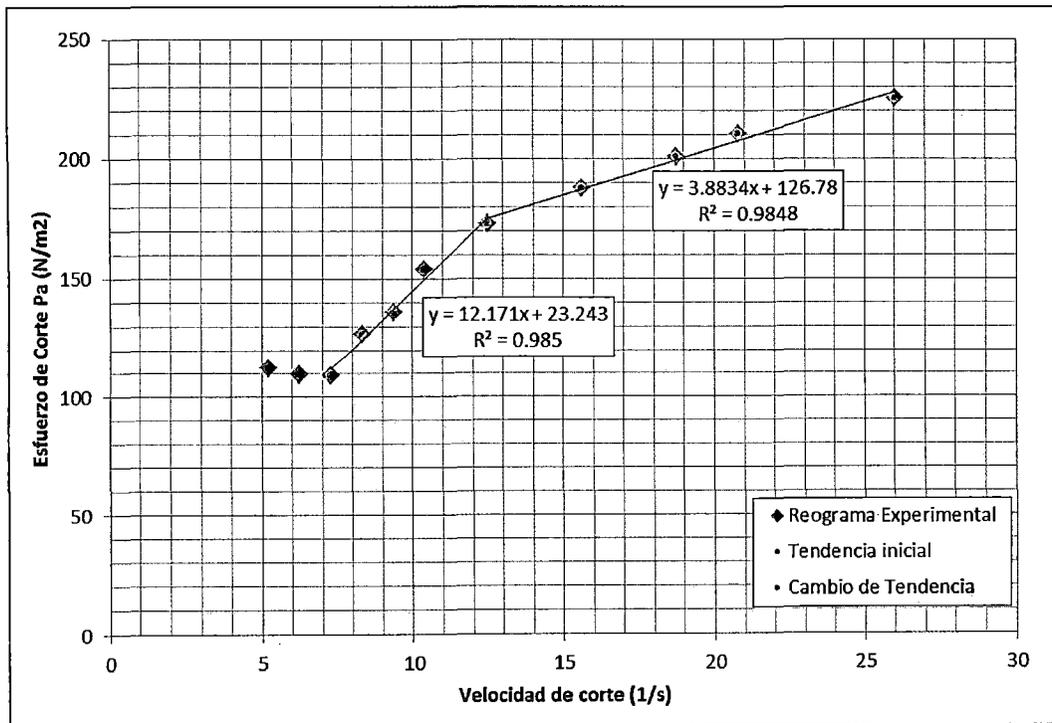


Figura 4. 35. Obtención del rango de esfuerzo de cedencia para M-7.

Fuente: Elab. propia

A continuación se presenta un cuadro resumen:

Cuadro 4. 12 Resumen de resultados de la experimentación.

ID	Muestra	Código	Concentración		Temperatura de ensayo (°C)	Rango de τ_y (N/m ²)		Esfuerzo de cedencia promedio τ_y (N/m ²)	pH
			En volumen Cv (%)	En peso Cw (%)					
1	Cobriza	M-1	35.00	63.97	26.9	32.81	35.82	34.31	6.84
2		M-2	40.00	69.40	27.1	37.53	40.13	38.83	6.68
3		M-3	45.00	72.60	27.8	42.20	47.08	44.64	6.57
4		M-4	50.00	75.60	27.8	63.28	67.13	65.21	6.56
5		M-9	55.00	79.11	---	---	---	---	---
6	Volcan	M-5	35.00	56.08	27.8	56.23	62.38	59.31	7.07
7		M-6	38.00	59.15	28.7	146.09	159.60	152.85	7.06
8		M-7	40.00	60.77	28.2	153.79	172.87	163.33	7.02
9		M-8	45.00	65.50	---	---	---	---	---

Fuente: Elab. propia

4.5.2 Análisis de concentración vs. Esfuerzo de cedencia

En el estudio del comportamiento del flujo hiperconcentrado, es importante analizar la variación del esfuerzo de cedencia en función de la concentración del flujo (concentración en peso). Se analizan los resultados de las muestras para cada uno de los relaves experimentados.

Para el relave Cobriza se presentan a continuación:

Cuadro 4. 13 Concentración y Esfuerzos de cedencia Relave Cobriza.

ID	Código	Temperatura de ensayo (°C)	Concentración en volumen Cv (%)	Concentración en peso Cw (%)	Esfuerzo de cedencia τ_y (N/m ²)
1	M-1	26.9	35	63.97	34.05
2	M-2	27.1	40	69.40	38.83
3	M-3	27.8	45	72.60	44.64
4	M-4	27.8	50	75.60	65.21

Fuente: Elab. propia

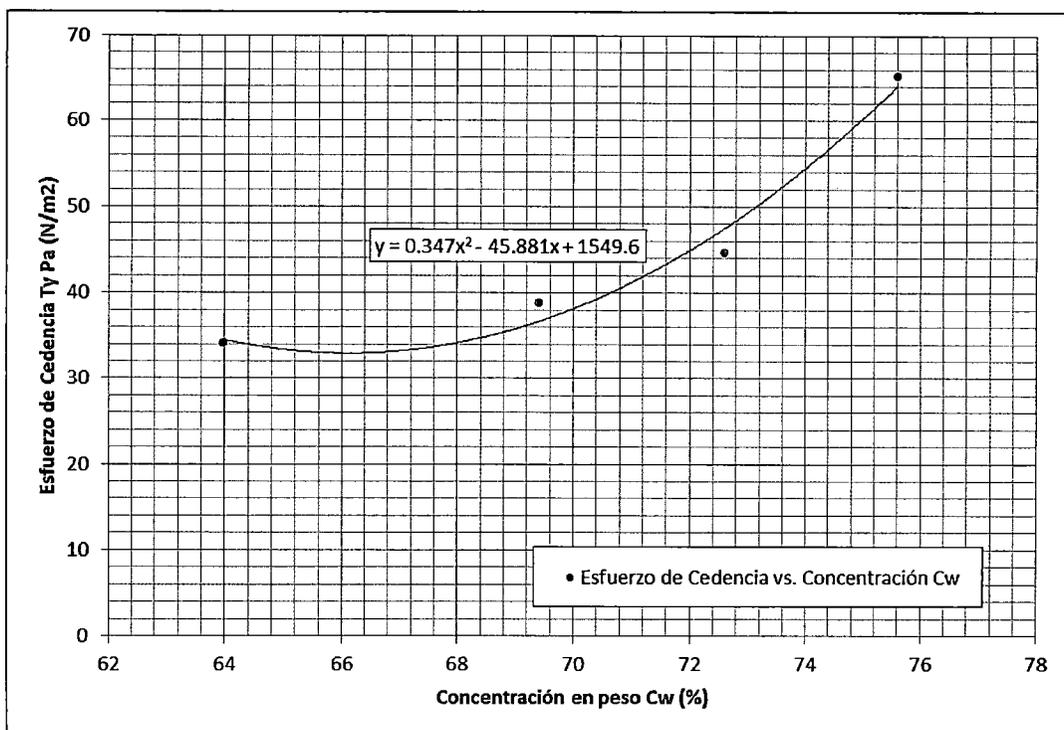


Figura 4. 36. Esfuerzo de cedencia - C_w. Relave Cobrizo.

Fuente: Elab. propia

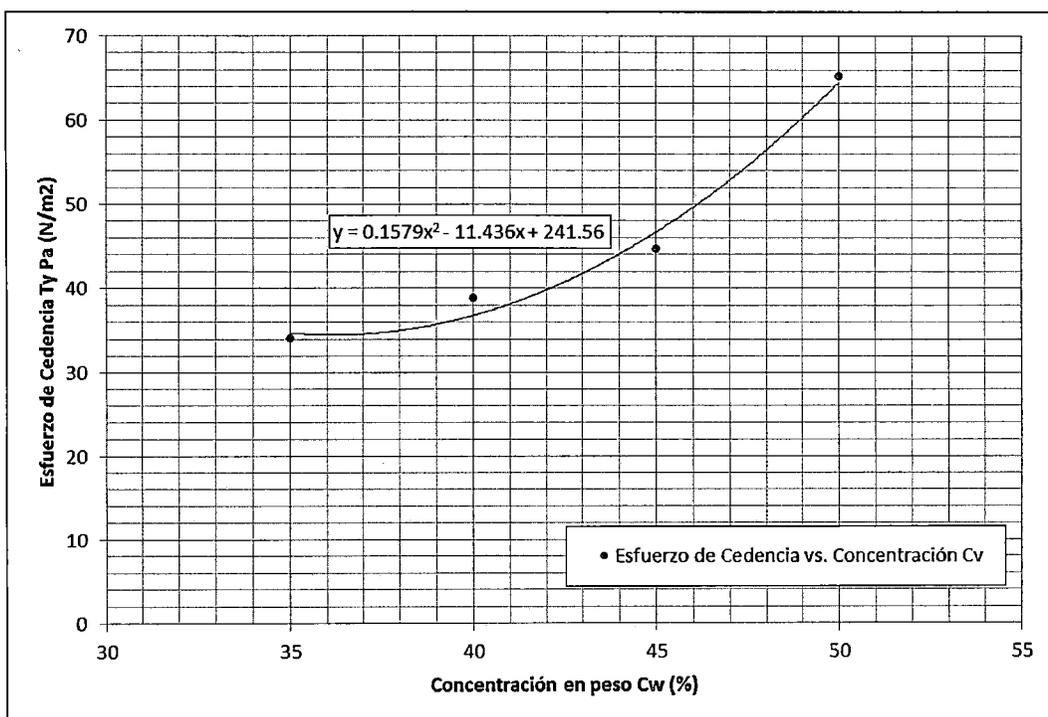


Figura 4. 37. Esfuerzo de cedencia - C_v. Relave Cobrizo.

Fuente: Elab. propia

Las curvas observadas en la Figura 4.36 y Figura 4.37 indican un comportamiento de tendencia creciente en el esfuerzo de cedencia ante concentraciones que se aproximan al límite superior del rango caracterizado para este flujo hiperconcentrado a través de las muestras analizadas. Proporcionalmente, se observa que a mayor concentración en volumen, la variación del esfuerzo de cedencia se incrementa.

Los resultados del relave Volcan se presentan a continuación:

Cuadro 4. 14 Concentración y Esfuerzos de cedencia Relave Volcan.

ID	Código	Temperatura de ensayo (°C)	Concentración en volumen C_v (%)	Concentración en peso C_w (%)	Esfuerzo de cedencia τ_y (N/m ²)
1	M-5	27.8	35	56.08	59.31
2	M-6	28.7	38	59.15	152.85
3	M-7	28.2	40	60.77	163.33

Fuente: Elab. propia

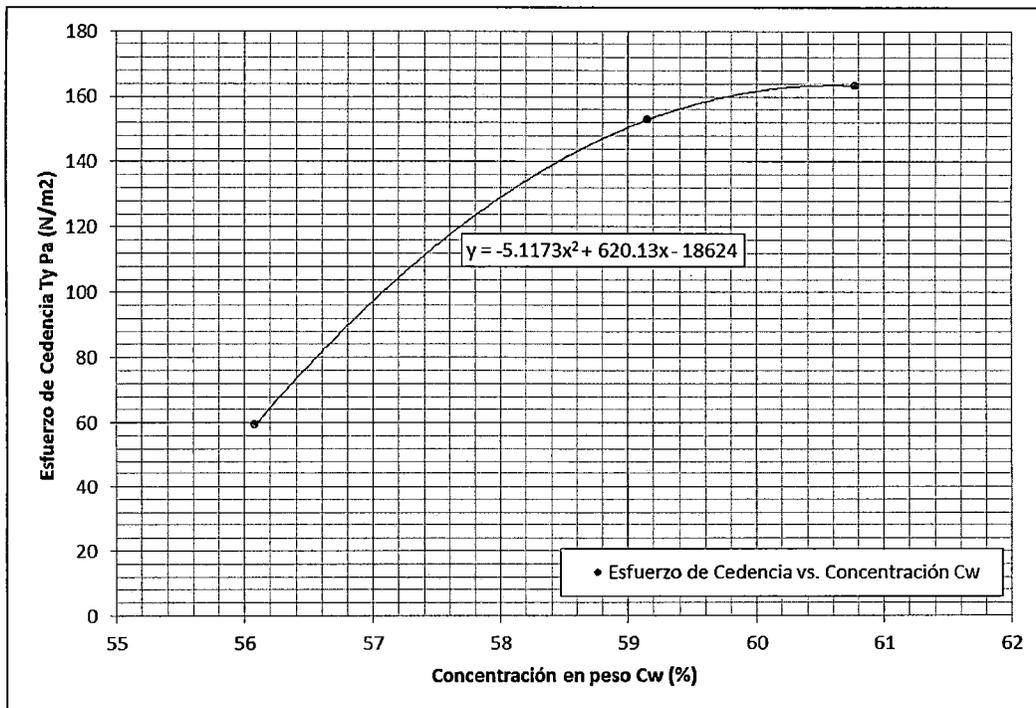


Figura 4. 38. Esfuerzo de cedencia - C_w . Relave Volcan.

Fuente: Elab. propia

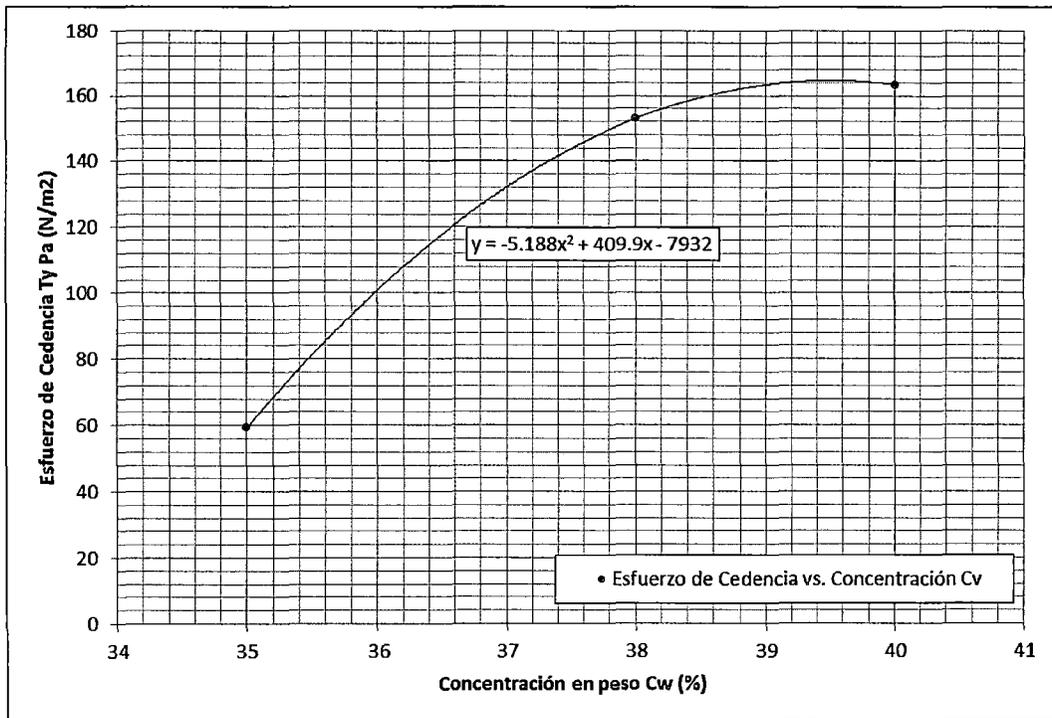


Figura 4. 39. Esfuerzo de cedencia – C_v . Relave Volcan.

Fuente: Elab. propia

Las curvas observadas en la Figura 4.38 y Figura 4.39 indican un comportamiento de tendencia creciente que proporcionalmente, a una mayor concentración, la variación del esfuerzo de cedencia se reduce.

4.5.3 Análisis de concentración (c_w) vs. pH del fluido

Con la finalidad de mostrar la tendencia en el comportamiento químico de las mezclas fluidas, preparadas a diferentes concentraciones, se comparan los resultados de concentración en peso versus el pH de la mezcla.

Los resultados obtenidos para el relave Cobriza se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 4. 15 Concentración y pH Relave Cobriza.

ID	Código	Concentración en peso C_w (%)	pH
1	M-1	63.97	6.84
2	M-2	69.40	6.68
3	M-3	72.60	6.57
4	M-4	75.60	6.56

Fuente: Elab. propia

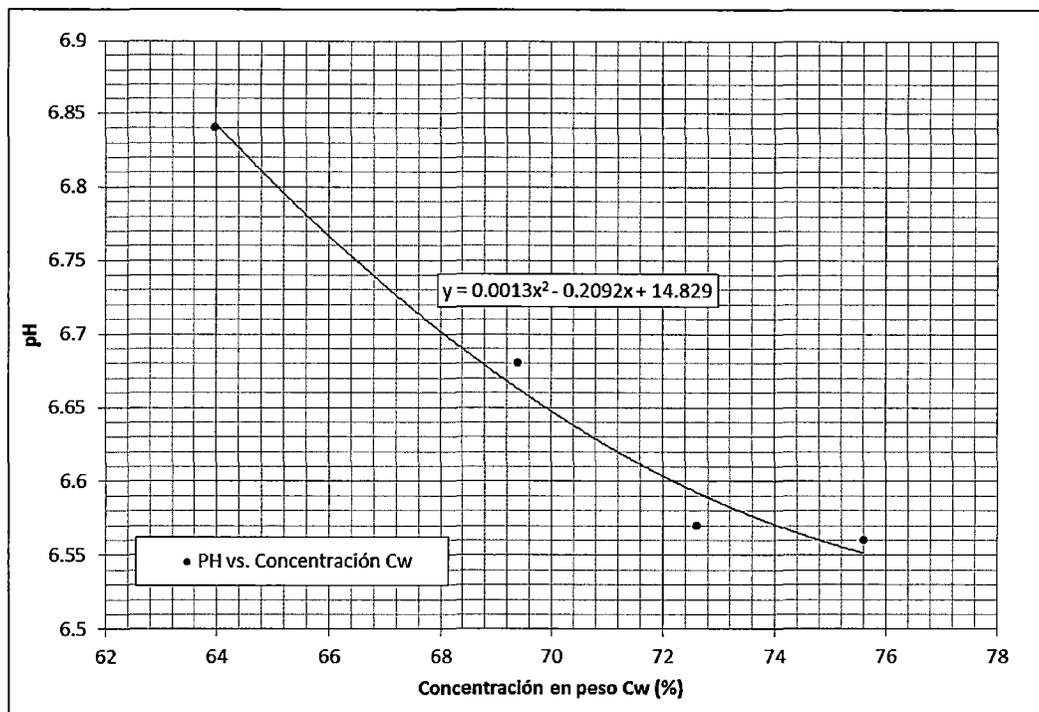


Figura 4. 40. pH vs. Concentración en peso, Relave Cobriza.

Fuente: Elab. propia

Puede observarse que el flujo hiperconcentrado (siendo M-1 y M-4 la menor y mayor concentración analizada respectivamente), incrementa su índice de acidez, a medida que aumenta la concentración, lo que caracteriza al relave como ácido (pH menor a 7).

Se demuestra dependencia entre ambas variables, pues al aumentar la concentración en peso, aumenta también la acidez de la muestra.

Los resultados obtenidos para el relave Volcan se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 4. 16 Concentración y pH Relave Volcan.

ID	Código	Concentración en peso Cw (%)	PH
1	M-5	56.08	7.07
2	M-6	59.15	7.06
3	M-7	60.77	7.02

Fuente: Elab. propia

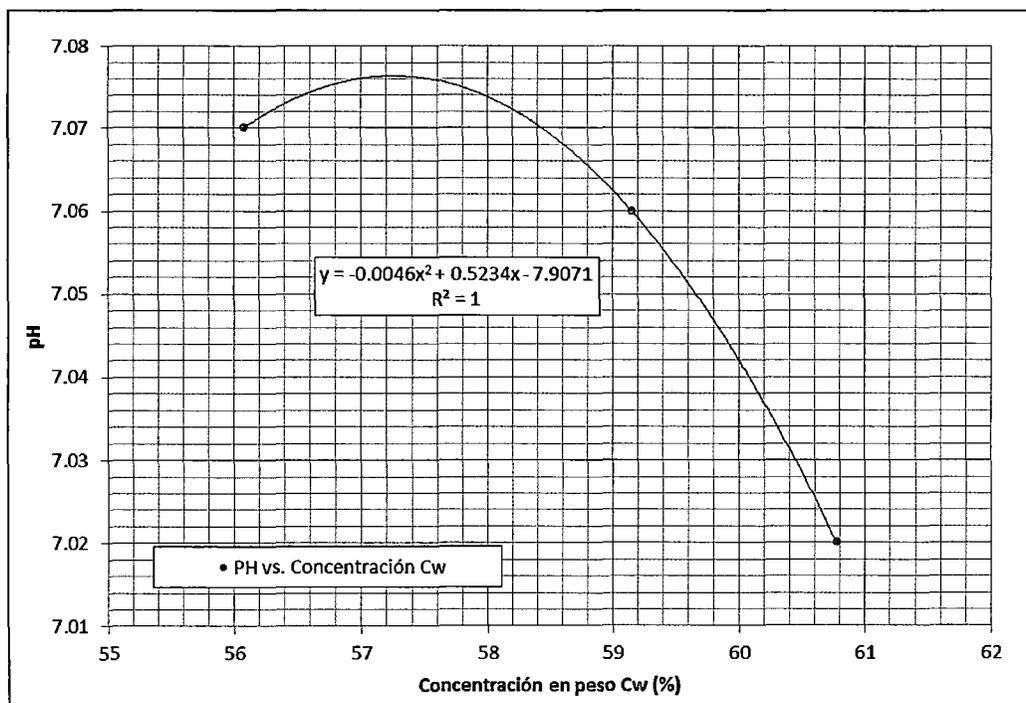


Figura 4. 41. pH vs. Concentración en peso, Relave Cobriza.

Fuente: Elab. propia

Puede observarse que el flujo hiperconcentrado (siendo M-5 y M-7 la menor y mayor concentración analizada respectivamente), disminuye su índice de basicidad, a medida que aumenta la concentración, aproximándose a una concentración neutra.

Tácitamente, sin considerar otros parámetros, el relave de Cobriza, que presenta un índice ácido respecto al relave de Volcan, caracterizado como básico cercano al neutro, presenta una menor viscosidad comparativa, que permitió realizar los ensayos reológicos a una mayor concentración.

4.6 MODELAMIENTO REOLÓGICO

Con el resultado de la experimentación reológica, se realizó un análisis de regresión, a fin de simular su comportamiento a un modelo reológico desarrollado.

Por tratarse de flujos hiperconcentrados (relaves mineros), se optó por ajustar los resultados al modelo reológico del flujo plástico de Bingham y al modelo reológico de O'Brien y Julien, los cuales se describen en el capítulo I, Ítem 1.2.7

Modelos reológicos. Ambos modelos consideran un esfuerzo inicial generador de flujo y se asocian al modelamiento del flujo de lodos.

4.6.1 Modelamiento según el Flujo Plástico de Bingham

Según este modelamiento, el comportamiento reológico de un flujo hiperconcentrado, obedece las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \tau_{yx} &= -\mu_0 \frac{dv_x}{dy} \pm \tau_0 & \text{si } |\tau_{yx}| > \tau_0 \\ \frac{dv_x}{dy} &= 0 & \text{si } |\tau_{yx}| < \tau_0 \end{aligned} \quad \dots \text{ (Ec. 4. 1)}$$

Donde τ_0 es el esfuerzo mínimo que genera el flujo, asociado en este caso al esfuerzo de cedencia τ_y y μ_0 se asocia a una viscosidad dinámica constante μ en el rango plástico del flujo bajo una tendencia lineal luego de superar el esfuerzo de cedencia τ_y . La Ec. 4.1 puede escribirse entonces como:

$$\begin{aligned} \tau &= \mu \frac{dv}{dy} + \tau_y & \text{si } |\tau| > \tau_y \\ \frac{dv}{dy} &= 0 & \text{si } |\tau| < \tau_y \end{aligned} \quad \dots \text{ (Ec. 4. 2)}$$

En esta simulación se consideran como variables de regresión a la viscosidad dinámica μ y al esfuerzo de cedencia τ_y .

Los valores experimentales a simular, son aquellos donde el comportamiento del flujo se rige por la interacción de fuerzas viscosas (tendencia creciente del esfuerzo de corte). Según el resultado de los reogramas este comportamiento se da aproximadamente hasta los 30 s^{-1} en velocidad de corte.

En el cuadro siguiente se presentan los datos experimentales utilizados en una primera simulación para el relave Cobriza:

Cuadro 4. 17. Datos experimentales - Condición μ y τ_y simulados. Relave Cobriza.

C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)
35	5.20	37.00	45	5.20	45.75
	6.24	31.32		6.24	36.72
	7.28	33.02		7.28	42.00
	8.33	32.81		8.33	42.20
	9.37	35.82		9.37	47.08
	10.41	32.88		10.41	35.91
	12.49	36.71		12.49	45.97
	15.61	40.30		15.61	50.79
	18.73	39.31		18.73	50.57
	20.81	41.04		20.81	57.22
	26.02	38.39		26.02	63.58
31.22	44.73	31.22	67.22		

C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)
40	5.20	34.64	50	5.20	59.91
	6.24	32.48		6.24	53.29
	7.28	33.14		7.28	55.68
	8.33	30.41		8.33	54.62
	9.37	30.97		9.37	63.28
	10.41	30.96		10.41	67.14
	12.49	37.53		12.49	70.50
	15.61	40.13		15.61	79.97
	18.73	39.29		18.73	87.52
	20.81	41.76		20.81	96.50
	26.02	41.59		26.02	109.48
31.22	48.18	31.22	114.85		

Fuente: Elab. propia

Los resultados de la simulación realizada para el relave Cobriza, se muestra en el cuadro siguiente.

Cuadro 4. 18 Simulación de Bingham - condición μ y τ_y simulados. Relave Cobriza.

ID	Código	C_v (%)	τ_y (N/m ²) simulado	μ (Pa.s) simulado	Ec. De simulación	Correlación de regresión R ²
1	M-1	35.00	31.15	0.41	$\tau = 0.4053 \frac{dv}{dy} + 31.146$	0.70
2	M-2	40.00	28.04	0.61	$\tau = 0.6094 \frac{dv}{dy} + 28.038$	0.83
3	M-3	45.00	33.25	1.08	$\tau = 1.0832 \frac{dv}{dy} + 33.25$	0.85
4	M-4	50.00	39.55	2.55	$\tau = 2.55 \frac{dv}{dy} + 39.55$	0.97

Fuente: Elab. propia

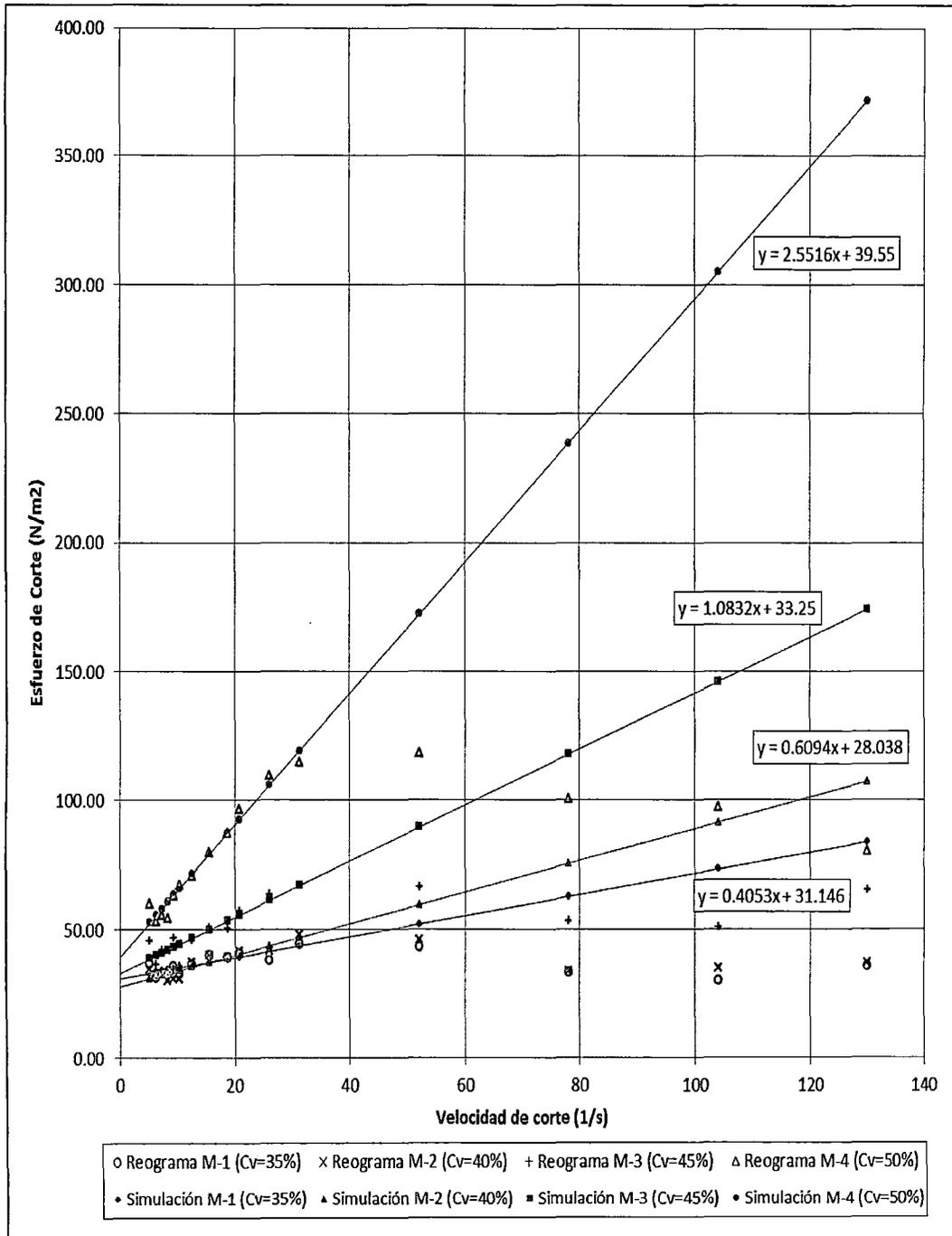


Figura 4. 42. Simulación de Bingham - condición μ y τ_y simulados. Relave Cobriza.

Fuente: Elab. propia

La comparación gráfica individual de datos experimentales y simulados para cada concentración analizada, según el modelamiento de Bingham con μ y τ_y simulados para el relave Cobriza, se muestran en el anexo A5.1

De esta simulación se puede comentar:

- La correlación de datos experimentales y simulados mejora al aumentar la concentración sólida en la mezcla, esto debido a la mayor sensibilidad del equipo reométrico para caracterizar reológicamente flujos hiperconcentrados.
- Para bajas concentraciones el resultado del esfuerzo de cedencia se muestra poco confiable, pues para una concentración volumétrica $C_v:40\%$ se obtiene un esfuerzo de cedencia simulado menor que el resultante para una concentración volumétrica $C_v:35\%$.
- Estos resultados consideran dos variables de simulación según la formulación del modelamiento. Además se consideran datos experimentales con resultados de esfuerzo menores al esfuerzo de cedencia simulado y de ahí la mayor incertidumbre en los resultados.

Del análisis reológico previo a la simulación, se conoce además del esfuerzo y velocidad de corte, el parámetro esfuerzo de cedencia. Utilizando este valor experimental, se tiene como única variable de simulación a la viscosidad dinámica. En tal contexto, la Ec. 4.2 puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \tau - \tau_y &= \mu \frac{dv}{dy} & \text{si } |\tau| > \tau_y \\ \frac{dv}{dy} &= 0 & \text{si } |\tau| < \tau_y \end{aligned} \quad \dots \text{ (Ec. 4. 3)}$$

Considerando este análisis, se entiende que el movimiento incipiente de la mezcla fluida se genera solo luego de alcanzado el valor del esfuerzo de cedencia. En tal sentido, los valores experimentales en esfuerzo de corte a simular, corresponden a todo esfuerzo mayor al esfuerzo de cedencia, de esta forma solo se simulan valores de esfuerzo positivos.

El cuadro siguiente muestra los datos experimentales a simular, bajo la consideración de la Ec. 4.3, donde el valor de τ_y es experimental y el valor de μ es simulado.

Cuadro 4. 19. Datos experimentales - Condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza.

C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)
35	9.37	35.82	45	9.37	47.08
	10.41	32.88		10.41	35.91
	12.49	36.71		12.49	45.97
	15.61	40.30		15.61	50.79
	18.73	39.31		18.73	50.57
	20.81	41.04		20.81	57.22
	26.02	38.39		26.02	63.58
	31.22	44.73		31.22	67.22
Esfuerzo de Cedencia		34.05	Esfuerzo de Cedencia		44.64

40	15.61	40.13	50	10.41	67.14
	18.73	39.29		12.49	70.50
	20.81	41.76		15.61	79.97
	26.02	41.59		18.73	87.52
	31.22	48.18		20.81	96.50
Esfuerzo de Cedencia		38.83		26.02	109.48
				31.22	114.85
Esfuerzo de Cedencia		38.83		Esfuerzo de Cedencia	

Fuente: Elab. propia

Los resultados de esta simulación se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 20. Simulación de Bingham - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza.

ID	Código	C_v (%)	τ_y (N/m ²) Experimental	μ (Pa.s) Simulado	Ec. de simulación	R ²
1	M-1	35.00	34.31	0.2867	$\tau = 0.2867 \frac{dv}{dy} + 34.31$	0.93
2	M-2	40.00	38.83	0.1556	$\tau = 0.1556 \frac{dv}{dy} + 38.83$	0.81
3	M-3	45.00	44.64	0.5138	$\tau = 0.5138 \frac{dv}{dy} + 44.64$	0.86
4	M-4	50.00	65.21	1.213	$\tau = 1.213 \frac{dv}{dy} + 65.21$	0.93

Fuente: Elab. propia

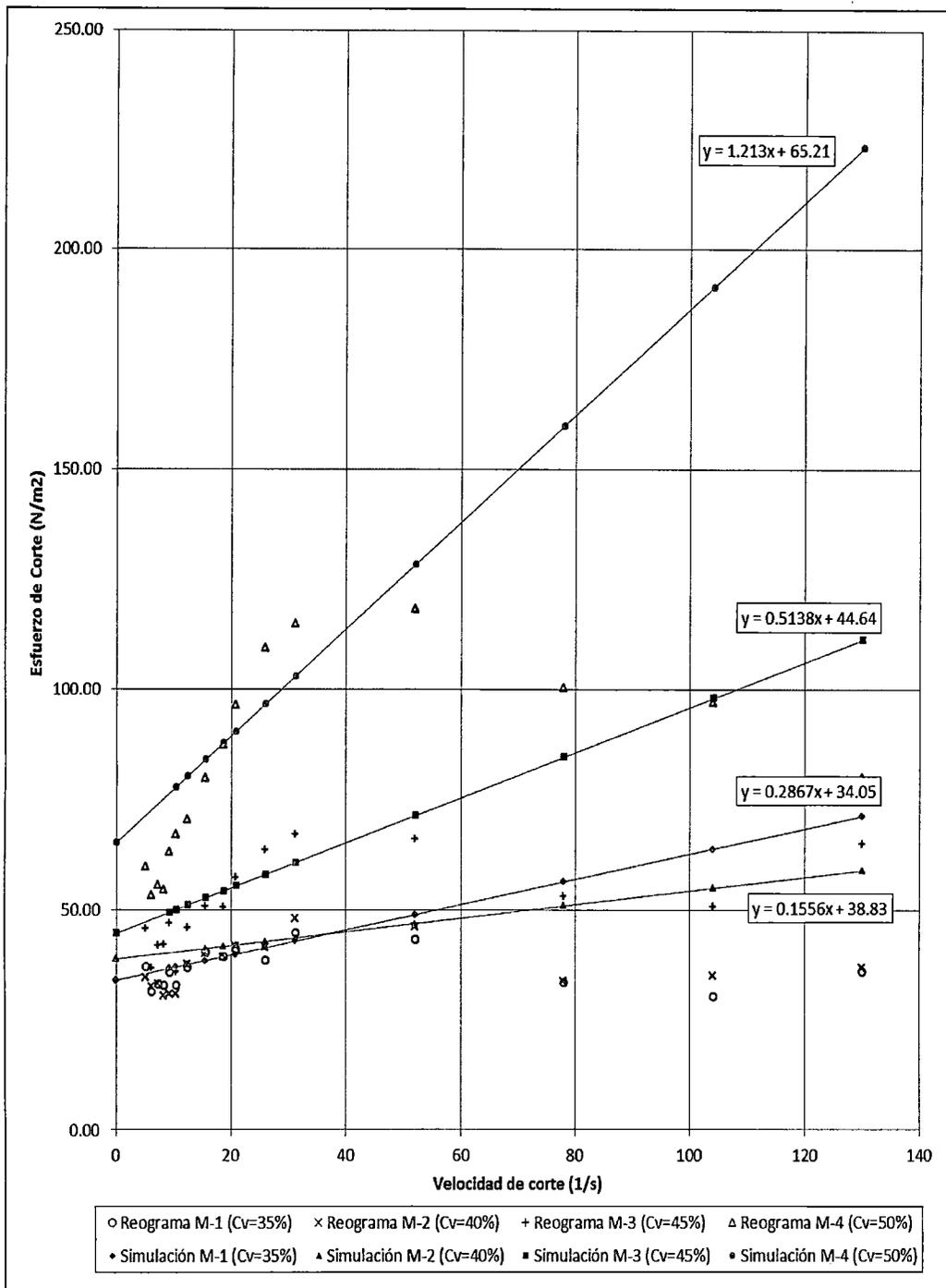


Figura 4. 43. Simulación de Bingham - Condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza.
 Fuente: Elab. Propia

La comparación gráfica individual de datos experimentales y simulados para cada concentración analizada, según el modelamiento de Bingham con μ simulado y τ_y experimental para el relave Cobriza, se muestran en el anexo A5.2

De esta simulación se puede comentar:

- Se mantiene la incertidumbre respecto a los resultados obtenidos a bajas concentraciones (C_v : 35 % y 40%), evidenciado en los resultados de viscosidad aparente. Esta condición se puede deberse a características propias del componente sólido de la mezcla, que como se comprobó en pruebas experimentales a baja concentración, se produce una rápida decantación, distorsionando en cierta medida la caracterización reológica del flujo.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS (Modelo Bingham – Relave Cobriza).

De las dos condiciones analizadas, con τ_y simulado y experimental:

- Los resultados de τ_y simulados son comparables los experimentales solo en bajas concentraciones. Para altas concentraciones, la inclusión de la data reológica con un valor de esfuerzo menor al τ_y , distorsiona en cierta medida dichos resultados, pero marcan un punto de partida en el entendimiento del esfuerzo que genera la inminencia del flujo.
- El comportamiento reológico del flujo a bajas concentraciones es incierto y requiere de mayor sensibilidad del equipo reométrico, sin embargo en ambas simulaciones se conserva la proporcionalidad directa entre el τ_y y la concentración del flujo.
- Respecto a la viscosidad dinámica, la relación de proporcionalidad entre las dos simulaciones es 2:1, siendo mayor para la condición de τ_y simulado. Esta diferencia, añade importancia al concepto de viscosidad aparente o instantánea, muy utilizada en el estudio de flujos hiperconcentrados.

Similar al procedimiento realizado, se analizaron dos escenarios de simulación con los resultados experimentales del relave Volcan. Según la Ec. 4.2 los datos experimentales de entrada para la primera simulación se presentan a continuación:

Cuadro 4. 21. Datos experimentales - Condición μ y τ_y simulados. Relave Volcan.

C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)	C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)
35	5.20	55.62	40	5.20	112.44
	6.24	44.92		6.24	109.61
	7.28	53.10		7.28	109.06
	8.33	56.24		8.33	127.04
	9.37	61.91		9.37	136.11
	10.41	62.38		10.41	153.80
	12.49	67.73		12.49	172.87
	15.61	77.11		15.61	187.95
	18.73	81.69		18.73	201.03
	20.81	85.36		20.81	210.63
	26.02	98.32		26.02	225.13
	31.22	96.88		31.22	235.27

C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)
38	5.20	96.02
	6.24	94.30
	7.28	100.42
	8.33	115.42
	9.37	109.97
	10.41	126.86
	12.49	146.10
	15.61	159.60
	18.73	163.34
	20.81	174.16
	26.02	176.78
	31.22	179.69

Fuente: Elab. Propia

Los resultados de la simulación según el modelo plástico de Bingham con μ y τ_y simulados se muestran a continuación:

Cuadro 4. 22 Simulación de Bingham - condición μ y τ_y simulados. Relave Volcan.

ID	Código	C_v (%)	τ_y (N/m ²) simulado	μ (Pa.s) simulado	Ec. De simulación	Correlación de regresión R ²
1	M-5	35.00	37.60	2.35	$\tau = 2.3545 \frac{dv}{dy} + 37.599$	0.96
2	M-6	38.00	83.69	3.72	$\tau = 3.7177 \frac{dv}{dy} + 83.689$	0.86
3	M-7	40.00	88.24	5.37	$\tau = 5.37 \frac{dv}{dy} + 8.236$	0.92

Fuente: Elab. propia

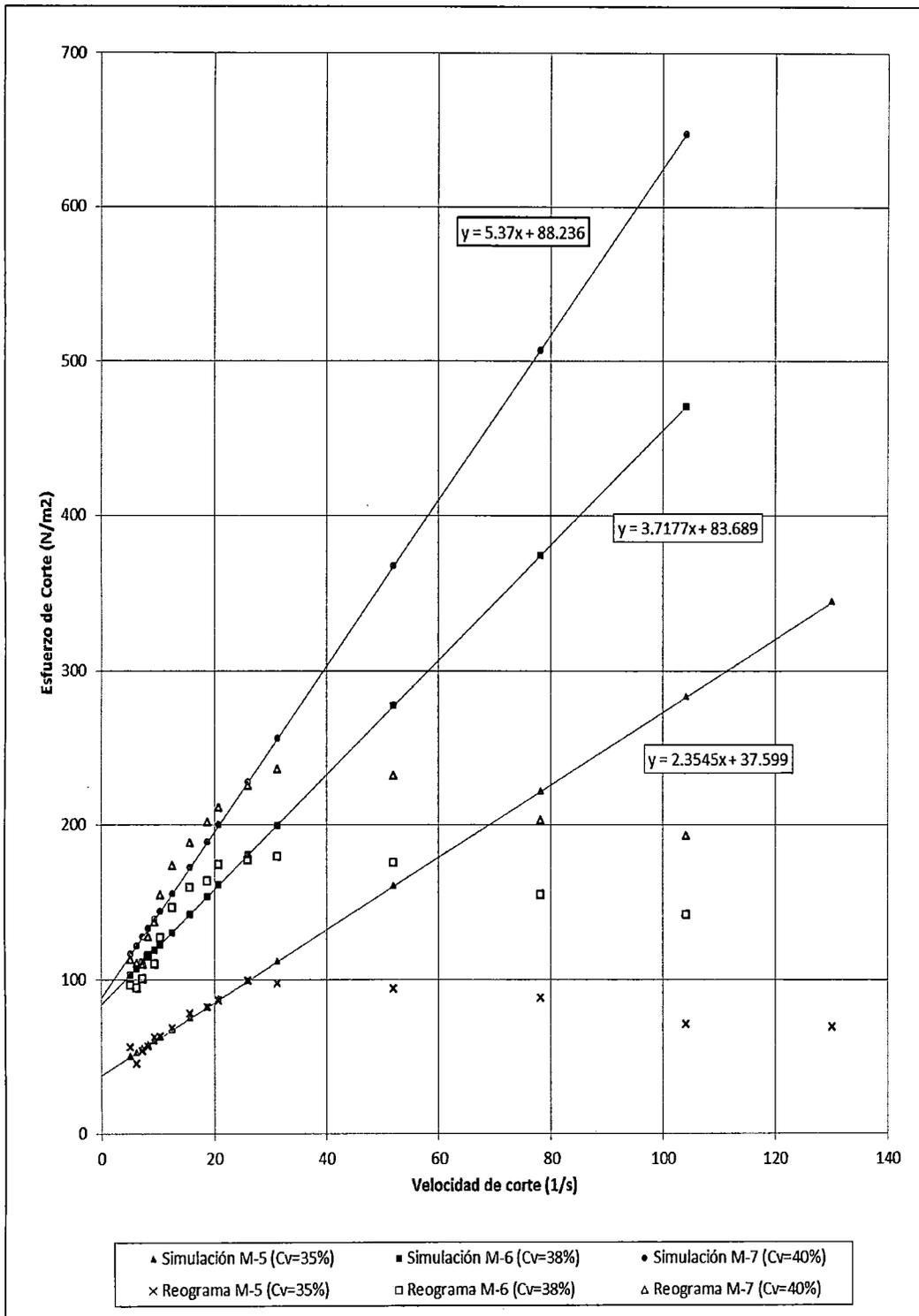


Figura 4. 44. Simulación de Bingham - condición μ y τ_y simulados. Relave Volcan.
 Fuente: Elab. propia

La comparación gráfica individual de datos experimentales y simulados para cada concentración analizada, según el modelamiento de Bingham con μ y τ_y simulados para el relave Volcan, se muestran en el anexo A5.3

De la simulación realizada se puede comentar:

- Existe una relación proporcional directa entre el esfuerzo de cedencia y viscosidad dinámica que evidencian una mejor sensibilidad del equipo reométrico en la experimentación reológica.
- Las simulaciones presentan tendencias definidas y sin traslapes, lo que fue corroborado al realizar la experimentación que se desarrolló sin inconvenientes.
- Estos resultados de simulación sin embargo, generan valores de esfuerzo de cedencia relativamente bajos respecto al resultado del análisis reológico previo.

En una segunda simulación, en función a la Ec. 4.3 Se analizó el modelamiento de Bingham con μ simulado y τ_y experimental para el relave Volcan:

Cuadro 4. 23 Datos experimentales - Condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan.

C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)
35	9.37	61.91
	10.41	62.38
	12.49	67.73
	15.61	77.11
	18.73	81.69
	20.81	85.36
	26.02	98.32
Esfuerzo de cedencia		59.31

C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)
40	12.49	172.87
	15.61	187.95
	18.73	201.03
	20.81	210.63
	26.02	225.13
	31.22	235.27
	Esfuerzo de cedencia	

C_v (%)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (N/m ²)
38	15.61	159.60
	18.73	163.34
	20.81	174.16
	26.02	176.78
	31.22	179.69
Esfuerzo de cedencia		152.85

Fuente: Elab. propia

Los resultados de la simulación del modelo de Bingham con μ simulado y τ_y experimental para el relave Volcan, se muestran a continuación:

Cuadro 4. 24 Simulación de Bingham - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan.

ID	Código	C _v (%)	τ_y (N/m ²) Experimental	μ (Pa.s) Simulado	Ec. de simulación	Correlación R ²
1	M-5	35.00	59.31	1.1746	$\tau = 1.1746 \frac{dv}{dy} + 59.31$	0.91
2	M-6	38.00	152.85	0.8234	$\tau = 0.8234 \frac{dv}{dy} + 152.85$	0.95
3	M-7	40.00	163.33	2.133	$\tau = 2.133 \frac{dv}{dy} + 163.33$	0.97

Fuente: Elab. propia

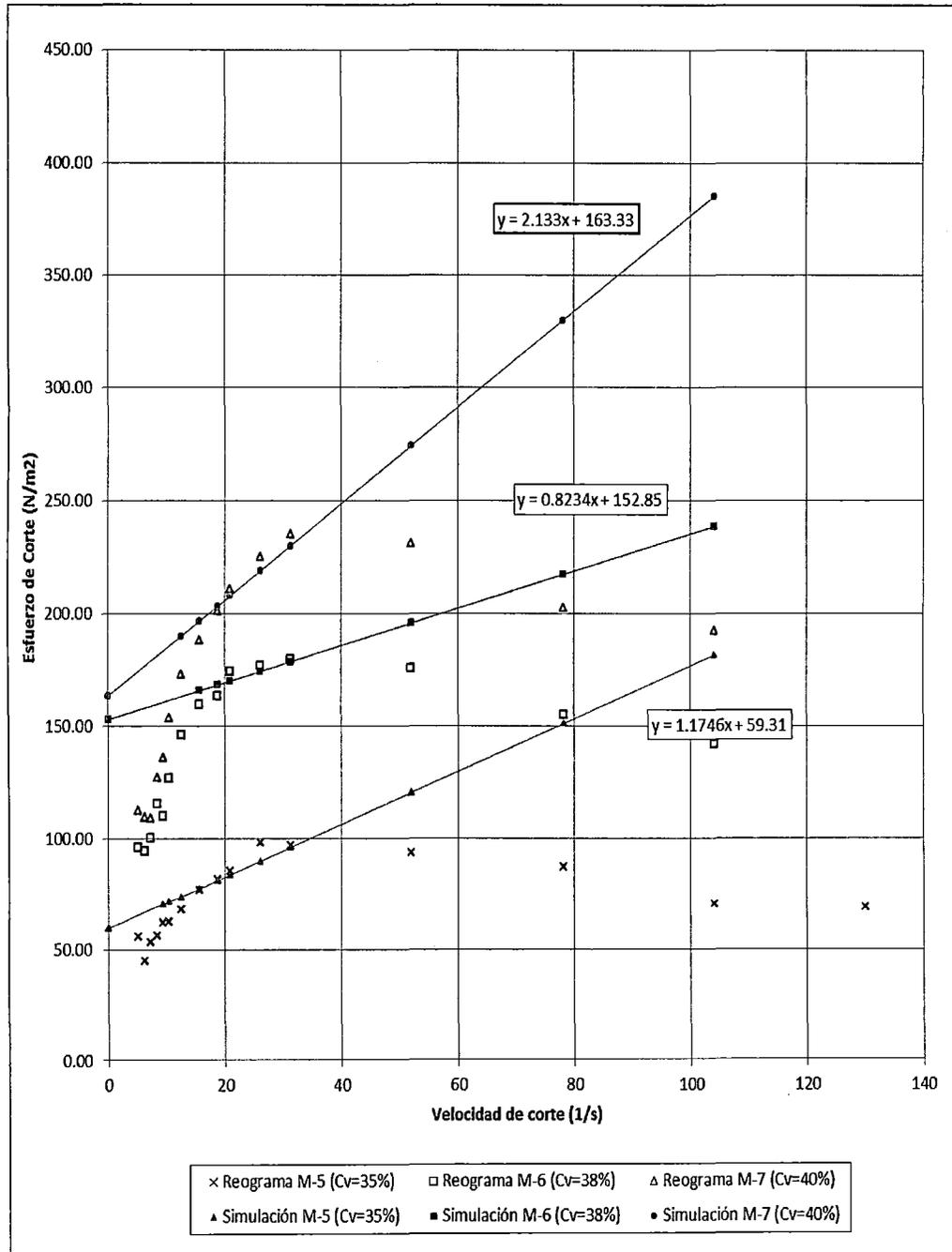


Figura 4. 45. Simulación de Bingham - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan.
 Fuente: Elab. propia

La comparación gráfica individual de datos experimentales y simulados para cada concentración analizada, según el modelamiento de Bingham con μ simulado y τ_y experimental para el relave Volcan, se muestran en el anexo A5.4

De la simulación se puede comentar:

- La inclusión del esfuerzo de cedencia como un dato conocido en la simulación, origina una distorsión en el resultado de la viscosidad dinámica. Esto se puede dar por las limitaciones en el uso de un modelo lineal para intentar caracterizar el comportamiento reológico de un flujo no newtoniano.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS (Modelo Bingham – Relave Volcan).

De las dos condiciones analizadas, con τ_y simulado y experimental:

- Los resultados de τ_y simulados no son comparables a los resultados experimentales. La alta resistencia inicial al flujo que muestra este relave distorsiona en gran medida estos resultados.
- El comportamiento reológico en ambas simulaciones está completamente definido, evidenciándose un incremento considerable del τ_y ante un incremento promedio en la concentración.
- Se reafirma la utilidad del concepto de viscosidad aparente o instantánea.

En consideración a las limitaciones del modelamiento, se realizó la simulación de los datos experimentales aplicando el modelo reológico de O'Brien y Julien, descrito en el ítem siguiente.

4.6.2 Modelamiento según O'brien y Julien

Según este modelamiento, el comportamiento reológico de un flujo, en términos de velocidad de corte (dv/dy), se describe como:

$$\tau = \tau_y + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + C \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad \dots \text{(Ec. 4. 4)}$$

Dónde:

τ_y : Esfuerzo de cedencia,

μ : Viscosidad dinámica de la mezcla,

C : Coeficiente de esfuerzos cortantes inerciales

Los resultados de la simulación del modelo O'Brien y Julien, según la Ec 4.4, para una condición de μ y τ_y simulados del relave Cobriza, utilizando los datos experimentales del Cuadro 4.17 se muestran a continuación:

Cuadro 4. 25 Simulación de O'Brien y Julien - condición μ y τ_y simulados. Relave Cobriza.

ID	Código	C _v (%)	τ_y (N/m ²) Simulado	μ (Pa.s) Simulado	C (Pa.s ²)	Modelamiento	R ²
1	M-1	35.00	30.692	0.4739	-0.002	$\tau = 30.692 + 0.48 \frac{dv}{dy} - 0.002 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.70
2	M-2	40.00	29.174	0.4377	-0.005	$\tau = 29.174 + 0.44 \frac{dv}{dy} - 0.005 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.83
3	M-3	45.00	37.244	0.4797	0.017	$\tau = 37.244 + 0.48 \frac{dv}{dy} + 0.017 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.86
4	M-4	50.00	43.149	1.81	0.03	$\tau = 30.692 + 0.48 \frac{dv}{dy} - 0.002 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.97

Fuente: Elab. propia

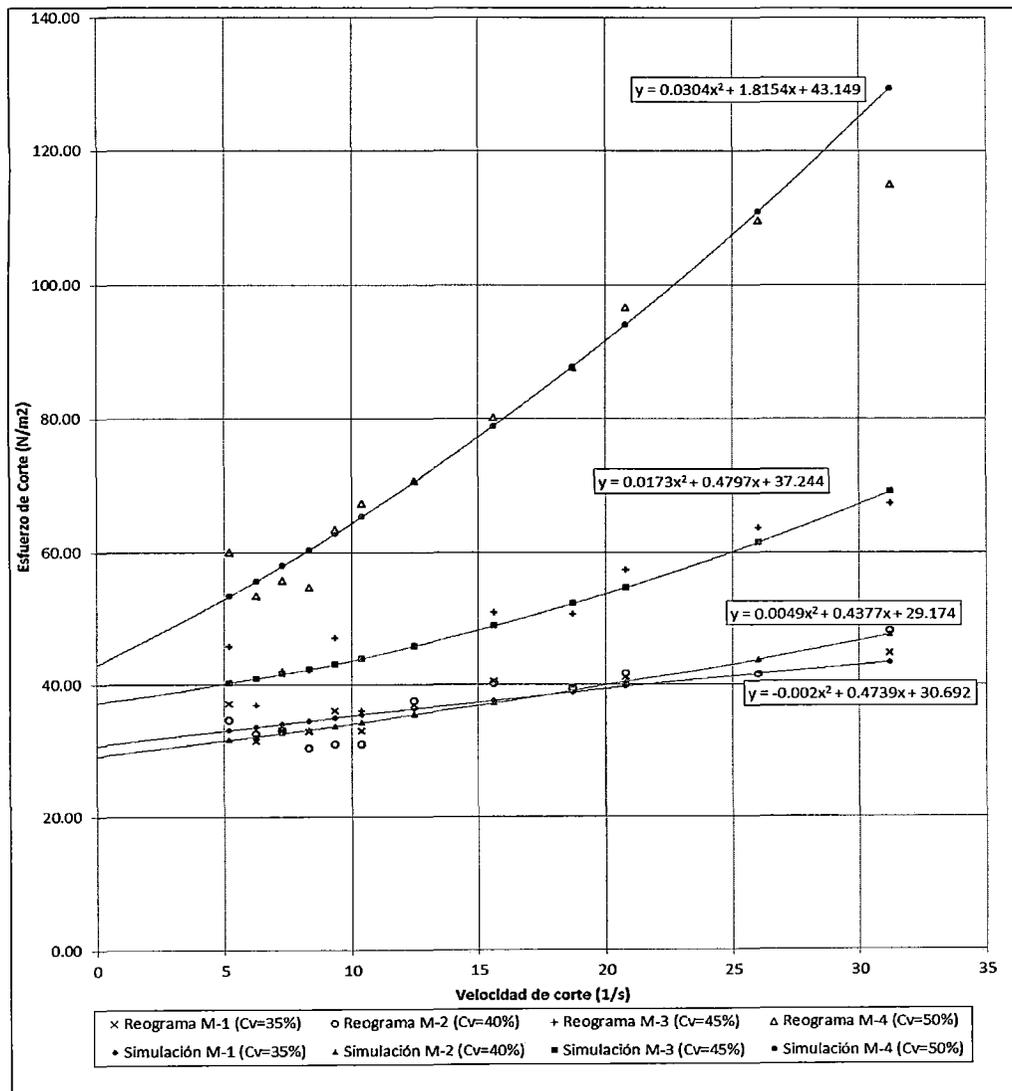


Figura 4. 46. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ y τ_y simulados. Relave Cobriza.

Fuente: Elab. propia

La comparación gráfica individual de datos experimentales y simulados para cada concentración analizada, según el modelamiento de O'Brien y Julien con μ y τ_y simulados para el relave Cobriza, se muestran en el anexo A5.5

De la primera simulación para el relave de Cobriza se puede comentar:

- En la simulación, la tendencia del comportamiento reológico que presenta este flujo, es comparable al de un flujo dilatante, donde se observa que la viscosidad dinámica aumenta al incrementar la velocidad de corte. Este comportamiento puede caracterizarse dentro del rango simulado y se marca esta tendencia al aumentar la concentración.
- Se observa además que la simulación de las concentraciones más bajas no logra caracterizarse adecuadamente. Esta deficiencia proviene de los datos experimentales, que como se explicó anteriormente, se presentó problemas en el manejo de las muestras por la rápida decantación del componente sólido.

Se analiza una segunda simulación, donde se consideran los valores de esfuerzo de corte, esfuerzo de cedencia y velocidad de corte como parámetros conocidos, que originan como variables de cálculo el valor de la viscosidad dinámica y el coeficiente de esfuerzos cortantes inerciales. La Ec. 4.4 puede escribirse como:

$$\tau - \tau_y = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + C \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad \dots \text{(Ec. 4. 5)}$$

Para la segunda simulación, que se restringe para esfuerzos de corte mayores al esfuerzo de cedencia y velocidades de corte menores a 32 s^{-1} .

Los resultados de la simulación de O'Brien y Julien, considerando μ simulado y τ_y experimental para el relave Cobriza, con los datos de entrada según el Cuadro 4. 19, se muestran a continuación:

Cuadro 4. 26 Simulación de O'Brien y Julien - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza.

ID	Código	C_v (%)	τ_y (N/m ²) Experimental	μ (Pa.s) Simulado	C (Pa.s ²)	Modelamiento	R ²
1	M-1	35.00	34.05	0.2745	0.0006	$\tau = 34.05 + 0.27 \frac{dv}{dy} - 0.0006 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.93
2	M-2	40.00	38.83	0.1437	0.0003	$\tau = 38.83 + 0.14 \frac{dv}{dy} - 0.0003 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.81
3	M-3	45.00	44.64	0.6362	-0.0034	$\tau = 44.64 + 0.63 \frac{dv}{dy} - 0.0034 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.91
4	M-4	50.00	65.21	1.4562	-0.0065	$\tau = 65.21 + 1.46 \frac{dv}{dy} - 0.0065 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.93

Fuente: Elab. Propia

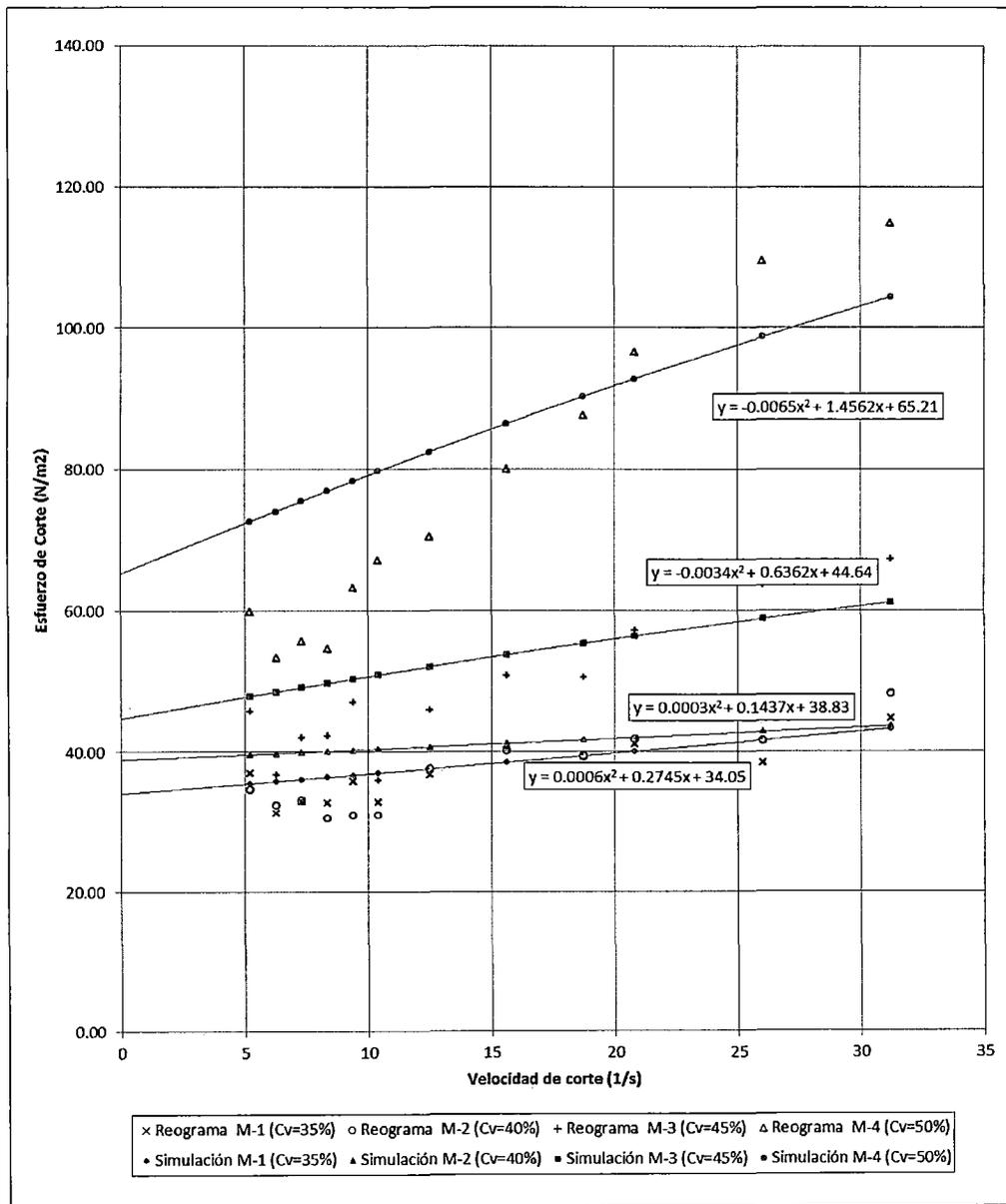


Figura 4. 47. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza.

Fuente: Elab. propia

La comparación gráfica individual de datos experimentales y simulados para cada concentración analizada, según el modelamiento de O'Brien y Julien con μ simulado y τ_y experimental para el relave Cobriza, se muestran en el anexo A5.6.

De los resultados de la simulación se puede comentar:

- Se evidencia una tendencia lineal del comportamiento del flujo en el rango modelado, donde el coeficiente de esfuerzos inerciales tiende a cero. Esto debido a la inclusión del esfuerzo de cedencia como un dato conocido en la simulación y la toma de un conjunto menor de valores.
- Comparativamente, los valores del esfuerzo de cedencia experimental y simulado, tienden a valores cercanos para flujos de baja concentración. Sin embargo para flujos de mayor concentración, el esfuerzo de cedencia obtenido por análisis de reogramas resulta ser un valor más conservador. Una mayor aproximación del esfuerzo de cedencia experimental, requiere de instrumentación reométrica técnicamente más elaborada (Reómetro CS).

COMPARACIÓN DE RESULTADOS (Modelo O'Brien y Julien – Relave Cobriza).

De las dos condiciones analizadas, con τ_y simulado y experimental:

- Los resultados de τ_y simulados solo son comparables a los experimentales en baja concentración. Sin embargo se mantiene la incertidumbre sobre el comportamiento reológico del flujo a bajas concentraciones.
- La tendencia del comportamiento según las características de un flujo dilatante se pierden al incluir en la simulación el valor del τ_y experimental y retirar algunos datos experimentales, provocando que la ecuación de simulación se linealice. En tal sentido se necesita de una cantidad mayor de información reológica, bajo una distinta condición de experimentación (reómetro CS), para validar el comportamiento más ajustado a condiciones reales del flujo.

De manera similar al desarrollo realizado en cobriza, se analiza la simulación del modelamiento de O'Brien y Julien para el relave de Volcan bajo dos

escenarios: con el esfuerzo de cedencia como variable de simulación y como dato de ingreso.

Para la primera simulación según el modelamiento de O'Brien y Julien se consideran los datos del Cuadro 4.21. Los resultados se muestran en el cuadro siguiente y en las figuras subsecuentes:

Cuadro 4. 27 Simulación de O'Brien y Julien - condición μ y τ_y simulados. Relave Volcan.

ID	Código	C_v (%)	τ_y (N/m ²) Simulado	μ (Pa.s) Simulado	C (Pa.s ²)	Modelamiento	R ²
1	M-5	35.00	35.457	2.7118	-0.0119	$\tau = 35.457 + 2.71 \frac{dv}{dy} - 0.012 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.96
2	M-6	38.00	40.818	10.196	-0.1857	$\tau = 40.818 + 10.20 \frac{dv}{dy} - 0.186 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.98
3	M-7	40.00	57.389	9.9299	-0.1275	$\tau = 57.389 + 9.93 \frac{dv}{dy} - 0.1228 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.98

Fuente: Elab. propia

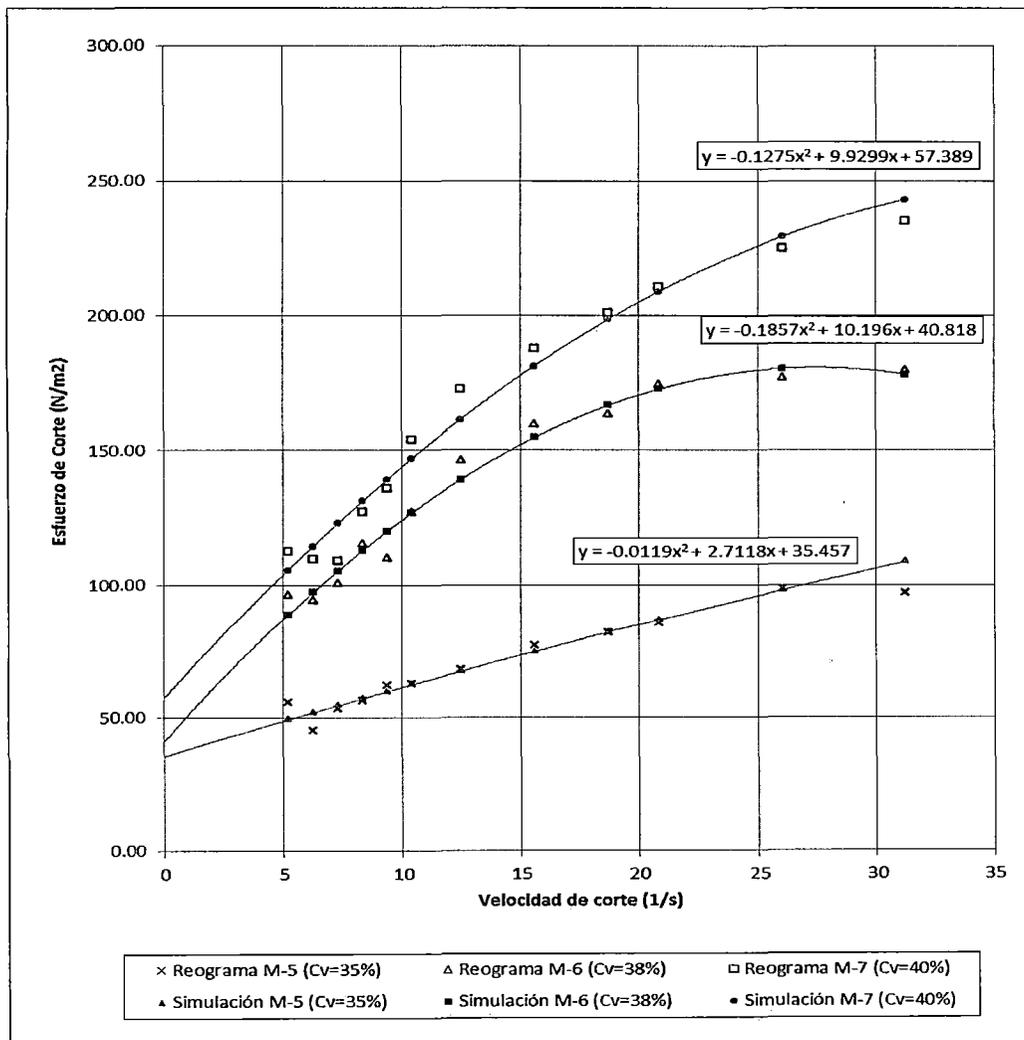


Figura 4. 48. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ y τ_y simulados. Relave Volcan.

Fuente: Elab. propia

La comparación gráfica individual de datos experimentales y simulados para cada concentración analizada, según el modelamiento de O'Brien y Julien con μ y τ_y simulados para el relave Volcan, se muestran en el anexo A5.7.

De los resultados de la simulación se observa que:

- A mayor concentración del flujo, el comportamiento característico del mismo tiende al de un flujo pseudoplástico, caracterizado por una reducción en su viscosidad cinemática al incrementar la velocidad de corte.
- Mientras que a bajas concentraciones, el comportamiento del flujo tiende a linealizar, esto debido a la menor sensibilidad del equipo reométrico en la experimentación.

En un segundo escenario propuesto, se realizó la simulación del modelo de O'Brien y Julien considerando el valor de μ simulado y τ_y experimental para el relave de Volcan, según los datos experimentales del Cuadro 4.23.

Los resultados se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 4. 28 Simulación de O'Brien y Julien - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan.

ID	Código	C_v (%)	τ_y (N/m ²) Experimental	μ (Pa.s) Simulado	C (Pa.s ²)	Modelamiento	R ²
1	M-5	35.00	59.31	0.2745	0.0274	$\tau = 59.31 + 0.27 \frac{dv}{dy} + 0.0274 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.96
2	M-6	38.00	152.85	0.3906	0.0172	$\tau = 152.85 + 0.39 \frac{dv}{dy} - 0.0172 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.97
3	M-7	40.00	163.33	0.9294	0.0492	$\tau = 163.33 + 0.93 \frac{dv}{dy} - 0.0492 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2$	0.99

Fuente: Elab. Propia

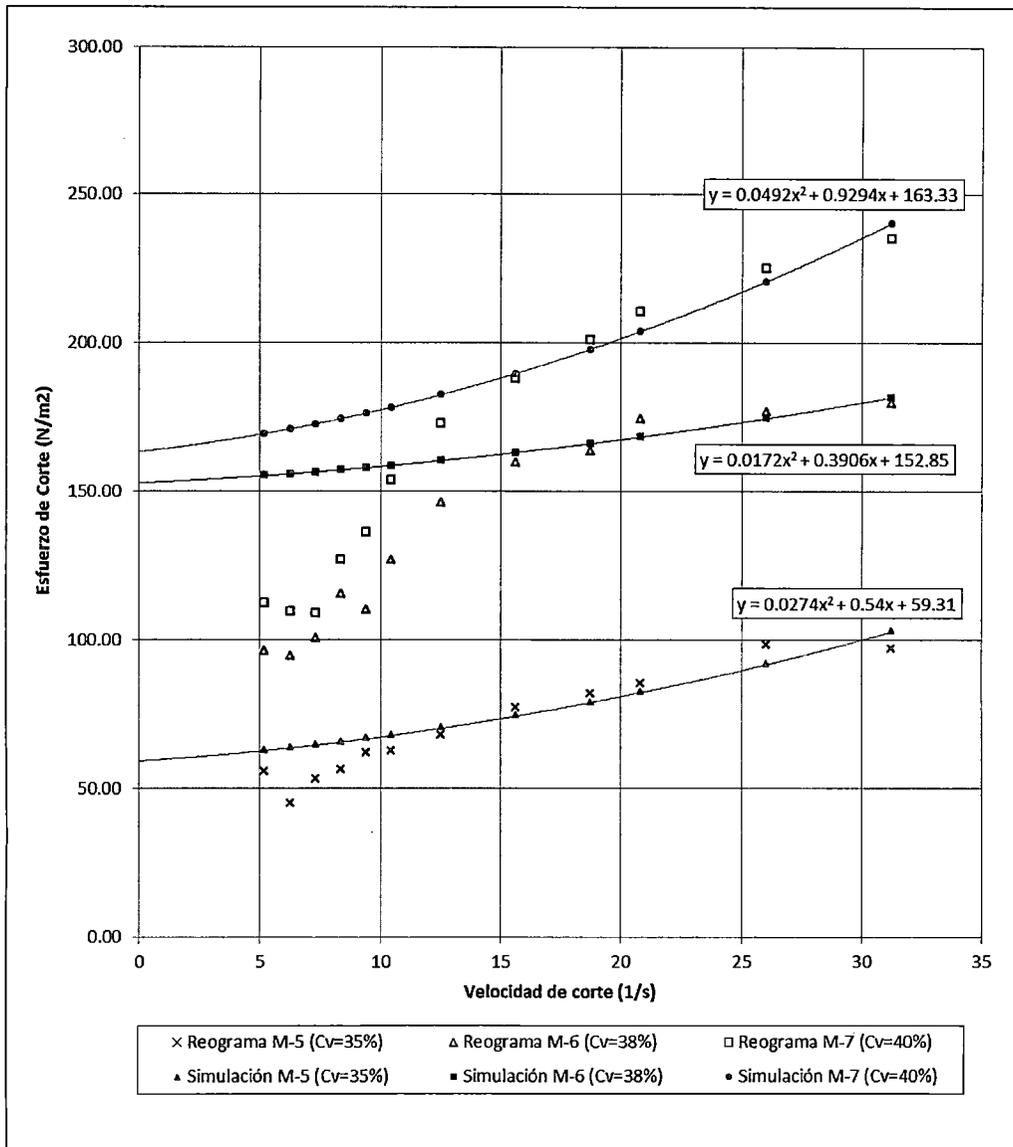


Figura 4. 49. Simulación de O'Brien y Julien - condición μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan

Fuente: Elab. Propia

La comparación gráfica individual de datos experimentales y simulados para cada concentración analizada, según el modelamiento de O'Brien y Julien con μ simulado y τ_y experimental para el relave Volcan, se muestran en el anexo A5.8.

De la simulación se puede comentar:

- La introducción de parámetro de esfuerzo de cedencia como valor experimental, altera en gran medida la tendencia del modelamiento. Esto aunado a la reducción de datos en el modelamiento produce una

distorsión de tendencia lineal. Hace falta una mayor cantidad de datos en el rango experimental para tener un mejor ajuste en la simulación.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS (Modelo O'Brien y Julien – Relave Volcan).

De las dos condiciones analizadas, con τ_y simulado y experimental:

- Los resultados de τ_y simulados no son comparables a los experimentales, esto por la inclusión de valores iniciales de esfuerzo, donde la viscosidad de las mezclas, muestra una alta resistencia al corte.
- La tendencia del comportamiento según las características de un flujo pseudoplástico con esfuerzo de cedencia, se pierde al incluir en la simulación el valor del τ_y experimental y retirar algunos datos experimentales, provocando que la ecuación de simulación caracterice el comportamiento de un flujo dilatante. En tal sentido se necesita de una cantidad mayor de información reológica, bajo una distinta condición de experimentación (reómetro CS), para validar el comportamiento más ajustado a condiciones reales del flujo.

El modelamiento plástico de Bingham, introduce un aporte sustancial al modelamiento inicial, pues es de los primeros modelos reológicos que introduce en el desarrollo de su ecuación el esfuerzo de cedencia del flujo, sin embargo al intentar explicar el comportamiento reológico del flujo en todo su desarrollo inicial, se limita al comportamiento de un flujo newtoniano y según los resultados experimentales, se confirma que el comportamiento de los flujos hiperconcentrados es de carácter no newtoniano.

En cambio la simulación de los resultados experimentales según el modelamiento de O'Brien y Julien, explica con una mejor aproximación el comportamiento del flujo en el rango viscoso, muy importante en la generación incipiente del flujo, además permite la clasificación del flujo de acuerdo al desarrollo de este (pseudoplástico o dilatante). Sin embargo no simula el comportamiento del flujo en el rango donde las fuerzas inerciales preponderan en su comportamiento.

Esta etapa del comportamiento reológico, donde gobiernan las fuerzas inerciales, es difícil de predecir y modelar, pero la importancia de su conocimiento da un

valor agregado a la generación directa del comportamiento reológico experimental del flujo, que se resume en los **reogramas**.

4.7 MECÁNICA DE FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

En este ítem se analizaron dos escenarios utilizando los datos experimentales obtenidos:

- En el primer escenario, se analizó la estabilidad de un talud construido en base al material de relaves, en el que un evento de precipitación extraordinaria, aunado a una alta infiltración del material, genera problemas de inestabilidad.
- En un segundo escenario, se analiza el flujo generado por dicha inestabilidad, aproximando el comportamiento del relave, al comportamiento mecánico del flujo de lodos.

4.7.1 Criterio de estabilidad de taludes.

Siendo un problema latente la acumulación de relaves mineros y una búsqueda constante el planteamiento para su utilización, la idea de usar este como material para la construcción de una presa de relaves obliga a definir algunos parámetros de estabilidad a tener en cuenta en el predimensionamiento y diseño de estas obras de contención.

En tal contexto, la introducción de variables desfavorables como un evento climatológico de precipitación extrema y a una alta permeabilidad del material (relave minero), conlleva a analizar cuál sería el talud recomendable en función al ángulo de reposo (experimental) de un cuerpo en reposo con tendencia a fluir.

El ángulo de reposo experimental, se determinó a partir de los ensayos para el cálculo del Slump en flujos hiperconcentrados, cuya síntesis de data utilizada se muestra a continuación:

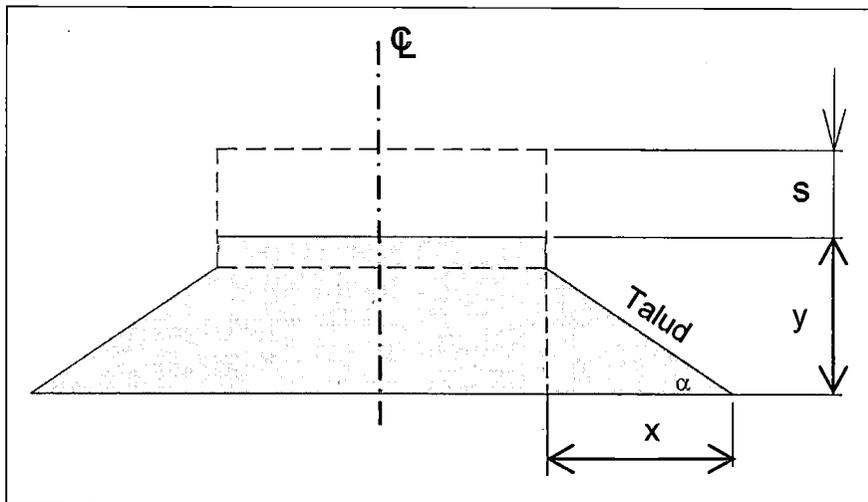


Figura 4. 50. Esquema de la prueba del Slump

Ref. Bib. [4]

Se entiende que la relación entre x (desplazamiento horizontal del flujo) e y (desplazamiento vertical del flujo), marca el talud en el que la mezcla hiperconcentrada se estabiliza. Los datos respectivos se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro 4. 29 Resultados de estabilidad – Relave cobriza.

Cw (%)	DIMENSIONES		Z aprox.	TALUD EXPERIMENTAL (1:Z)	ANGULO (α°)
	y (cm)	x (cm)			
79.01	6.86	1.32	0	muro vertical	79
77.51	4.16	5.48	1	1:1	37
76.91	2.92	7.1	2	1:2	22
74.50	1.96	15.74	8	1:8	7
74.41	1.64	16.82	10	1:10	6
70.87	1.42	18.36	13	1:13	4
67.54	0.68	26.84	39	1:39	1

Fuente: Elab. Propia

Cuadro 4. 30 Resultados de estabilidad – Relave Volcan.

Cw (%)	DIMENSIONES		Z aprox.	TALUD EXPERIMENTAL (1:Z)	ANGULO (α°)
	y (cm)	x (cm)			
55.45	4.7	4.02	1	1:1	49
53.25	2.68	7.16	3	1:3	21
51.75	2.18	9.18	4	1:4	13
51.22	1.82	9.82	5	1:5	10
50.35	1.3	12.22	9	1:9	6

Fuente: Elab. Propia

El primer resultado del relave Cobriza (cuadro 4.29), se separó del análisis, pues el desplazamiento encontrado no caracteriza el de un flujo desarrollado y estabilizado, sino más bien el de un sólido elástico deformado.

De lo obtenido, considerando una protección adecuada al talud conformado con material de relave, se recomienda un talud mínimo estable de 1:1 para ambos materiales utilizables.

4.7.2 Flujo de relaves.

Siendo el caso en el que el talud se inestabiliza por un alto contenido de humedad y se dan las condiciones para la generación del flujo hiperconcentrado, se calcularon los parámetros de generación de onda considerando un flujo del tipo laminar y el transporte de partículas en sustentación neutra.

El desarrollo de las ecuaciones que rigen el flujo de lodos se obtiene por simplificación de las ecuaciones de Navier Stokes y las de continuidad. Para tal fin, se consideró restringir el comportamiento del flujo como unidimensional y permanente en un canal prismático, permitiendo una relación de 1/20 entre la máxima altura del flujo (H) y la longitud de onda desarrollada (L) a una velocidad media (U). (Aguirre-Pe, 1995)

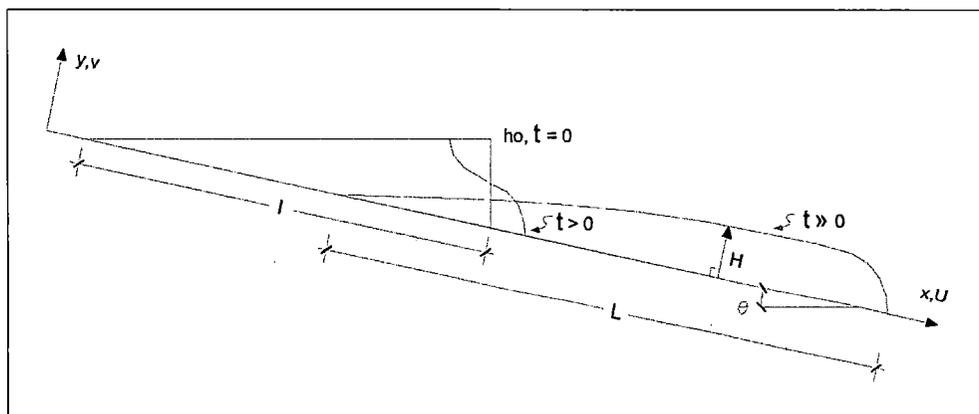


Figura 4. 51. Relación entre longitud de onda y altura de flujo

Ref. Bib. [16]

Con la finalidad de simular el flujo de relaves, es importante obtener el valor de la altura de onda (H) para el cálculo de la velocidad (U). Siendo su cálculo de cierta complejidad, la opción es realizar modelos físicos a escala y mediante filmaciones obtener dichos parámetros. Siendo estos parámetros parte de una investigación más profunda y amplia, se optó por utilizar los datos de una

investigación en flujo de lodos, donde la solución unidimensional para el flujo uniforme de lodos en un canal, se expresa en la siguiente ecuación empírica:

$$\tau - \tau_y = 3\mu \left(\frac{U}{H} \right) \quad \dots \text{ (Ec. 4. 6)}$$

De los resultados experimentales de la generación de un flujo de lodos (matriz areno arcillosa) para una altura inicial $h_0=0.10$ m. producidos en tres pendientes (S_0) diferentes, con el relave de Cobriza no se encuentra una caracterización física similar. En el caso del relave Volcan, la caracterización física de las muestras, tiene resultados cercanos a los de las matrices de lodo, sin embargo los resultados de viscosidad del relave son comparativamente mayores, lo que demuestra que limitarse a caracterizar el comportamiento reológico de flujos hiperconcentrados, con parámetros geotécnicos, es una aproximación deficiente.

Para efectuar los cálculos, entendiendo que los resultados obtenidos serán poco conservadores, se optó por considerar los resultados de la matriz de lodos A5, de mayor concentración volumétrica para para una altura inicial de $h_0=0.10$ m.

Cuadro 4. 31 Resultados experimentales en matriz A5.

Matriz	C_v (%)	H (m)	S_0 (m/m)	U (m/s)	μ (Pa.s)	ρ_m (kg/m ³)
A5	32.0	0.025	0.08	1.16	0.03	1537.23
		0.028	0.12	1.51		
		0.032	0.16	1.62		

Ref. Bib. [16]

Se muestran los resultados experimentales de la presente investigación a fin de comparar los resultados de viscosidad:

Cuadro 4. 32 Resultados experimentales de la presente investigación.

ID	Procedencia	Código	Concentración		ρ_m (kg/m ³)	μ menor (Pa.s)
			Volumen C_v (%)	Peso C_w (%)		
1	Cobriza	M-1	35.00	63.97	1806.8	0.28
2		M-2	40.00	69.40	1969.5	0.28
3		M-3	45.00	72.60	2023.3	0.50
4		M-4	50.00	75.60	2071.3	0.62
5		M-9	55.00	79.11	2172.3	--
6	Volcan	M-5	35.00	56.08	1483.6	0.53
7		M-6	38.00	59.15	1521.8	1.36
8		M-7	40.00	60.77	1534.7	1.85
9		M-8	45.00	65.50	1602.7	--

Fuente: Elab. Propia

Se analizó los resultados en el colapso de un talud inicial de altura vertical de $h_o=20$ m. Los resultados comparativos iniciales son:

Cuadro 4. 33 Resultados a escala real.

Matriz	C_v (%)	h_o (m)	H (m)	S_o (m/m)
A5	32	20	5.0	0.08
			5.6	0.12
			6.4	0.16

Ref. Bib. [16]

Haciendo uso del dato H (m) del flujo de lodos, y los resultados de esfuerzo cortante, esfuerzo de cedencia y viscosidad para las concentraciones más bajas del relave Cobriza y volcán ($C_v=35\%$ en ambos casos), se procedió a realizar los cálculos de la velocidad según la Ec. 4.6.

De igual manera, considerando una relación máxima de 1/20, entre la altura máxima del flujo (H) y la longitud de onda (L) de desarrollo, se calculó para cada caso el alcance del flujo. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. 34 Resultados de flujo para los relaves Cobriza y Volcan.

Relave cobriza $C_v= 35\% - h_o=20$ m.							
$\mu_{promedio}$ (Pa.s)	τ_{prom} (N/m ²)	τ_y (N/m ²)	$\tau_{prom} - \tau_y$	S_o (m/m)	H (m)	U (m/s)	L (m)
2.08	40.08	34.31	5.77	0.08	5.00	5.27	100.00
				0.12	5.60	5.90	112.00
				0.16	6.40	6.75	128.00
Relave Volcan $C_v= 35\% - h_o=20$ m.							
$\mu_{promedio}$ (Pa.s)	τ_{prom} (N/m ²)	τ_y (N/m ²)	$\tau_{prom} - \tau_y$	S_o (m/m)	H (m)	U (m/s)	L (m)
4.79	78.92	59.31	19.61	0.08	5.00	8.33	100.00
				0.12	5.60	9.33	112.00
				0.16	6.40	10.66	128.00

Fuente: Elab. Propia

Los resultados de velocidad, se ven afectados por la alta viscosidad en los flujos de relave, sin embargo estos sirven como una primera aproximación y un aliciente a seguir investigando sobre el comportamiento reológico de los flujos hiperconcentrados.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La investigación desarrollada se centró en tres aspectos: el desarrollo de la instrumentación reométrica, la experimentación en flujos hiperconcentrados y el análisis de los resultados obtenidos.

Sobre el desarrollo de la instrumentación reométrica:

- El equipo utilizado en la investigación muestra su limitación en la experimentación con muestras inferiores al 35% de concentración volumétrica, sin embargo, en concentraciones mayores es de aceptable performance.
- Algunas configuraciones de los discos reductores de velocidad consumen excesiva potencia del motor (configuración ineficiente), provocando limitaciones para el ensayo con muestras de mayor viscosidad.
- El reómetro desarrollado, con capacidad de variar la velocidad hasta en 1 rpm., fue suficiente para determinar experimentalmente los esfuerzos de cedencia, que para ambos relaves ensayados se encontró a bajas velocidades de rotación entre 15 y 20 rpm. (15.610 y 20.814 s^{-1} en velocidad de corte)
- El espaciamiento ente cilindros concéntricos (0.005 m.) permitió que la experimentación se realice en el rango del flujo laminar (aproximadamente hasta $\dot{\gamma} = 31.22 \text{ s}^{-1}$).

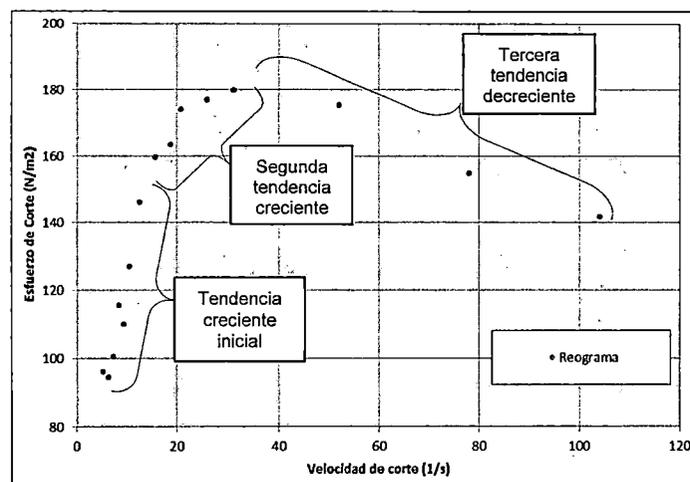
Sobre la experimentación en flujos hiperconcentrados:

- Las características particulares de cada muestra pueden limitar la experimentación, observándose resbalamiento entre la sustancia y el cilindro rotor (caso observado con $C_v=55\%$ -Relave Cobriza), o la no rotación del cilindro rotor por superar la capacidad de la potencia motriz (caso observado con $C_v=45\%$ -Relave Volcan).

- La no homogeneidad de la mezcla durante la experimentación, incide en un incremento distorsionado del esfuerzo de corte a consecuencia de la sedimentación de los sólidos (este efecto se percibió en los relaves Cobriza a baja concentración).

Análisis de resultados obtenidos:

- En todas las muestras ensayadas, se comprobó reológicamente las variadas respuestas del comportamiento no newtoniano de los flujos.
- Analizando los reogramas, al aplicar una misma velocidad de corte, se observó que el relave Volcan ofrece mayor resistencia al flujo que el relave Cobriza, inclusive para concentraciones (C_v y C_w) comparativamente menores. Esta mayor interacción viscosa (relave Volcan), aunada a su granulometría, explica en cierta medida el desarrollo de la experimentación sin inconvenientes y la obtención de resultados con mayor coherencia, aún a bajas velocidades de corte.
- A pesar de la distinta procedencia y propiedades físico químicas de los relaves, en todos los reogramas se observan tres comportamientos característicos del esfuerzo de corte: 1) una tendencia inicial con fuerte pendiente ascendente en el rango de $\dot{\gamma}$ 5 -20 s^{-1} , 2) una moderada tendencia ascendente en el rango de $\dot{\gamma}$ 20 - 35 s^{-1} y 3) una ligera tendencia descendente en el rango de $\dot{\gamma}$ 35 s^{-1} a más), siendo en las dos primeras etapas, mayor la influencia de fuerzas viscosas y en la tercera etapa mayor la influencia de fuerzas inerciales.



Tendencias del comportamiento reológico de flujos hiperconcentrados

- Del resultado comparativo (C_w) vs. (pH), se observó que a mayor concentración, las mezclas tienden a un pH ácido. El relave Volcan presentó valores básicos (7.02 - 7.07) y el relave Cobriza valores ácidos (6.56 - 6.84). Independientemente de otros parámetros, el relave Volcan resultó más viscoso que el relave Cobriza; esta relación marca un lineamiento en la búsqueda de la optimización en procesos mineros de transporte.
- El modelo de Bingham, aplicado en mezclas de ambos relaves mineros, no representan adecuadamente el comportamiento reológico no newtoniano de los flujos experimentados, sin embargo su aplicación contribuye al entendimiento del punto de cedencia del flujo.
- Según el modelamiento reológico de O'Brien y Julien, para la condición de τ_y simulado, se observó dos comportamientos diferenciados: 1) una aproximación al flujo dilatante, en el caso del relave Cobriza y 2) una aproximación al flujo pseudoplástico con punto de cedencia, en el caso del relave Volcan. Estas características particulares, son fundamentales al diseñar estructuras civiles de transporte y almacenamiento, pues una variación en su concentración, ofrece una respuesta diferente.
- De lo investigado, se evidencia claramente que cada material analizado presenta un comportamiento reológico singular y que, la interpretación de dicho comportamiento según propiedades geotécnicas o distribuciones granulométricas, no es suficiente para la adecuada caracterización al intentar predecir su modo de fluir o comportamiento viscoso no newtoniano.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda desarrollar un reómetro de mayor sensibilidad para experimentar con muestras inferiores al $C_v=35\%$, proponiéndose el mejoramiento mecánico del reómetro minimizando la fricción de los rodajes o el incremento del área de contacto con el cilindro rotor.
- La configuración sugerida para los ensayos es: M_PC/PG_DCC, M_PG/PM_DCC y M_PM/PC_DCC (véase ítem 2.1.4. Configuraciones de

rotación). Sin embargo se recomienda ensayar otras configuraciones, con la finalidad de optimizar sus resultados.

- Para una mejor estimación del esfuerzo de cedencia, se recomienda ensayar las velocidades de rotación entre 5 a 40 rpm. incrementando la velocidad de a 1 rpm.
- Conocido el comportamiento del flujo hiperconcentrado, la premisa de experimentación está en no superar la capacidad de medición del reómetro. Para esto, se recomienda modificar la geometría de los cilindros, asegurando la sensibilidad del instrumento, sin sacrificar la potencia del mismo, proponiendo la fabricación de una gama de cilindros para diferentes condiciones de experimentación.
- En reometría se recomienda desarrollar softwares que permitan la visualización de datos experimentales a tiempo real, pues así se pueden detectar anomalías propias de la experimentación instantáneamente y no hasta el post procesamiento de datos.
- Buscar que la condición de homogeneidad de la mezcla perdure un tiempo suficiente como para la toma de datos experimentales. Se recomienda tener especial atención en muestras con un porcentaje superior al 95% de granos con diámetro mayor a 0.01 mm. pues según el desarrollo experimental, los sólidos se concentran rápidamente en la base del cilindro exterior, alterando los resultados de esfuerzo cortante.
- En la experimentación con flujos de baja viscosidad (agua y aceites), se evidenció que la fuerza de empuje ejercida sobre el cilindro produce una distorsión en el intento por calcular el esfuerzo de corte asociado a cada velocidad de corte. Si bien esta distorsión no es representativa al trabajar con flujos hiperconcentrados, se recomienda realizar modificaciones incorporando cojinetes de aire al eje del cilindro rotor.
- En la fabricación de instrumentación mecánico-electrónica, para diversas finalidades, la implementación electrónica conlleva una complejidad que

usualmente eleva los costos de fabricación del equipo, dejando relegada la inversión en la parte mecánica del instrumento. Sin embargo ha de atenderse a la implementación mecánica de igual o mayor importancia que la electrónica, pues por más elaborada que sea cualquiera de estas partes, sin una adecuada implementación de la otra, el resultado final puede no satisfacer las necesidades de una correcta medición.

- Con la finalidad de ampliar el rango de observación reológica del experimento en posteriores investigaciones, se recomienda extender el rango de experimentación hasta la rotación de 1 rpm, para lo cual debe implementarse los discos reductores adecuados.
- Para resultados comparativos en muestras de diferente procedencia, se recomienda utilizar el índice de concentración en peso (C_w), pues este parámetro, aunque menos manejable, caracteriza mejor el comportamiento interno de la mezcla.
- Con la finalidad de relacionar la viscosidad y el pH de un flujo, se propone analizar reológicamente el comportamiento del mismo, comparando concentraciones similares de muestras del mismo material, a diferente medida de pH, observando sus resultados en viscosidad.
- El modelo de Bingham, debe tomarse como un punto de partida en la simulación del comportamiento reológico del flujo, pero para un mejor análisis, se recomienda la simulación de modelos no lineales asociados al comportamiento del flujo de lodos o escombros.
- Para determinar el comportamiento simulado que más se asemeja a las condiciones reales de un flujo, se recomienda la utilización de equipos reométricos con mayor precisión, tal como un reómetro de esfuerzo controlado (CS – Rheometer).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Ancey Christophe.** Introduction to Fluid Rheology. Laboratoire hydraulique environnementale (LHE), École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Écublens 2005.
- [2] **Barnes Howard A.** A handbook of elementary rheology. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. University of Wales, 2000.
- [3] **Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N.** Fenómenos de Transporte. Ed. Reverté S.A. México D.F. 1997.
- [4] **Cabrera Cabrera Juan Walter.** Relación entre Asentamiento y Esfuerzo de Cedencia en Relaves Mineros. Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, 2010 – Tesis.
- [5] **Castillo Navarro Leonardo.** Aplicación de un modelo numérico de flujos de lodo y escombros en una quebrada en el Perú. UNI, 2006 - Tesis.
- [6] **Daily James W., Donald R. F. Harleman.** Dinámica de los fluidos con aplicaciones en ingeniería. Editorial Trillas, Mexico 1975.
- [7] **Gratton Julio.** Introducción a la mecánica de fluidos. Buenos aires, 2002.
- [8] **Martí Barroso, Mireia.** Caracterización y propiedades anticorrosivas de pinturas marinas modificadas con polímeros conductores. Universidad Politécnica de Catalunya, 2005
- [9] **Merle C. Potter, David C. Wiggert, Bassem H. Ramadan.** Mecánica de fluidos. Cuarta edición, 2011.
- [10] **Molina Sánchez Alberto Aurelio.** Efectos no newtonianos de un cambiador de calor comercial de doble tubo para aplicaciones alimentarias. Escuela Politécnica Superior. Madrid, 2006.
- [11] **Moreno Botella Rodrigo.** Reología de suspensiones cerámicas. Consejo superior de investigaciones científicas. España 2005.

- [12] **Prasad Mainali Arbind, Nallamuthu Rajaratnam.** Hydraulics of debris flows a review. Water Resources Engineering Report, Department of Civil Engineering, University of Alberta. Canadá, 1991
- [13] **Ramírez Navas Juan Sebastián.** Introducción a la reología de los alimentos. Universidad del Valle. Cali – Colombia, 2006.
- [14] **Rosario Garcilazo Kenñe Benito.** Determinación de Parámetros Reológicos de Flujos Hiperconcentrados Aplicado a Relaves Mineros. UNI, 2010 – Tesis.
- [15] **Schramm Gebhard.** A Practical Approach to Rheology and Rheometry. Thermo Haake Rheology, 2nd Edition. Federal Republic of Germany, 2000.
- [16] **Suarez Alejandra, Aguirre – Pe Julian Gebhard, Guatarasma Luis, Moncada Alix.** Reología y Mecánica de Barros y Lodos. Centro de Investigaciones Hidráulicas y Mecánica de Fluidos (CHIDRA). Mérida Venezuela 2004.

ANEXOS

A.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE MUESTRAS SÓLIDAS

A1.1. Prueba del Picnómetro

Relave Cobriza

PESO ESPECIFICO DE SOLIDOS (Gs)						
A.S.T.M. - 854						
Proyecto :	Tesis: Reometría de flujos hiperconcentrados con equipo rotacional					
Realizado por:	José Carlos Mendoza Chuchón					
Ubicación:	Muestra Relave Cobriza					
Fecha :	23/01/08					
TIPO DE MUESTRA	RELAVE MINERO					
MUESTRA	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
Nº DE PICNÓMETRO	1	2	3	4	5	
1	Peso tara + peso suelo seco (gr)	133.91	133.49	134.02	133.86	134.33
2	Peso tara(gr)	34.42	35.13	34.67	34.05	34.39
3	Peso del suelo seco (1 - 2) (gr)	99.49	98.36	99.35	99.81	99.94
4	Peso picnometro + peso suelo + peso agua (gr)	415.00	416.70	414.70	423.00	430.60
5	Peso picnometro + peso del agua enrasada (gr)	342.50	345.10	342.60	350.60	357.70
6	Peso agua desplazada (3 + 5 - 4) (g)	26.99	26.76	27.25	27.41	27.04
7	Volumen de agua desplazado ((6)/Gw) (cm3)	27.26	27.03	27.53	27.69	27.31
8	Gs (3)/(7) g/cm3c	3.65	3.64	3.61	3.60	3.66

Relave Volcan

PESO ESPECIFICO DE SOLIDOS (Gs)					
A.S.T.M. - 854					
Proyecto :	Tesis: Reometría de flujos hiperconcentrados con equipo rotacional				
Realizado por:	Juan Walter Cabrera Cabrera				
Ubicación:	Muestra Relave Volcan				
Fecha :	07/02/08				
TIPO DE MUESTRA	RELAVE MINERO				
MUESTRA	M-1	M-2	M-3	M-4	
Nº DE PICNÓMETRO	1	2	3	4	
1	Peso tara + peso suelo seco (gr)	133.97	134.37	133.86	133.32
2	Peso tara(gr)	34.72	35.15	34.67	34.06
3	Peso del suelo seco (1 - 2) (gr)	99.25	99.22	99.19	99.26
4	Peso picnometro + peso suelo + peso agua (gr)	423.00	410.50	407.90	415.70
5	Peso picnometro + peso del agua enrasada (gr)	357.70	345.10	342.60	350.60
6	Peso agua desplazada (3 + 5 - 4) (g)	33.95	33.82	33.89	34.16
7	Volumen de agua desplazado ((6)/Gw) (cm3)	34.29	34.16	34.23	34.51
8	Gs (3)/(7) g/cm3c	2.89	2.90	2.90	2.88

A1.2. Análisis granulométrico por prueba del Hidrómetro

Relave Cobriza – Muestra 01

ANÁLISIS POR HIDROMETRO											
Obra _____				Ensayo: <u>1</u>							
Localización <u>Minera Cobriza</u>				Muestra N° <u>M-1</u>							
Sondeo N° _____				Descripción: <u>Relave Minero</u>							
Fecha <u>30/01/08</u>				Prof.: _____							
Realizado por: <u>José Carlos Mendoza Chuchón</u>											
FACTORES DE CORRECCIÓN						CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA					
Factor de Corrección por Gravedad Específica por defloculante						Peso total de la muestra seca al aire					
				C_{GS}	6.00	W		93.77 gr			
Factor de Corrección por menisco				C_m	2.50	Peso total de la muestra secada al horno		Ws 92.53 gr			
Factor de Corrección por Temperatura				C_T	2.70	Gravedad específica relativa de sólidos		Gs 3.65			
Factor de Corrección por Humedad				FC_w	0.99						
Factor cuando Gs no es 2.65				a	0.86						
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO											
L ₁ para lectura 0 gr/t				(L ₁) ₀	10.2 cm						
L ₁ para lectura 50 gr/t				(L ₁) ₅₀	2.1 cm						
Volumen del Bulbo				(V _b)	67 cm ³						
Area del Cilindro de Ensayo				(A)	29.22 cm ²						
Altura del Bulbo				(L _b)	14 cm						
Altura de Levantamiento				(V _g /A)	2.3 cm						
Fecha	t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)	
	0.5	0.5	28.1°	51.0	53.5	50.2	46.53	1.5	7.4	0.00980	0.0376
	1.0	1.0	28.1°	46.0	48.5	45.2	41.89	2.3	8.2	0.00980	0.0280
	1.5	1.5	28.1°	41.0	43.5	40.2	37.26	3.2	9.1	0.00980	0.0241
	2.0	2.0	28.1°	36.0	38.5	35.2	32.62	4.0	9.9	0.00980	0.0218
	5.0	5.0	28.1°	5.0	7.5	4.2	3.89	9.0	14.9	0.00980	0.0169
	15.0	15.0	28.1°	1.5	4.0	0.7	0.65	9.6	15.5	0.00980	0.0100
	30.0	30.0	28.0°	1.5	4.0	0.7	0.65	9.6	15.5	0.00982	0.0070
	60.0	60.0	28.2°	1.5	4.0	0.7	0.65	9.6	15.5	0.00979	0.0050
	120.0	120.0	28.3°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.5	0.00978	0.0035
	250.0	250.0	28.7°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.5	0.00974	0.0024
	1440.0	24 hrs	27.9°	1.5	4.0	0.7	0.65	9.6	15.5	0.00983	0.0010
	2880.0	48 hrs	28.4°	1.2	3.7	0.4	0.37	9.6	15.5	0.00977	0.0007
	4320.0	72 hrs	28.5°	0.8	3.3	0.0	0.00	9.7	15.6	0.00976	0.0006
	5760.0	96 hrs	28.6°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.5	0.00975	0.0005
	7200.0	120 hr	28.2°	0.8	3.3	0.0	0.00	9.7	15.6	0.00979	0.0005
<p>t: tiempo acumulado transcurrido en minutos Ra: lectura del hidrómetro Rm: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco $Rm = Ra + Cm$ Rc: Lectura del Hidrómetro corregido total $Rc = Rm - C_{GS} + C_T$ T: Temperatura en Grados Celsius K: Constante en función de la Temperatura y la Gravedad Específica L₁: Altura a lo largo del vástago hasta la lectura del hidrómetro L: Altura Efectiva de caída de partículas $D = K \sqrt{L/T}$ D: Diámetro de partículas en mm P: Porcentaje de suelo Remanente con diámetros menores a "D" $P(\%) = \frac{Rc \cdot a}{W_s} \cdot 100$</p>											

Relave Cobriza – Muestra 02

ANÁLISIS POR HIDROMETRO											
Obra _____											
Localización	Minera Cobriza			Ensayo:		1					
Sondeo N°	_____			Muestra N°		M-2					
Fecha	30/01/08			Descripción:		Relave Minero					
Realizado por:	José Carlos Mendoza Chuchón			Prof.:		_____					
FACTORES DE CORRECCIÓN						CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA					
Factor de Corrección por Gravedad Específica por defloculante						Peso total de la muestra seca al aire					
				C_{GS}	6.00	W		92.86 gr			
Factor de Corrección por menisco				C_m	2.50	Peso total de la muestra secada al horno		Ws			
Factor de Corrección por Temperatura				C_T	2.70	Gravedad específica relativa de sólidos		Gs			
Factor de Corrección por Humedad				FC_w	0.99			3.64			
Factor cuando Gs no es 2.65				a	0.86						
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO											
L ₁ para lectura 0 gr/lit		$(L_1)_0$		10.2		cm					
L ₁ para lectura 50 gr/lit		$(L_1)_{50}$		2.1		cm					
Volumen del Bulbo		(V_b)		67		cm ³					
Area del Cilindro de Ensayo		(A)		34.21		cm ²					
Altura del Bulbo		(L_2)		14		cm					
Altura de Levantamiento		(V_b/A)		2		cm					
Fecha		t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)
	0.5	0.5	28.4°	51.0	53.5	50.2	47.04	1.5	7.5	0.00979	0.0379
	1.0	1.0	28.4°	45.0	47.5	44.2	41.42	2.5	8.5	0.00979	0.0285
	1.5	1.5	28.4°	40.0	42.5	39.2	36.73	3.3	9.3	0.00979	0.0244
	2.0	2.0	28.4°	34.0	36.5	33.2	31.11	4.3	10.3	0.00979	0.0222
	5.0	5.0	28.4°	3.0	5.5	2.2	2.06	9.3	15.3	0.00979	0.0171
	15.0	15.0	28.3°	1.5	4.0	0.7	0.66	9.6	15.6	0.00980	0.0100
	30.0	30.0	28.3°	1.5	4.0	0.7	0.66	9.6	15.6	0.00980	0.0071
	60.0	60.0	28.3°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.6	0.00980	0.0050
	120.0	120.0	28.5°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.6	0.00978	0.0035
	250.0	250.0	28.7°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.6	0.00976	0.0024
	1440.0	24 hrs	27.7°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.6	0.00987	0.0010
	2880.0	48 hrs	28.3°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.6	0.00980	0.0007
	4320.0	72 hrs	28.3°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.6	0.00980	0.0006
	5760.0	96 hrs	28.4°	1.1	3.6	0.3	0.28	9.6	15.6	0.00979	0.0005
	7200.0	120 hr	28.3°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.6	0.00980	0.0005
<p>t: tiempo acumulado transcurrido en minutos Ra : lectura del hidrómetro Rm: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco $Rm = Ra + C_m$ Rc: Lectura del Hidrómetro corregido total $Rc = Rm - C_{GS} + C_T$ T: Temperatura en Grados Celsius K: Constante en función de la Temperatura y la Gravedad Específica L₁: Altura a lo largo del vástago hasta la lectura del hidrómetro L: Altura Efectiva de caída de partículas $D = K \sqrt{L/T}$ D: Diámetro de partículas en mm $P(\%) = \frac{Rc \cdot a}{W_s} \cdot 100$ P: Porcentaje de suelo Remanente con diámetros menores a "D"</p>											

Relave Cobriza – Muestra 03

ANÁLISIS POR HIDROMETRO												
Obra _____												
Localización	Minera Cobriza			Ensayo:		1						
Sondeo N°	_____			Muestra N°		M-3						
Fecha	30/01/08			Descripción:		Relave Minero						
Realizado por:	José Carlos Mendoza Chuchón			Prof.:		_____						
FACTORES DE CORRECCIÓN						CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA						
Factor de Corrección por Gravedad Específica por defloculante						Peso total de la muestra seca al aire						
				C _{GS}	6.00	W		91.89 gr				
Factor de Corrección por menisco				C _m	2.50	Peso total de la muestra secada al horno						
Factor de Corrección por Temperatura				C _T	2.70	Ws		90.64 gr				
Factor de Corrección por Humedad				FC _w	0.99	Gravedad específica relativa de sólidos						
Factor cuando G _s no es 2.65				a	0.86	G _s		3.61				
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO												
L ₁ para lectura 0 gr/lt		(L ₁) ₀	10.2 cm									
L ₁ para lectura 50 gr/lt		(L ₁) ₅₀	2.1 cm									
Volumen del Bulbo		(V _b)	67 cm ³									
Area del Cilindro de Ensayo		(A)	29.22 cm ²									
Altura del Bulbo		(L ₂)	14 cm									
Altura de Levantamiento		(V _l /A)	2.3 cm									
Fecha	t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)		
	0.5	0.5	28.5°	51.0	53.5	50.2	47.70	1.5	7.4	0.00984	0.0377	
	1.0	1.0	28.5°	44.0	46.5	43.2	41.05	2.7	8.6	0.00984	0.0288	
	1.5	1.5	28.5°	38.0	40.5	37.2	35.34	3.6	9.5	0.00984	0.0247	
	2.0	2.0	28.4°	32.0	34.5	31.2	29.64	4.6	10.5	0.00985	0.0225	
	5.0	5.0	28.5°	2.0	4.5	1.2	1.14	9.5	15.4	0.00984	0.0172	
	15.0	15.0	28.4°	1.5	4.0	0.7	0.67	9.6	15.5	0.00985	0.0100	
	30.0	30.0	28.4°	1.5	4.0	0.7	0.67	9.6	15.5	0.00985	0.0071	
	60.0	60.0	28.5°	1.5	4.0	0.7	0.67	9.6	15.5	0.00984	0.0050	
	120.0	120.0	28.5°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.5	0.00984	0.0035	
	250.0	250.0	28.9°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.5	0.00979	0.0024	
	1440.0	24 hrs	27.9°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.5	0.00990	0.0010	
	2880.0	48 hrs	28.3°	1.2	3.7	0.4	0.38	9.6	15.5	0.00986	0.0007	
	4320.0	72 hrs	28.5°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.5	0.00984	0.0006	
	5760.0	96 hrs	28.5°	1.0	3.5	0.2	0.19	9.6	15.5	0.00984	0.0005	
	7200.0	120 hr	28.2°	0.8	3.3	0.0	0.00	9.7	15.6	0.00987	0.0005	
<p>t: tiempo acumulado transcurrido en minutos</p> <p>Ra: lectura del hidrómetro</p> <p>Rm: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco</p> <p>Rc: Lectura del Hidrómetro corregido total</p> <p>T: Temperatura en Grados Celsius</p> <p>K: Constante en función de la Temperatura y la Gravedad Específica</p> <p>L₁: Altura a lo largo del vástago hasta la lectura del hidrómetro</p> <p>L: Altura Efectiva de caída de partículas</p> <p>D: Diámetro de partículas en mm</p> <p>P: Porcentaje de suelo Remanente con diámetros menores a "D"</p>												
						$Rm = Ra + Cm$ $Rc = Rm - C_{GS} + C_T$						
						$D = K\sqrt{L/T}$ $P(\%) = \frac{Rc \cdot a}{Ws} \cdot 100$						

Relave Cobriza – Muestra 04

Obra		ANALISIS POR HIDROMETRO										
Localización	Minera Cobriza	Ensayo:	1									
Sondeo N°		Muestra N°	M-4									
Fecha	30/01/08	Descripción:	Relave Minero									
Realizado por:	José Carlos Mendoza Chuchón	Prof.:										
FACTORES DE CORRECCIÓN					CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA							
Factor de Corrección por Gravedad Específica por defloculante					C_{GS}	6.00	Peso total de la muestra seca al aire					
Factor de Corrección por menisco					C_m	2.50	W	96.34 gr				
Factor de Corrección por Temperatura					C_T	2.70	Peso total de la muestra secada al horno					
Factor de Corrección por Humedad					FCw	0.99	Ws	95.07 gr				
Factor cuando Gs no es 2.65					a	0.86	Gravedad específica relativa de sólidos					
							Gs	3.60				
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO												
L ₁ para lectura 0 gr/lt		(L ₁) ₀	10.2 cm									
L ₁ para lectura 50 gr/lt		(L ₁) ₅₀	2.1 cm									
Volumen del Bulbo		(V _b)	67 cm ³									
Area del Cilindro de Ensayo		(A)	29.22 cm ²									
Altura del Bulbo		(L ₂)	14 cm									
Altura de Levantamiento		(V _b /A)	2.3 cm									
Fecha	t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)		
	0.5	0.5	28.5°	55.0	57.5	54.2	49.15	0.9	6.8	0.00986	0.0362	
	1.0	1.0	28.5°	47.0	49.5	46.2	41.90	2.2	8.1	0.00986	0.0280	
	1.5	1.5	28.5°	41.0	43.5	40.2	36.45	3.2	9.1	0.00986	0.0242	
	2.0	2.0	28.5°	35.0	37.5	34.2	31.01	4.1	10.0	0.00986	0.0220	
	5.0	5.0	28.4°	2.0	4.5	1.2	1.09	9.5	15.4	0.00987	0.0173	
	15.0	15.0	28.2°	1.5	4.0	0.7	0.63	9.6	15.5	0.00989	0.0100	
	30.0	30.0	28.3°	1.5	4.0	0.7	0.63	9.6	15.5	0.00988	0.0071	
	60.0	60.0	28.3°	1.5	4.0	0.7	0.63	9.6	15.5	0.00988	0.0050	
	120.0	120.0	28.5°	1.5	4.0	0.7	0.63	9.6	15.5	0.00986	0.0035	
	250.0	250.0	28.9°	1.0	3.5	0.2	0.18	9.6	15.5	0.00981	0.0024	
	1440.0	24 hrs	28.0°	1.0	3.5	0.2	0.18	9.6	15.5	0.00991	0.0010	
	2880.0	48 hrs	28.4°	1.2	3.7	0.4	0.36	9.6	15.5	0.00987	0.0007	
	4320.0	72 hrs	28.6°	1.2	3.7	0.4	0.36	9.6	15.5	0.00984	0.0006	
	5760.0	96 hrs	28.6°	1.2	3.7	0.4	0.36	9.6	15.5	0.00984	0.0005	
	7200.0	120 hr	28.3°	1.2	3.7	0.4	0.36	9.6	15.5	0.00988	0.0005	
<p>t: tiempo acumulado transcurrido en minutos</p> <p>Ra : lectura del hidrómetro</p> <p>Rm: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco</p> <p>Rc: Lectura del Hidrómetro corregido total</p> <p>T: Temperatura en Grados Celsius</p> <p>K: Constante en función de la Temperatura y la Gravedad Específica</p> <p>L₁: Altura a lo largo del vástago hasta la lectura del hidrometro</p> <p>L: Altura Efectiva de caída de partículas</p> <p>D: Diámetro de partículas en mm</p> <p>P: Porcentaje de suelo Remanente con diámetros menores a "D"</p>												
						$Rm = Ra + Cm$ $Rc = Rm - C_{GS} + C_T$						
						$D = K\sqrt{L/T}$ $P(\%) = \frac{Rc \cdot a}{W_s} \cdot 100$						

Relave Volcan – Muestra 01

Obra _____		ANÁLISIS POR HIDROMETRO									
Localización <u>Minera Volcan</u>		Ensayo: <u>1</u>									
Sondeo N° _____		Muestra N° <u>M-1</u>									
Fecha <u>08/02/08</u>		Descripción: <u>Relave Minero</u>									
Realizado por: <u>Juan W. Cabrera Cabrera</u>		Prof.: _____									
FACTORES DE CORRECCIÓN					CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA						
Factor de Corrección por Gravedad Específica por defloculante					C_{GS}	6.00	Peso total de la muestra seca al aire				
Factor de Corrección por menisco					C_m	2.50	W <u>50.00</u> gr				
Factor de Corrección por Temperatura					C_T	2.60	Peso total de la muestra secada al horno				
Factor de Corrección por Humedad					FCw	0.99	Ws <u>49.60</u> gr				
Factor cuando Gs no es 2.65					a	0.95	Gravedad específica relativa de sólidos				
					Gs <u>2.89</u>						
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO											
L ₁ para lectura 0 gr/l		(L ₁) ₀	10.2 cm								
L ₁ para lectura 50 gr/l		(L ₁) ₅₀	2.1 cm								
Volumen del Bulbo		(V _b)	67 cm ³								
Area del Cilindro de Ensayo		(A)	29.22 cm ²								
Altura del Bulbo		(L ₂)	14 cm								
Altura de Levantamiento		(V _b /A)	2.3 cm								
Fecha	t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)	
	0.5	0.5	28.3°	49.0	51.5	48.1	92.33	1.9	7.8	0.01158	0.0456
	1.0	1.0	28.3°	46.0	48.5	45.1	86.57	2.3	8.2	0.01158	0.0331
	1.5	1.5	28.3°	43.0	45.5	42.1	80.81	2.8	8.7	0.01158	0.0278
	2.0	2.0	28.2°	42.0	44.5	41.1	78.89	3.0	8.9	0.01160	0.0244
	5.0	5.0	28.1°	36.0	38.5	35.1	67.38	4.0	9.9	0.01161	0.0163
	15.0	15.0	28.1°	30.0	32.5	29.1	55.86	4.9	10.8	0.01161	0.0098
	30.0	30.0	28.0°	26.0	28.5	25.1	48.18	5.6	11.5	0.01162	0.0072
	60.0	60.0	28.0°	22.0	24.5	21.1	40.50	6.2	12.1	0.01162	0.0052
	120.0	120.0	27.9°	18.5	21.0	17.6	33.78	6.8	12.7	0.01164	0.0038
	250.0	250.0	28.3°	15.0	17.5	14.1	27.07	7.4	13.3	0.01158	0.0027
	1440.0	24 hrs	27.6°	9.5	12.0	8.6	16.51	8.3	14.2	0.01168	0.0012
	2880.0	48 hrs	28.1°	8.0	10.5	7.1	13.63	8.5	14.4	0.01161	0.0008
	4320.0	72 hrs	28.1°	6.5	9.0	5.6	10.75	8.7	14.6	0.01161	0.0007
	5760.0	96 hrs	28.2°	6.5	9.0	5.6	10.75	8.7	14.6	0.01160	0.0006
	7200.0	120 hr	28.3°	5.5	8.0	4.6	8.83	8.9	14.8	0.01158	0.0005
<p>t: tiempo acumulado transcurrido en minutos</p> <p>Ra : lectura del hidrómetro</p> <p>Rm: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco</p> <p>Rc: Lectura del Hidrómetro corregido total</p> <p>T: Temperatura en Grados Celsius</p> <p>K: Constante en función de la Temperatura y la Gravedad Específica</p> <p>L₁: Altura a lo largo del vástago hasta la lectura del hidrometro</p> <p>L: Altura Efectiva de caída de partículas</p> <p>D: Diámetro de partículas en mm</p> <p>P: Porcentaje de suelo Remanente con diámetros menores a "D"</p>											
						$Rm = Ra + Cm$ $Rc = Rm - C_{GS} + C_T$					
						$D = K\sqrt{L/T}$ $P(\%) = \frac{Rc \cdot a}{Ws} \cdot 100$					

Relave Volcan – Muestra 02

Obra		ANÁLISIS POR HIDROMETRO									
Localización	Minera Volcan	Ensayo:	1								
Sondeo N°		Muestra N°	M-2								
Fecha	08/02/08	Descripción:	Relave Minero								
Realizado por:	Juan W. Cabrera Cabrera	Prof.:									
FACTORES DE CORRECCIÓN					CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA						
Factor de Corrección por Gravedad Específica por defloculante					C_{GS}	6.00	Peso total de la muestra seca al aire				
Factor de Corrección por menisco					C_m	2.50	W 50.00 gr				
Factor de Corrección por Temperatura					C_T	2.60	Peso total de la muestra secada al horno				
Factor de Corrección por Humedad					FC_w	0.99	W _s 49.60 gr				
Factor cuando G _s no es 2.65					a	0.95	Gravedad específica relativa de sólidos				
							G _s 2.90				
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO											
L ₁ para lectura 0 gr/lit		(L ₁) ₀	10.2 cm								
L ₁ para lectura 50 gr/lit		(L ₁) ₅₀	2.1 cm								
Volumen del Bulbo		(V _b)	67 cm ³								
Area del Cilindro de Ensayo		(A)	34.21 cm ²								
Altura del Bulbo		(L ₂)	14 cm								
Altura de Levantamiento		(V ₁ /A)	2 cm								
Fecha	t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)	
	0.5	0.5	28.1°	47.0	49.5	46.1	88.33	2.2	8.2	0.01158	0.0469
	1.0	1.0	28.1°	45.0	47.5	44.1	84.50	2.5	8.5	0.01158	0.0338
	1.5	1.5	28.1°	43.0	45.5	42.1	80.66	2.8	8.8	0.01158	0.0280
	2.0	2.0	28.0°	42.0	44.5	41.1	78.75	3.0	9.0	0.01159	0.0246
	5.0	5.0	28.0°	36.0	38.5	35.1	67.25	4.0	10.0	0.01159	0.0164
	15.0	15.0	27.8°	30.0	32.5	29.1	55.76	4.9	10.9	0.01162	0.0099
	30.0	30.0	27.8°	26.0	28.5	25.1	48.09	5.6	11.6	0.01162	0.0072
	60.0	60.0	27.8°	21.5	24.0	20.6	39.47	6.3	12.3	0.01162	0.0053
	120.0	120.0	27.8°	18.0	20.5	17.1	32.76	6.9	12.9	0.01162	0.0038
	250.0	250.0	28.3°	14.5	17.0	13.6	26.06	7.4	13.4	0.01155	0.0027
	1440.0	24 hrs	27.6°	9.0	11.5	8.1	15.52	8.3	14.3	0.01164	0.0012
	2880.0	48 hrs	28.0°	7.0	9.5	6.1	11.69	8.7	14.7	0.01159	0.0008
	4320.0	72 hrs	28.0°	6.0	8.5	5.1	9.77	8.8	14.8	0.01159	0.0007
	5760.0	96 hrs	28.1°	6.0	8.5	5.1	9.77	8.8	14.8	0.01158	0.0006
	7200.0	120 hrs	28.2°	5.0	7.5	4.1	7.86	9.0	15.0	0.01157	0.0005
<p>t: tiempo acumulado transcurrido en minutos</p> <p>Ra : lectura del hidrómetro</p> <p>Rm: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco</p> <p>Rc: Lectura del Hidrómetro corregido total</p> <p>T: Temperatura en Grados Celsius</p> <p>K: Constante en función de la Temperatura y la Gravedad Específica</p> <p>L₁: Altura a lo largo del vástago hasta la lectura del hidrometro</p> <p>L: Altura Efectiva de caída de partículas</p> <p>D: Diámetro de partículas en mm</p> <p>P: Porcentaje de suelo Remanente con diámetros menores a "D"</p>											
						$Rm = Ra + Cm$ $Rc = Rm - C_{GS} + C_T$					
						$D = K \sqrt{LIT}$ $P(\%) = \frac{Rc \cdot a}{W_s} \cdot 100$					

Relave Volcan – Muestra 03

Obra		ANÁLISIS POR HIDROMETRO									
Localización	Minera Volcan	Ensayo:	1								
Sondeo N°		Muestra N°	M-3								
Fecha	08/02/08	Descripción:	Relave Minero								
Realizado por:	Juan W. Cabrera Cabrera	Prof.:									
FACTORES DE CORRECCIÓN					CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA						
Factor de Corrección por Gravedad Específica por defloculante					C_{GS}	6.00	Peso total de la muestra seca al aire				
Factor de Corrección por menisco					C_m	2.50	W	50.00 gr			
Factor de Corrección por Temperatura					C_T	2.65	Peso total de la muestra secada al horno				
Factor de Corrección por Humedad					FCv	0.99	Ws	49.60 gr			
Factor cuando Gs no es 2.65					a	0.95	Gravedad específica relativa de sólidos				
							Gs	2.90			
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO											
L_1 para lectura 0 gr/lt	$(L_1)_0$	10.2 cm									
L_1 para lectura 50 gr/lt	$(L_1)_{50}$	2.1 cm									
Volumen del Bulbo	(V_b)	67 cm ³									
Area del Cilindro de Ensayo	(A)	29.22 cm ²									
Altura del Bulbo	(L_2)	14 cm									
Altura de Levantamiento	(V_l/A)	2.3 cm									
Fecha	t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)	
	0.5	0.5	28.4°	47.0	49.5	46.2	88.42	2.2	8.1	0.01154	0.0463
	1.0	1.0	28.4°	44.0	46.5	43.2	82.68	2.7	8.6	0.01154	0.0337
	1.5	1.5	28.4°	42.0	44.5	41.2	78.84	3.0	8.9	0.01154	0.0280
	2.0	2.0	28.4°	41.0	43.5	40.2	76.93	3.2	9.1	0.01154	0.0246
	5.0	5.0	28.4°	35.0	37.5	34.2	65.43	4.1	10.0	0.01154	0.0163
	15.0	15.0	28.3°	29.0	31.5	28.2	53.94	5.1	11.0	0.01155	0.0099
	30.0	30.0	28.2°	25.5	28.0	24.7	47.23	5.7	11.6	0.01157	0.0072
	60.0	60.0	28.1°	21.5	24.0	20.7	39.57	6.3	12.2	0.01158	0.0052
	120.0	120.0	28.1°	18.0	20.5	17.2	32.86	6.9	12.8	0.01158	0.0038
	250.0	250.0	28.7°	14.0	16.5	13.2	25.20	7.5	13.4	0.01150	0.0027
	1440.0	24 hrs	27.6°	9.5	12.0	8.7	16.57	8.3	14.2	0.01164	0.0012
	2880.0	48 hrs	28.2°	7.0	9.5	6.2	11.78	8.7	14.6	0.01157	0.0008
	4320.0	72 hrs	28.2°	6.0	8.5	5.2	9.87	8.8	14.7	0.01157	0.0007
	5760.0	96 hrs	28.2°	5.5	8.0	4.7	8.91	8.9	14.8	0.01157	0.0006
	7200.0	120 hrs	28.2°	5.0	7.5	4.2	7.95	9.0	14.9	0.01157	0.0005
<p>t: tiempo acumulado transcurrido en minutos</p> <p>Ra : lectura del hidrómetro</p> <p>Rm: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco</p> <p>Rc: Lectura del Hidrómetro corregido total</p> <p>T: Temperatura en Grados Celsius</p> <p>K: Constante en función de la Temperatura y la Gravedad Específica</p> <p>L_1: Altura a lo largo del vástago hasta la lectura del hidrometro</p> <p>L: Altura Efectiva de caída de partículas</p> <p>D: Diámetro de partículas en mm</p> <p>P: Porcentaje de suelo Remanente con diámetros menores a "D"</p>											
						$Rm = Ra + Cm$ $Rc = Rm - C_{GS} + C_T$					
						$D = K \sqrt{L/T}$ $P(\%) = \frac{Rc \cdot a}{W_s} \cdot 100$					

Relave Volcan – Muestra 04

Obra		ANÁLISIS POR HIDROMETRO										
Localización: <u>Minera Volcan</u>		Ensayo: <u>1</u>										
Sondeo N°: _____		Muestra N°: <u>M-4</u>										
Fecha: <u>08/02/08</u>		Descripción: <u>Relave Minero</u>										
Realizado por: <u>Juan W. Cabrera Cabrera</u>		Prof.: _____										
FACTORES DE CORRECCIÓN					CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA							
Factor de Corrección por Gravedad Específica por defloculante					C_{GS}	6.00	Peso total de la muestra seca al aire					
Factor de Corrección por menisco					C_m	2.50	W	50.04 gr				
Factor de Corrección por Temperatura					C_T	2.60	Peso total de la muestra secada al horno					
Factor de Corrección por Humedad					FCw	1.00	Ws	50.00 gr				
Factor cuando Gs no es 2.65					a	0.95	Gravedad específica relativa de sólidos					
					Gs							2.88
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO												
L ₁ para lectura 0 gr/lt		(L ₁) ₀	10.2 cm									
L ₁ para lectura 50 gr/lt		(L ₁) ₅₀	2.1 cm									
Volumen del Bulbo		(V _b)	67 cm ³									
Area del Cilindro de Ensayo		(A)	29.22 cm ²									
Altura del Bulbo		(L ₂)	14 cm									
Altura de Levantamiento		(V _g /A)	2.3 cm									
Fecha	t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)		
	0.5	0.5	28.3°	48.0	50.5	47.1	89.85	2.0	7.9	0.01162	0.0460	
	1.0	1.0	28.3°	44.0	46.5	43.1	82.22	2.7	8.6	0.01162	0.0340	
	1.5	1.5	28.3°	42.0	44.5	41.1	78.41	3.0	8.9	0.01162	0.0282	
	2.0	2.0	28.3°	41.0	43.5	40.1	76.50	3.2	9.1	0.01162	0.0247	
	5.0	5.0	28.3°	36.0	38.5	35.1	66.96	4.0	9.9	0.01162	0.0163	
	15.0	15.0	28.1°	30.5	33.0	29.6	56.47	4.9	10.8	0.01164	0.0099	
	30.0	30.0	28.0°	26.0	28.5	25.1	47.88	5.6	11.5	0.01165	0.0072	
	60.0	60.0	27.9°	22.0	24.5	21.1	40.25	6.2	12.1	0.01167	0.0052	
	120.0	120.0	28.1°	18.5	21.0	17.6	33.57	6.8	12.7	0.01164	0.0038	
	250.0	250.0	28.5°	15.0	17.5	14.1	26.90	7.4	13.3	0.01159	0.0027	
	1440.0	24 hrs	27.6°	9.5	12.0	8.6	16.41	8.3	14.2	0.01171	0.0012	
	2880.0	48 hrs	28.1°	7.0	9.5	6.1	11.64	8.7	14.6	0.01164	0.0008	
	4320.0	72 hrs	28.2°	6.0	8.5	5.1	9.73	8.8	14.7	0.01163	0.0007	
	5760.0	96 hrs	28.2°	6.0	8.5	5.1	9.73	8.8	14.7	0.01163	0.0006	
	7200.0	120 hrs	28.2°	5.5	8.0	4.6	8.78	8.9	14.8	0.01163	0.0005	
<p>t: tiempo acumulado transcurrido en minutos Ra : lectura del hidrómetro Rm: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco Rc: Lectura del Hidrómetro corregido total T: Temperatura en Grados Celsius K: Constante en función de la Temperatura y la Gravedad Específica L₁: Altura a lo largo del vástago hasta la lectura del hidrometro L: Altura Efectiva de caída de partículas D: Diámetro de partículas en mm P: Porcentaje de suelo Remanente con diámetros menores a "D"</p>												
						$Rm = Ra + Cm$ $Rc = Rm - C_{GS} + C_T$						
						$D = K \sqrt{L/T}$ $P(\%) = \frac{Rc \cdot a}{Ws} \cdot 100$						

A.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE MUESTRAS EXPERIMENTALES



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
LABORATORIO DE INVESTIGACION DEL AGUA

INFORME DE ANÁLISIS N°260/2013/LIA/FIA/UNI

Solicitante : JOSE MENDOZA CHUCHON
Proyecto : Tesis.
Tipo de muestra : Agua con lodo (*)
Procedencia : Minera Cobriza - La Oroya
Fecha de muestreo : El solicitante no indicó
Hora de muestreo : El solicitante no indicó
Fecha de recepción : 19 de noviembre de 2013
Muestreo : Realizado por el solicitante.
Documento de consulta : Los análisis se han efectuado tomando los METODOS NORMALIZADOS Y RESIDUALES APHA-AWWA-WPCF 19 edición.

RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

PARÁMETRO	UNIDAD	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	METODO
pH	---	6.84	6.68	6.56	6.57	6.85	7.06	7.02	7.06	7.07	Electrodo

Lima, 20 de Noviembre del 2013



INGENIERO VALERY R. MAUTINO CANO
JEFE (e) LAB. DE INVESTIGACIÓN DEL AGUA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL - UNI



A.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE POTENCIA ELECTRICA

A3.1. Potencia eléctrica consumida en giro libre

		ORDENAMIENTO														
		M_PG/PC_DCC			M_DGC			M_PG/PM_DCC			M_PM/PC_DCC			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	2.872	0.127	0.366												
2	6	3.222	0.135	0.434												
3	7	3.930	0.149	0.586												
4	8	4.113	0.154	0.633												
5	9	4.787	0.172	0.834												
6	10	5.450	0.190	1.033												
7	12	6.283	0.212	1.329												
8	15	7.901	0.251	1.982	5.255	0.174	0.915	3.791	0.153	0.579						
9	18	9.079	0.281	2.555	6.086	0.193	1.175	4.357	0.166	0.724						
10	20	10.372	0.332	3.444	6.898	0.208	1.438	4.893	0.183	0.897						
11	25				8.504	0.242	2.058	6.024	0.213	1.286						
12	30				10.061	0.275	2.762	7.090	0.241	1.710						
13	35															
14	40															
15	45															
16	50										4.938	0.475	2.356			
17	75										6.924	0.550	3.811	3.214	0.234	0.753
18	100										8.861	0.606	5.371	4.078	0.276	1.124
19	125										10.721	0.640	6.859	4.962	0.316	1.567
20	150													5.844	0.364	2.129

A3.2. Potencia eléctrica consumida: relave Cobriza

M-1 ($C_v=35\%$)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG/PC_DCC			M_DGC			M_PG/PM_DCC			M_PM/PC_DCC			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	2.968	0.174	0.516												
2	6	3.344	0.175	0.587												
3	7	3.979	0.195	0.774												
4	8	4.238	0.200	0.846												
5	9	4.927	0.220	1.086												
6	10	5.526	0.235	1.300												
7	12	6.479	0.260	1.687												
8	15	7.951	0.298	2.368	5.307	0.210	1.112	3.926	0.215	0.845						
9	18	9.155	0.336	3.076	6.136	0.226	1.389	4.485	0.231	1.036						
10	20	10.388	0.364	3.780	6.925	0.243	1.679	5.032	0.250	1.259						
11	25				8.520	0.289	2.459	6.137	0.278	1.708						
12	30				10.133	0.347	3.515	7.238	0.318	2.301						
13	35															
14	40															
15	45															
16	50										5.076	0.561	2.847			
17	75										6.984	0.627	4.381	3.569	0.385	1.375
18	100										8.976	0.675	6.060	4.309	0.372	1.602
19	125										10.885	0.724	7.880	5.266	0.451	2.377
20	150													6.218	0.514	3.194

M-2 ($C_v=40\%$)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG/PC_DCC			M_DGC			M_PG/PM_DCC			M_PM/PC_DCC			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	3.084	0.185	0.570												
2	6	3.429	0.194	0.664												
3	7	4.087	0.210	0.860												
4	8	4.308	0.214	0.920												
5	9	4.944	0.233	1.153												
6	10	5.615	0.249	1.399												
7	12	6.626	0.281	1.861												
8	15	8.076	0.333	2.690	5.369	0.230	1.236	3.917	0.199	0.780						
9	18	9.382	0.363	3.409	6.182	0.253	1.563	4.477	0.214	0.960						
10	20	10.548	0.384	4.049	6.996	0.279	1.933	5.045	0.233	1.176						
11	25				8.555	0.330	2.822	6.147	0.266	1.632						
12	30				10.118	0.364	3.686	7.241	0.303	2.192						
13	35															
14	40															
15	45															
16	50										5.243	0.604	3.167			
17	75										7.145	0.658	4.699	3.627	0.421	1.528
18	100										9.165	0.721	6.605	4.331	0.389	1.685
19	125										11.134	0.762	8.480	5.377	0.508	2.730
20	150													6.342	0.568	3.602

M-3 (C_v=45%)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG/PC_DCC			M_DGC			M_PG/PM_DCC			M_PM/PC_DCC			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	3.030	0.167	0.505												
2	6	3.314	0.172	0.568												
3	7	4.030	0.191	0.765												
4	8	4.285	0.196	0.839												
5	9	4.918	0.220	1.083												
6	10	5.448	0.230	1.252												
7	12	6.453	0.258	1.666												
8	15	8.097	0.305	2.473	5.348	0.232	1.243	3.995	0.226	0.902						
9	18	9.346	0.343	3.205	6.175	0.258	1.591	4.577	0.242	1.110						
10	20	10.514	0.373	3.918	6.977	0.283	1.972	5.106	0.269	1.383						
11	25				8.579	0.331	2.836	6.271	0.312	1.959						
12	30				10.147	0.380	3.859	7.416	0.346	2.565						
13	35															
14	40															
15	45															
16	50										5.274	0.622	3.281			
17	75										7.227	0.681	4.924	4.118	0.620	2.553
18	100										9.214	0.737	6.790	4.997	0.649	3.244
19	125										11.259	0.811	9.134	6.089	0.758	4.616
20	150													7.257	0.874	6.346

M-4 (C_v=50%)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG/PC_DCC			M_DGC			M_PG/PM_DCC			M_PM/PC_DCC			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5.000	3.035	0.177	0.537												
2	6.000	3.398	0.182	0.617												
3	7.000	4.033	0.201	0.809												
4	8.000	4.299	0.205	0.882												
5	9.000	5.001	0.230	1.149												
6	10.000	5.712	0.248	1.417												
7	12.000	6.666	0.272	1.812												
8	15.000	8.227	0.317	2.604	5.340	0.239	1.275	4.103	0.263	1.079						
9	18.000	9.648	0.360	3.474	6.183	0.264	1.634	4.709	0.293	1.380						
10	20.000	10.899	0.388	4.227	6.980	0.292	2.040	5.249	0.324	1.702						
11	25.000				8.602	0.352	3.028	6.440	0.377	2.426						
12	30.000				10.207	0.399	4.009	7.598	0.414	3.146						
13	35.000															
14	40.000															
15	45.000															
16	50.000										5.958	0.836	4.980			
17	75.000										8.014	0.893	7.153	5.697	0.952	5.424
18	100.000										10.153	0.953	9.674	7.024	1.038	7.290
19	125.000										11.327	0.997	11.297	8.825	1.102	9.172
20	150.000													10.301	1.197	12.326

A3.3: Potencia eléctrica consumida: relave Volcan

M-5 (C_v=35%)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG/PC_DCC			M_DGC			M_PG/PM_DCC			M_PM/PC_DCC			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	3.115	0.176	0.548												
2	6	3.360	0.182	0.610												
3	7	4.075	0.204	0.830												
4	8	4.407	0.210	0.927												
5	9	5.005	0.238	1.189												
6	10	5.580	0.258	1.442												
7	12	6.585	0.283	1.861												
8	15	8.173	0.331	2.709	5.349	0.233	1.244	4.090	0.253	1.034						
9	18	9.531	0.367	3.495	6.177	0.261	1.611	4.675	0.278	1.302						
10	20	10.723	0.386	4.144	6.973	0.281	1.959	5.229	0.300	1.568						
11	25				8.583	0.328	2.816	6.378	0.353	2.252						
12	30				10.141	0.367	3.726	7.490	0.381	2.852						
13	35															
14	40															
15	45															
16	50										5.588	0.689	3.848			
17	75										7.658	0.771	5.906	4.623	0.765	3.537
18	100										9.559	0.797	7.623	5.714	0.825	4.713
19	125										11.315	0.849	9.602	6.468	0.846	5.470
20	150													7.425	0.881	6.540

M-6 ($C_v=38\%$)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG/PC_DCC			M_DGC			M_PG/PM_DCC			M_PM/PC_DCC			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	3.088	0.185	0.571												
2	6	3.493	0.194	0.677												
3	7	4.124	0.215	0.888												
4	8	4.498	0.229	1.029												
5	9	5.040	0.248	1.249												
6	10	5.779	0.273	1.577												
7	12	6.783	0.307	2.081												
8	15	8.367	0.350	2.929				4.235	0.305	1.292						
9	18	9.727	0.378	3.679				4.826	0.331	1.599						
10	20	10.879	0.400	4.356				5.403	0.358	1.934						
11	25							6.589	0.395	2.601						
12	30							7.733	0.429	3.315						
13	35															
14	40															
15	45															
16	50										6.024	0.811	4.887			
17	75										8.101	0.884	7.162			
18	100										10.182	0.929	9.460			
19	125															
20	150															

M-7 ($C_v=40\%$)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG/PC_DCC			M_DGC			M_PG/PM_DCC			M_PM/PC_DCC			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)	VOLTAJE (VOLTIOS)	INTENSIDAD (AMPERES)	POTENCIA ELECTRICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	3.080	0.180	0.553												
2	6	3.489	0.187	0.654												
3	7	4.022	0.209	0.841												
4	8	4.467	0.218	0.972												
5	9	5.105	0.242	1.233												
6	10	5.732	0.270	1.547												
7	12	6.725	0.301	2.022												
8	15	8.353	0.345	2.885				4.216	0.297	1.250						
9	18	9.773	0.378	3.692				4.825	0.323	1.586						
10	20	10.923	0.392	4.285				5.369	0.354	1.901						
11	25							6.585	0.399	2.626						
12	30							7.759	0.437	3.391						
13	35															
14	40															
15	45															
16	50										6.147	0.861	5.290			
17	75										8.260	0.928	7.664			
18	100										10.456	0.981	10.256			
19	125															
20	150															

A.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE POTENCIA MECÁNICA

A4.1. Potencia mecánica consumida: Relave cobriza

M-1 (Cv=35%)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG_C			M_DGC			M_PG-PM_C			M_PM-PC_C			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	5.203	37.004	0.045	5.203			5.203			5.203			5.203		
2	6	6.244	31.324	0.046	6.244			6.244			6.244			6.244		
3	7	7.285	33.018	0.056	7.285			7.285			7.285			7.285		
4	8	8.326	32.809	0.064	8.326			8.326			8.326			8.326		
5	9	9.366	35.832	0.079	9.366			9.366			9.366			9.366		
6	10	10.407	33.876	0.080	10.407			10.407			10.407			10.407		
7	12	12.488	36.713	0.107	12.488			12.488			12.488			12.488		
8	15	15.610	31.680	0.116	15.610	33.245	0.113	15.610	40.300	0.142	15.610			15.610		
9	18	18.733	35.632	0.156	18.733	30.087	0.123	18.733	39.313	0.166	18.733			18.733		
10	20	20.814	20.656	0.101	20.814	30.551	0.139	20.814	41.041	0.193	20.814			20.814		
11	25	26.017			26.017	40.591	0.231	26.017	38.393	0.225	26.017			26.017		
12	30	31.221			31.221	63.476	0.433	31.221	44.733	0.315	31.221			31.221		
13	35	36.424			36.424			36.424			36.424			36.424		
14	40	41.628			41.628			41.628			41.628			41.628		
15	45	46.831			46.831			46.831			46.831			46.831		
16	50	52.035			52.035			52.035			52.035	43.212	0.392	52.035		
17	75	78.052			78.052			78.052			78.052	33.491	0.456	78.052	14.816	0.238
18	100	104.070			104.070			104.070			104.070	30.338	0.551	104.070	8.536	0.183
19	125	130.087			130.087			130.087			130.087	35.992	0.817	130.087	11.577	0.310
20	150	156.105			156.105			156.105			156.105			156.105	12.682	0.408

M-2 (Cv=40%)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG_C			M_DGC			M_PG-PM_C			M_PM-PC_C			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	5.203	34.640	0.041	5.203			5.203			5.203			5.203		
2	6	6.244	32.483	0.046	6.244			6.244			6.244			6.244		
3	7	7.285	33.140	0.055	7.285			7.285			7.285			7.285		
4	8	8.326	30.413	0.057	8.326			8.326			8.326			8.326		
5	9	9.366	30.974	0.066	9.366			9.366			9.366			9.366		
6	10	10.407	30.958	0.073	10.407			10.407			10.407			10.407		
7	12	12.488	37.533	0.106	12.488			12.488			12.488			12.488		
8	15	15.610	39.971	0.142	15.610	62.044	0.184	15.610	40.135	0.107	15.610			15.610		
9	18	18.733	40.200	0.171	18.733	62.432	0.223	18.733	39.294	0.126	18.733			18.733		
10	20	20.814	25.636	0.121	20.814	74.715	0.296	20.814	41.757	0.148	20.814			20.814		
11	25	26.017			26.017	88.709	0.439	26.017	41.592	0.185	26.017			26.017		
12	30	31.221			31.221	89.423	0.531	31.221	48.177	0.257	31.221			31.221		
13	35	36.424			36.424			36.424			36.424			36.424		
14	40	41.628			41.628			41.628			41.628			41.628		
15	45	46.831			46.831			46.831			46.831			46.831		
16	50	52.035			52.035			52.035			52.035	46.220	0.446	52.035		
17	75	78.052			78.052			78.052			78.052	33.739	0.488	78.052	23.540	0.297
18	100	104.070			104.070			104.070			104.070	35.157	0.678	104.070	12.780	0.215
19	125	130.087			130.087			130.087			130.087	36.954	0.891	130.087	21.202	0.446
20	150	156.105			156.105			156.105			156.105			156.105	22.374	0.565

M-3 (Cv=45%)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG_C			M_DGC			M_PG-PM_C			M_PM-PC_C			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	5.203	45.749	0.050	5.203			5.203			5.203			5.203		
2	6	6.244	36.724	0.048	6.244			6.244			6.244			6.244		
3	7	7.285	41.996	0.065	7.285			7.285			7.285			7.285		
4	8	8.326	42.198	0.074	8.326			8.326			8.326			8.326		
5	9	9.366	47.079	0.093	9.366			9.366			9.366			9.366		
6	10	10.407	35.911	0.079	10.407			10.407			10.407			10.407		
7	12	12.488	45.969	0.121	12.488			12.488			12.488			12.488		
8	15	15.610	53.656	0.177	15.610	56.845	0.188	15.610	50.788	0.172	15.610			15.610		
9	18	18.733	59.188	0.234	18.733	60.094	0.239	18.733	50.571	0.206	18.733			18.733		
10	20	20.814	38.838	0.171	20.814	69.458	0.307	20.814	57.217	0.259	20.814			20.814		
11	25	26.017			26.017	81.026	0.447	26.017	63.582	0.359	26.017			26.017		
12	30	31.221			31.221	95.175	0.631	31.221	67.221	0.456	31.221			31.221		
13	35	36.424			36.424			36.424			36.424			36.424		
14	40	41.628			41.628			41.628			41.628			41.628		
15	45	46.831			46.831			46.831			46.831			46.831		
16	50	52.035			52.035			52.035			52.035	66.203	0.509	52.035		
17	75	78.052			78.052			78.052			78.052	53.115	0.612	78.052	41.892	0.690
18	100	104.070			104.070			104.070			104.070	50.816	0.781	104.070	36.994	0.813
19	125	130.087			130.087			130.087			130.087	65.153	1.251	130.087	42.561	1.169
20	150	156.105			156.105			156.105			156.105			156.105	49.058	1.616

M-4 (Cv=50%)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG_C			M_DGC			M_PG-PM_C			M_PM-PC_C			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	5.203	59.907	0.062	5.203			5.203			5.203			5.203		
2	6	6.244	53.295	0.066	6.244			6.244			6.244			6.244		
3	7	7.285	55.684	0.080	7.285			7.285			7.285			7.285		
4	8	8.326	54.620	0.090	8.326			8.326			8.326			8.326		
5	9	9.366	63.283	0.117	9.366			9.366			9.366			9.366		
6	10	10.407	67.138	0.138	10.407			10.407			10.407			10.407		
7	12	12.488	70.503	0.174	12.488			12.488			12.488			12.488		
8	15	15.610	72.630	0.224	15.610	61.765	0.307	15.610	79.866	0.267	15.610			15.610		
9	18	18.733	89.869	0.331	18.733	65.514	0.364	18.733	87.521	0.350	18.733			18.733		
10	20	20.814	68.529	0.282	20.814	77.831	0.345	20.814	96.500	0.429	20.814			20.814		
11	25	26.017			26.017	99.836	0.558	26.017	108.481	0.608	26.017			26.017		
12	30	31.221			31.221	106.928	0.717	31.221	114.849	0.765	31.221			31.221		
13	35	36.424			36.424			36.424			36.424			36.424		
14	40	41.628			41.628			41.628			41.628			41.628		
15	45	46.831			46.831			46.831			46.831			46.831		
16	50	52.035			52.035			52.035			52.035	118.399	1.443	52.035		
17	75	78.052			78.052			78.052			78.052	100.550	1.838	78.052	107.435	1.790
18	100	104.070			104.070			104.070			104.070	97.088	2.367	104.070	106.371	2.363
19	125	130.087			130.087			130.087			130.087	80.104	2.441	130.087	104.948	2.915
20	150	156.105			156.105			156.105			156.105			156.105	117.267	3.908

A4.2. Potencia consumida: relave Volcan

M-5 (Cv=35%)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG_C			M_DGC			M_PG-PM_C			M_PM-PC_C			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	5.203	55.615	0.058	5.203			5.203			5.203			5.203		
2	6	6.244	44.930	0.056	6.244			6.244			6.244			6.244		
3	7	7.285	53.103	0.078	7.285			7.285			7.285			7.285		
4	8	8.326	56.238	0.094	8.326			8.326			8.326			8.326		
5	9	9.366	61.907	0.117	9.366			9.366			9.366			9.366		
6	10	10.407	62.382	0.131	10.407			10.407			10.407			10.407		
7	12	12.488	67.732	0.170	12.488			12.488			12.488			12.488		
8	15	15.610	74.098	0.233	15.610	60.129	0.189	15.610	77.109	0.242	15.610			15.610		
9	18	18.733	79.812	0.301	18.733	66.462	0.251	18.733	81.686	0.308	18.733			18.733		
10	20	20.814	53.482	0.224	20.814	71.453	0.299	20.814	85.364	0.358	20.814			20.814		
11	25	26.017			26.017	83.168	0.436	26.017	98.323	0.515	26.017			26.017		
12	30	31.221			31.221	88.179	0.554	31.221	96.879	0.609	31.221			31.221		
13	35	36.424			36.424			36.424			36.424			36.424		
14	40	41.628			41.628			41.628			41.628			41.628		
15	45	46.831			46.831			46.831			46.831			46.831		
16	50	52.035			52.035			52.035			52.035	93.379	0.925	52.035		
17	75	78.052			78.052			78.052			78.052	87.432	1.299	78.052	64.783	1.067
18	100	104.070			104.070			104.070			104.070	70.508	1.396	104.070	62.633	1.376
19	125	130.087			130.087			130.087			130.087	68.687	1.700	130.087	54.480	1.496
20	150	156.105			156.105			156.105			156.105			156.105	51.320	1.691

M-6 (Cv=38%)

		ORDENAMIENTO														
		M_PG/PC_DCC			M_DGC			M_PG/PM_DCC			M_PM/PC_DCC			M_DCC		
ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	5.203	96.01745363	0.076	5.203			5.203			5.203			5.203		
2	6	6.244	94.30238816	0.090	6.244			6.244			6.244			6.244		
3	7	7.285	100.421552	0.112	7.285			7.285			7.285			7.285		
4	8	8.326	116.4175465	0.147	8.326			8.326			8.326			8.326		
5	9	9.366	109.9687314	0.157	9.366			9.366			9.366			9.366		
6	10	10.407	126.855129	0.201	10.407			10.407			10.407			10.407		
7	12	12.488	146.0957393	0.278	12.488			12.488			12.488			12.488		
8	15	15.610	147.1934009	0.350	15.610			15.610	159.604	0.380	15.610			15.610		
9	18	18.733	145.5724753	0.416	18.733			18.733	163.342	0.467	18.733			18.733		
10	20	20.814	106.3310763	0.397	20.814			20.814	174.162	0.553	20.814			20.814		
11	25	26.017			26.017			26.017	176.779	0.701	26.017			26.017		
12	30	31.221			31.221			31.221	179.692	0.856	31.221			31.221		
13	35	36.424			36.424			36.424			36.424			36.424		
14	40	41.628			41.628			41.628			41.628			41.628		
15	45	46.831			46.831			46.831			46.831			46.831		
16	50	52.035			52.035			52.035			52.035	175.389	1.392	52.035		
17	75	78.052			78.052			78.052			78.052	154.841	1.843	78.052		
18	100	104.070			104.070			104.070			104.070	141.720	2.249	104.070		
19	125	130.087			130.087			130.087			130.087			130.087		
20	150	156.105			156.105			156.105			156.105			156.105		

M-7 (Cv=40%)

ID	VELOCIDADES DE GIRO (RPM)	ORDENAMIENTO														
		M_PG/PC_DCC			M_DGC			M_PG/PM_DCC			M_PM/PC_DCC			M_DCC		
		VELOCIDAD DE CORTE (1/s)	ESFUERZO DE CORTE (N/m ²)	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)	VELOCIDAD DE CORTE	ESFUERZO DE CORTE	POTENCIA MECÁNICA CONSUMIDA (WATTS)
1	5	5.203	112.4425944	0.071	5.203			5.203			5.203			5.203		
2	6	6.244	109.6093165	0.083	6.244			6.244			6.244			6.244		
3	7	7.285	109.0638962	0.097	7.285			7.285			7.285			7.285		
4	8	8.326	127.0440053	0.129	8.326			8.326			8.326			8.326		
5	9	9.366	136.1056109	0.156	9.366			9.366			9.366			9.366		
6	10	10.407	153.7974414	0.195	10.407			10.407			10.407			10.407		
7	12	12.488	172.8726545	0.263	12.488			12.488			12.488			12.488		
8	15	15.610	180.2236354	0.343	15.610			15.610	187.948	0.358	15.610			15.610		
9	18	18.733	189.0404354	0.432	18.733			18.733	201.035	0.459	18.733			18.733		
10	20	20.814	125.8965183	0.320	20.814			20.814	210.627	0.535	20.814			20.814		
11	25	26.017			26.017			26.017	225.127	0.715	26.017			26.017		
12	30	31.221			31.221			31.221	235.268	0.896	31.221			31.221		
13	35	36.424			36.424			36.424			36.424			36.424		
14	40	41.628			41.628			41.628			41.628			41.628		
15	45	46.831			46.831			46.831			46.831			46.831		
16	50	52.035			52.035			52.035			52.035	231.089	1.614	52.035		
17	75	78.052			78.052			78.052			78.052	202.327	2.119	78.052		
18	100	104.070			104.070			104.070			104.070	192.362	2.686	104.070		
19	125	130.087			130.087			130.087			130.087			130.087		
20	150	156.105			156.105			156.105			156.105			156.105		

NOMENCLATURA:

M_PG/PC_DCC: Ordenamiento Motor_Plexiglass grande, plexiglass chico_Disco chico en el eje

M_DGC: Ordenamiento Motor_Disco grande en el eje

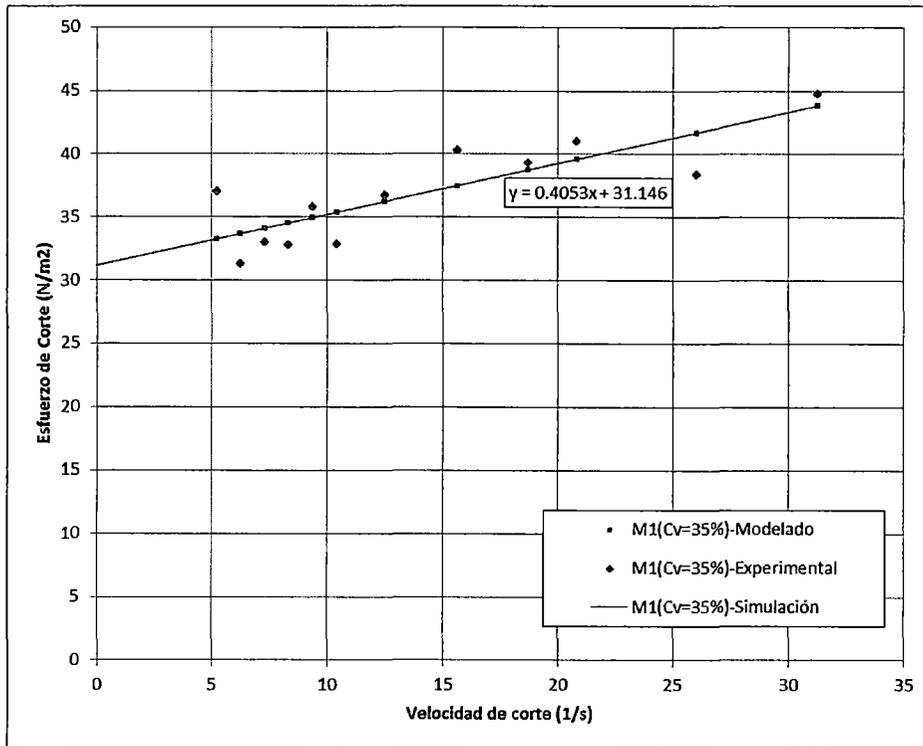
M_PG/PM_DCC: Ordenamiento Motor_Plexiglass grande, plexiglass mediano_Disco chico en el eje

M_PM/PC_DCC: Ordenamiento Motor_Plexiglass mediano, plexiglass chico_Disco chico en el eje

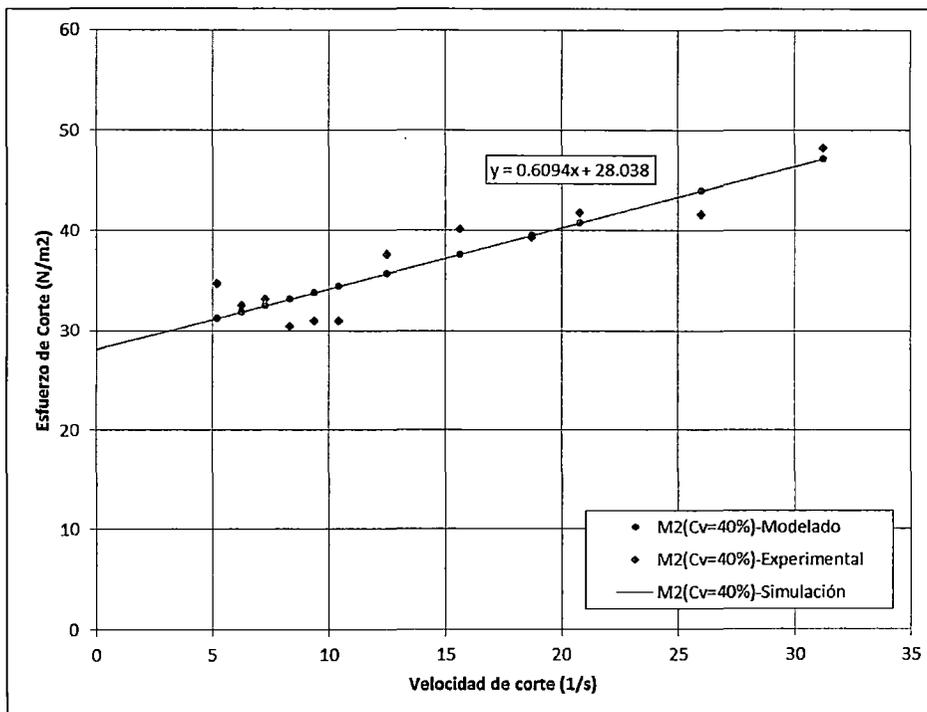
M_DCC: Ordenamiento Motor_Disco chico en el eje

A.5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN REOLÓGICA

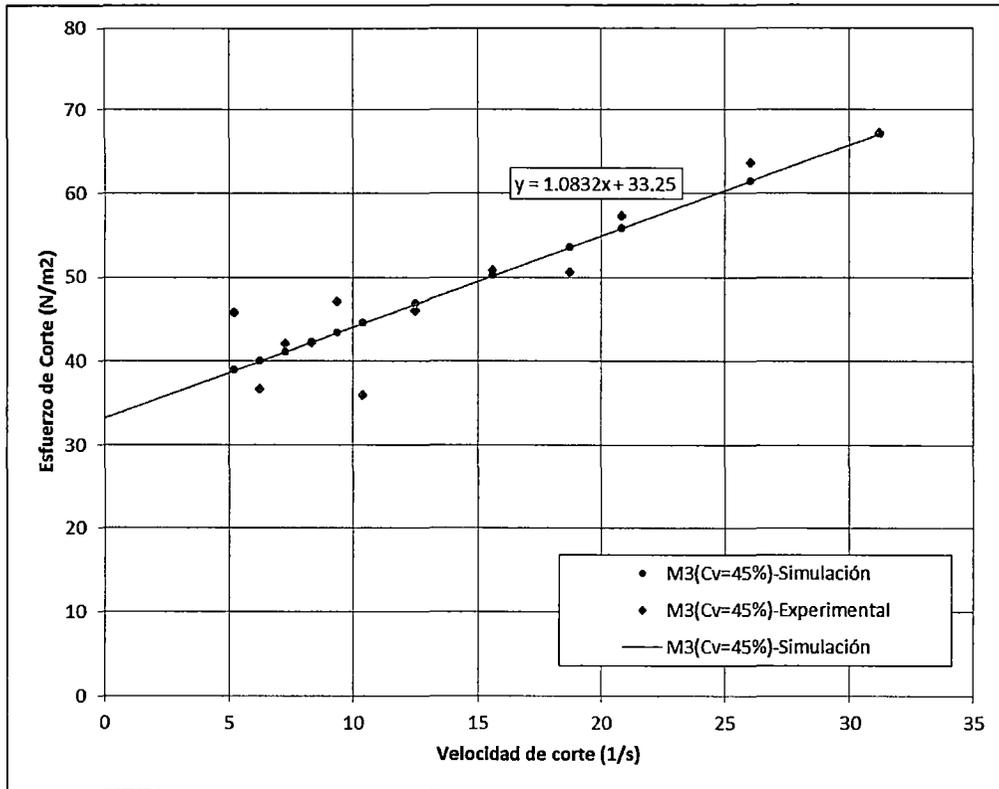
A5.1. Modelamiento de Bingham - μ y τ_y simulados. Relave Cobriza



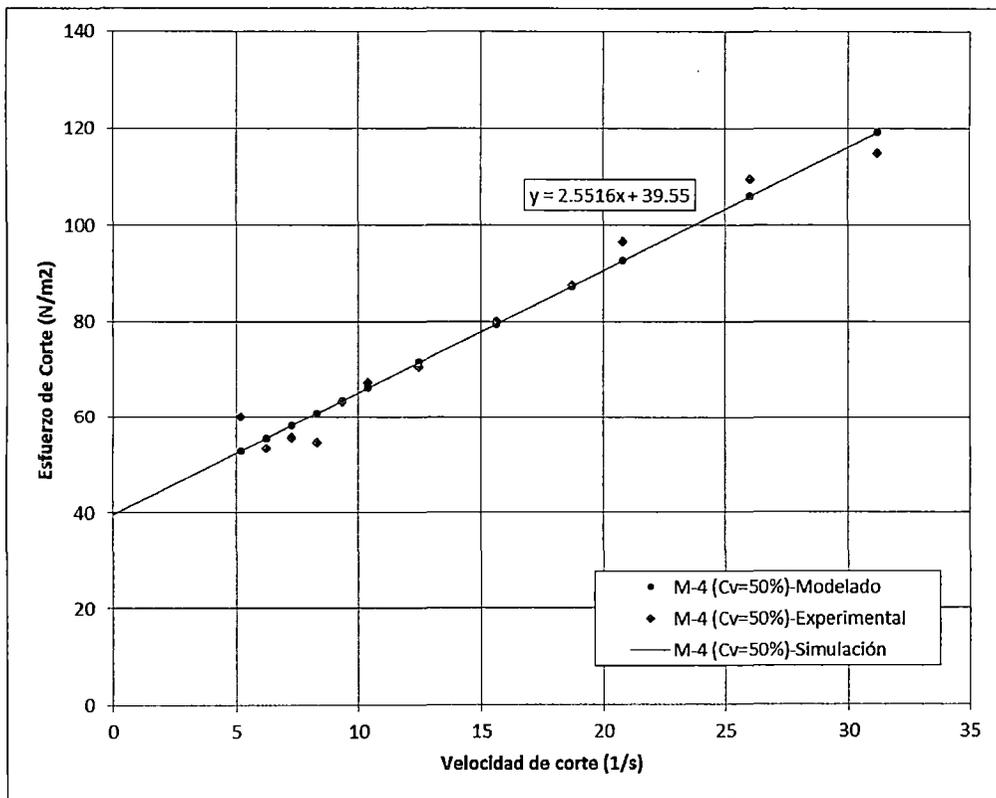
Modelamiento de Bingham - μ y τ_y simulados. Relave Cobriza M-1



Modelamiento de Bingham - μ y τ_y simulados. Relave Cobriza M-2

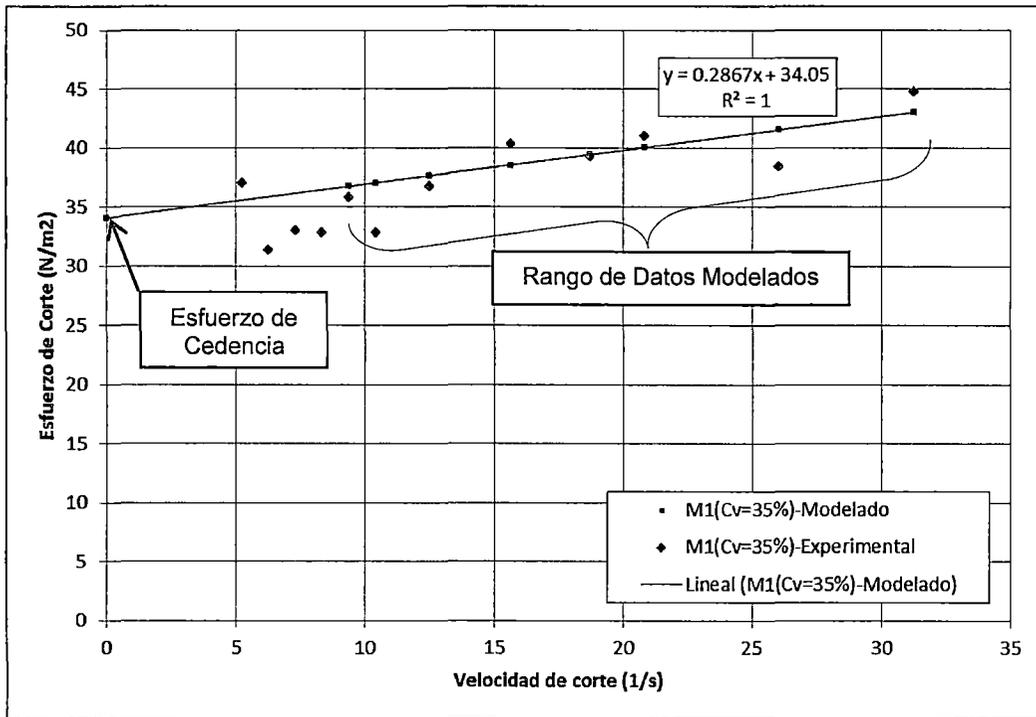


Modelamiento de Bingham – μ y τ_y simulados. Relave Cobriza M-3

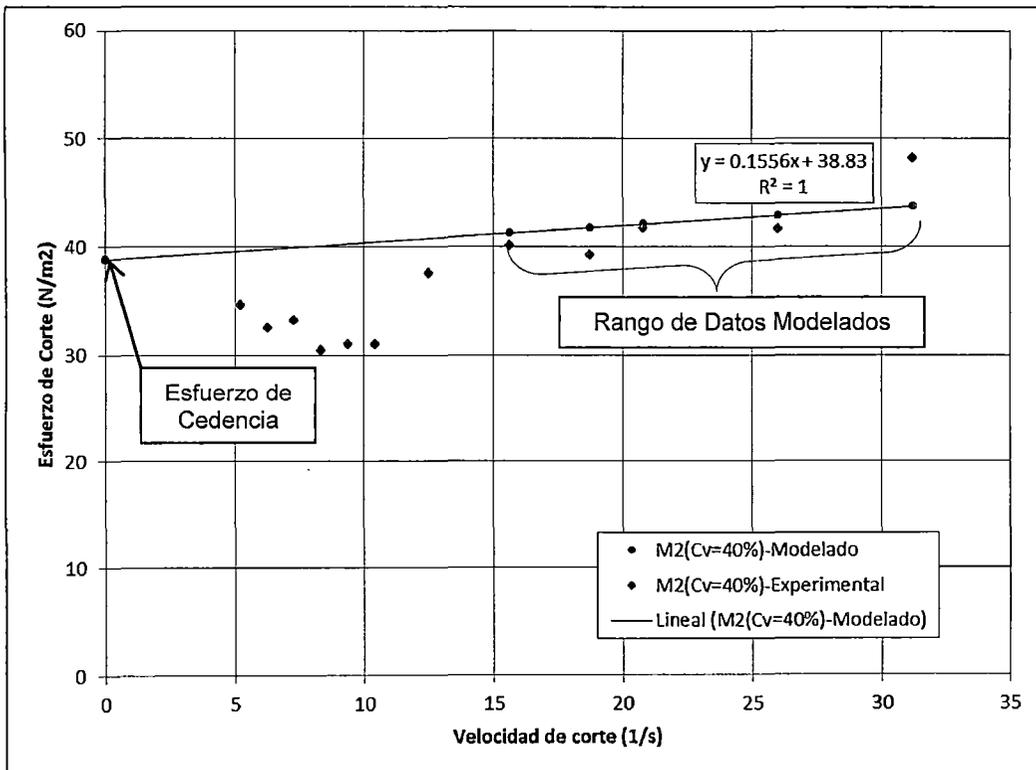


Modelamiento de Bingham – μ y τ_y simulados. Relave Cobriza M-4

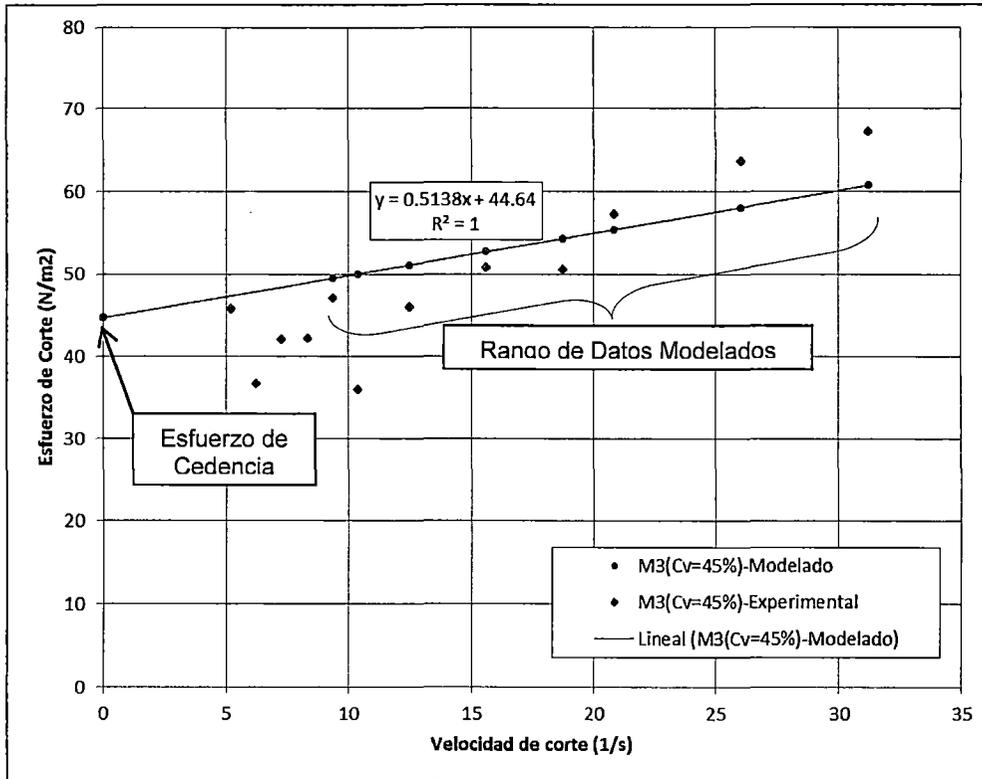
A5.2. Modelamiento de bingham - μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza



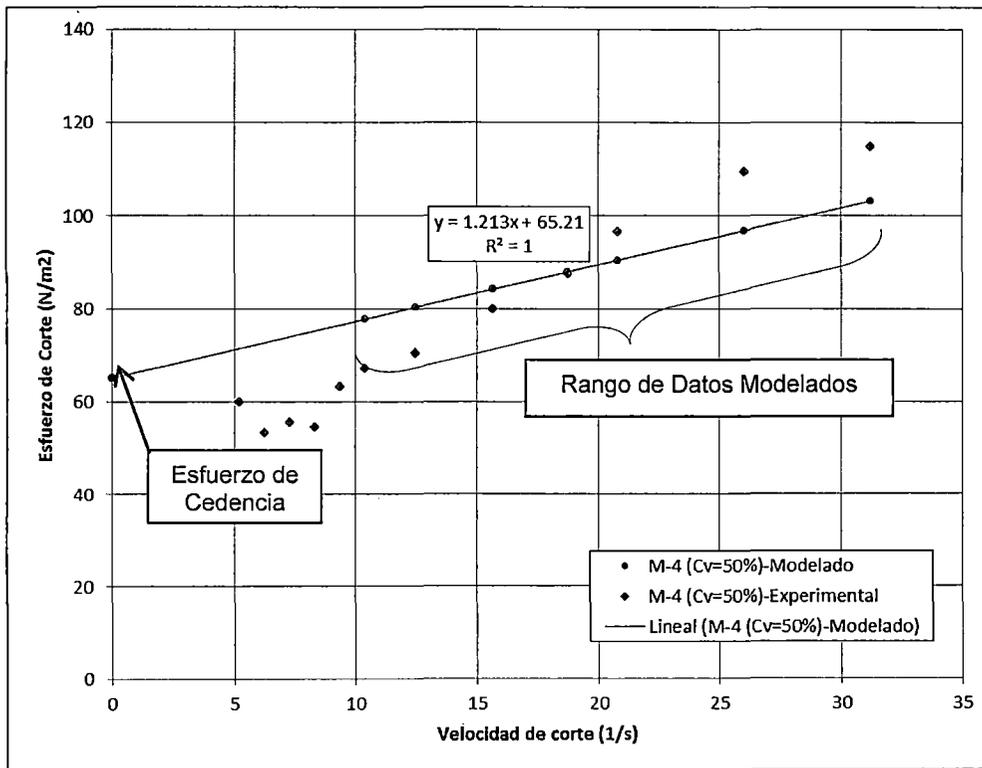
Modelamiento de Bingham – μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza M-1



Modelamiento de Bingham – μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza M-2

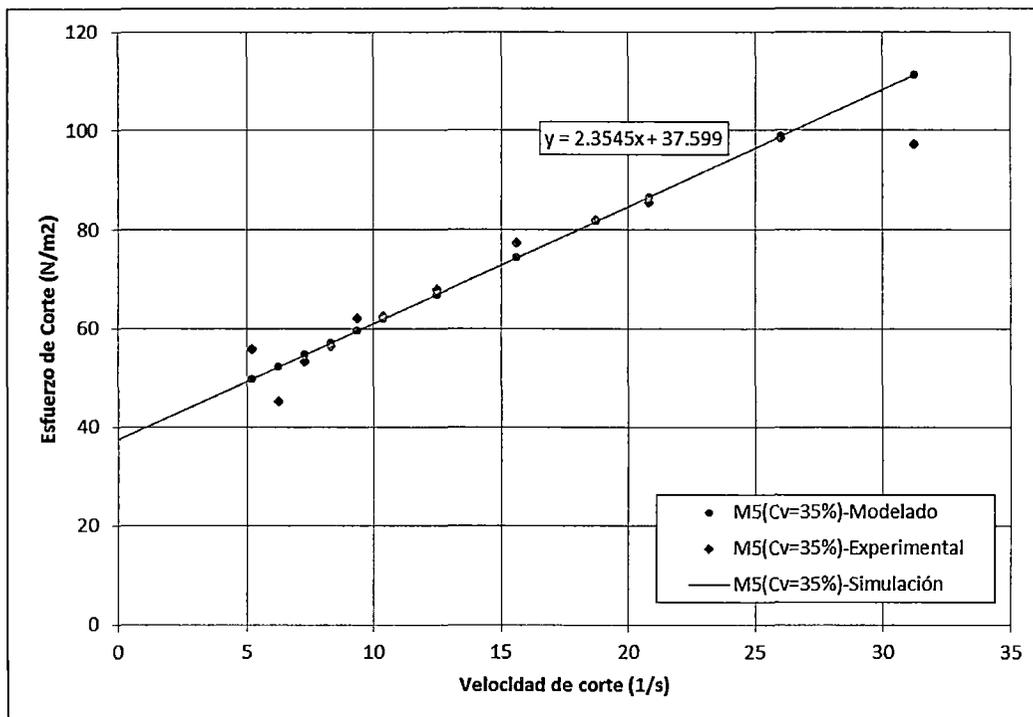


Modelamiento de Bingham – μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza M-3

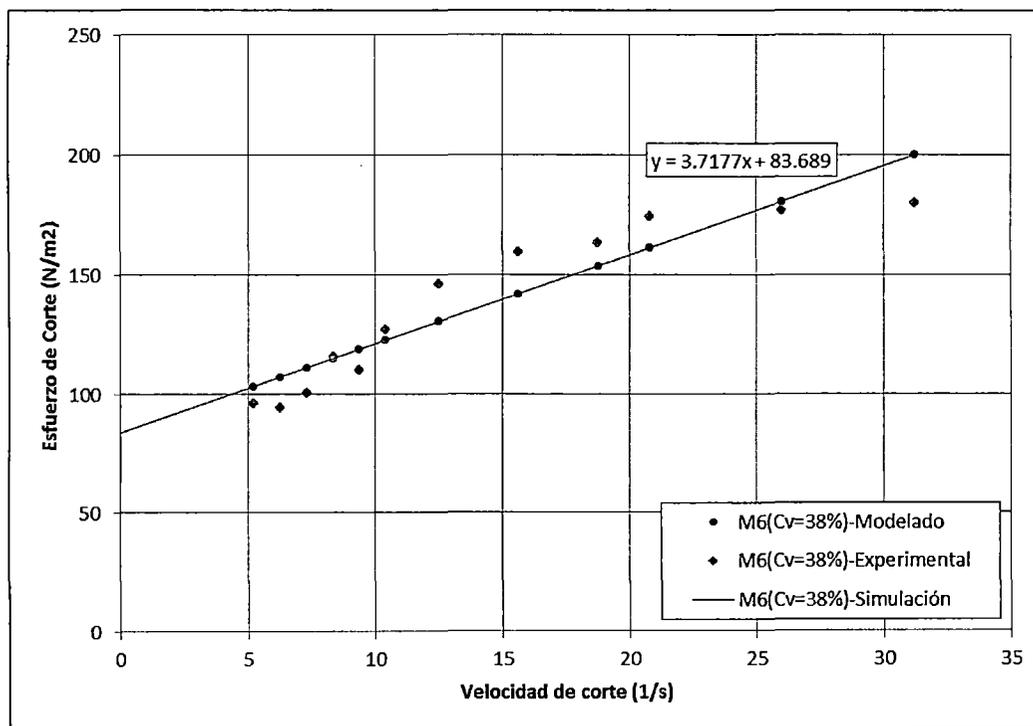


Modelamiento de Bingham – μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza M-4

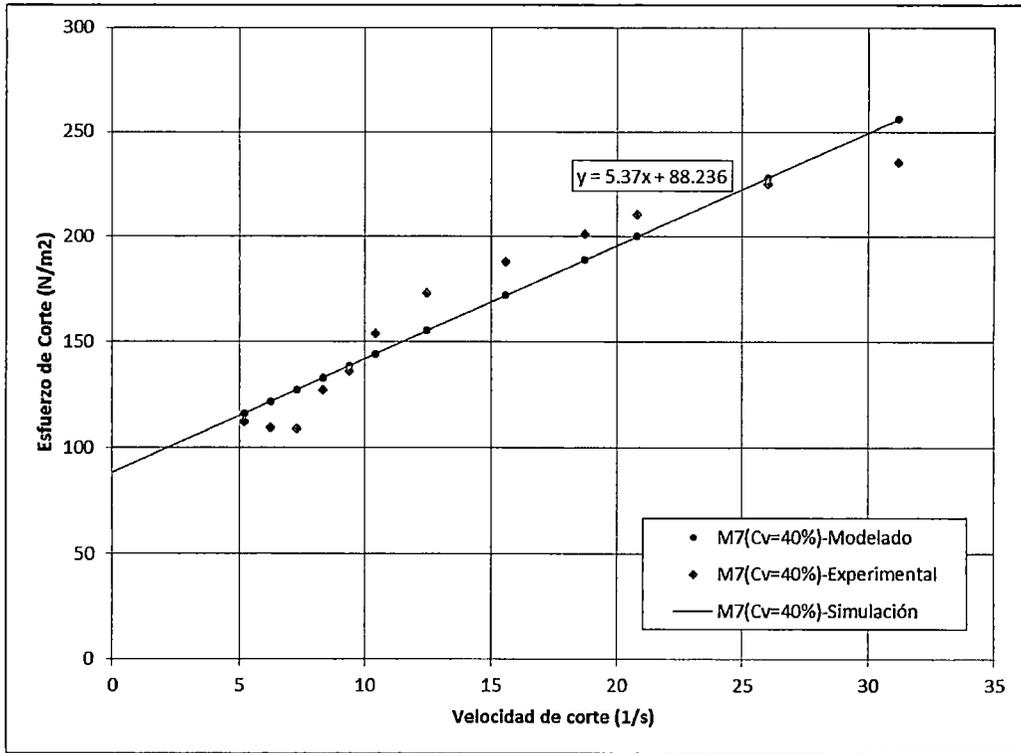
A5.3. Modelamiento de Bingham - μ y τ_y simulados. Relave Volcan



Modelamiento de Bingham - μ y τ_y simulados. Relave Volcan M-5

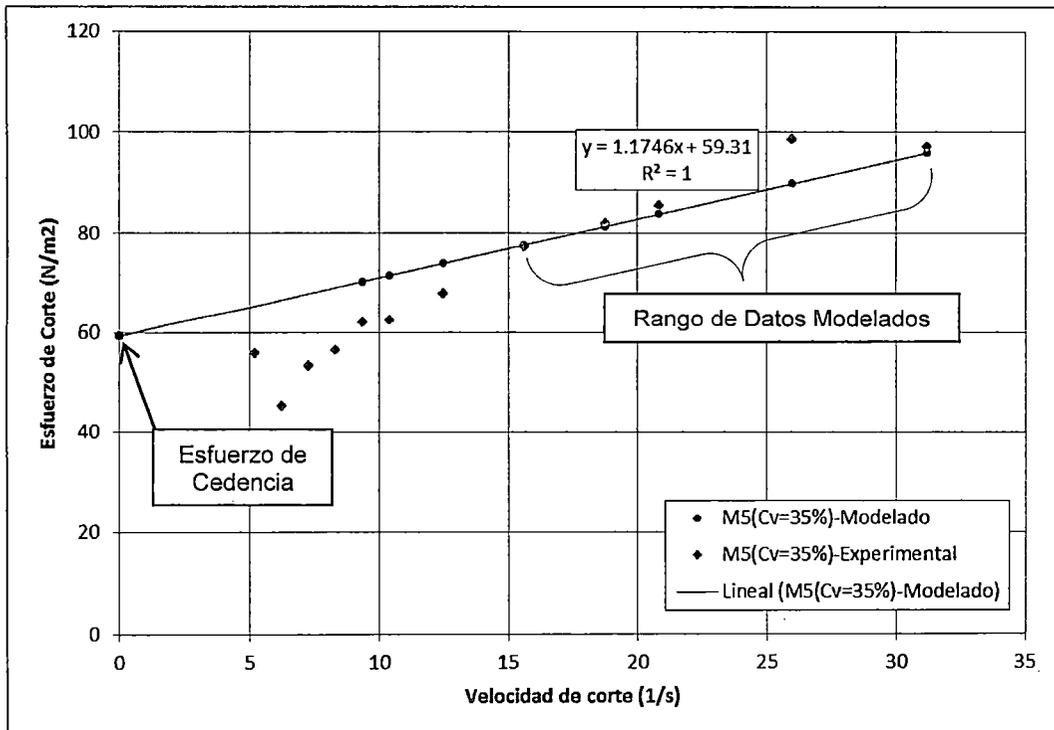


Modelamiento de Bingham - μ y τ_y simulados. Relave Volcan M-6

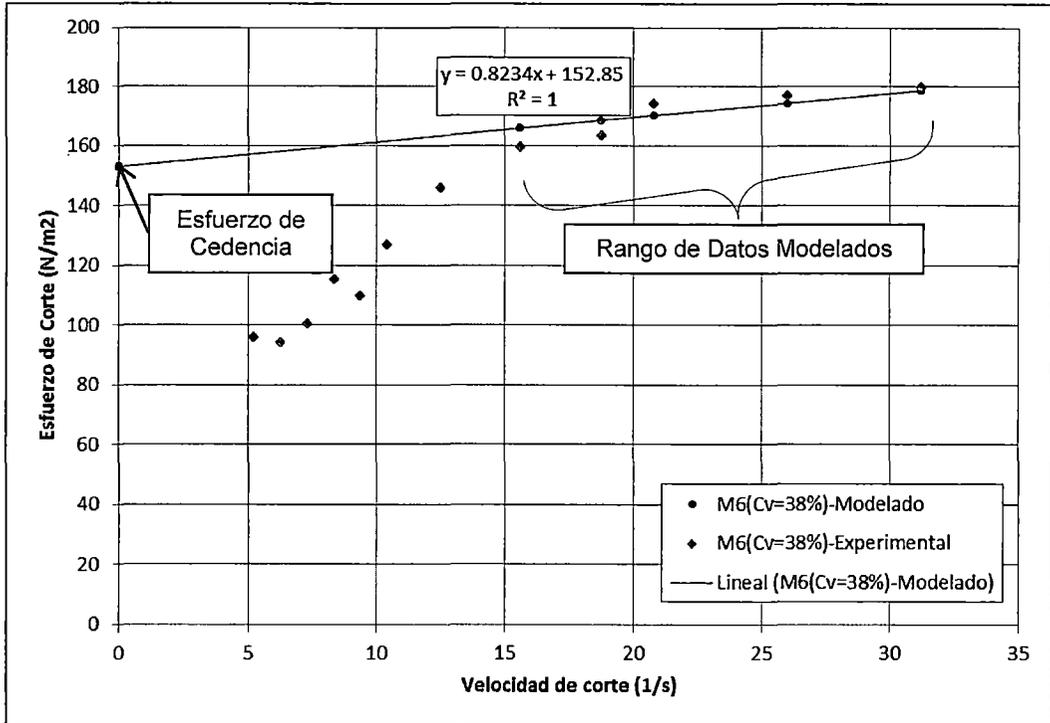


Modelamiento de Bingham – μ y τ_y simulados. Relave Volcan M-7

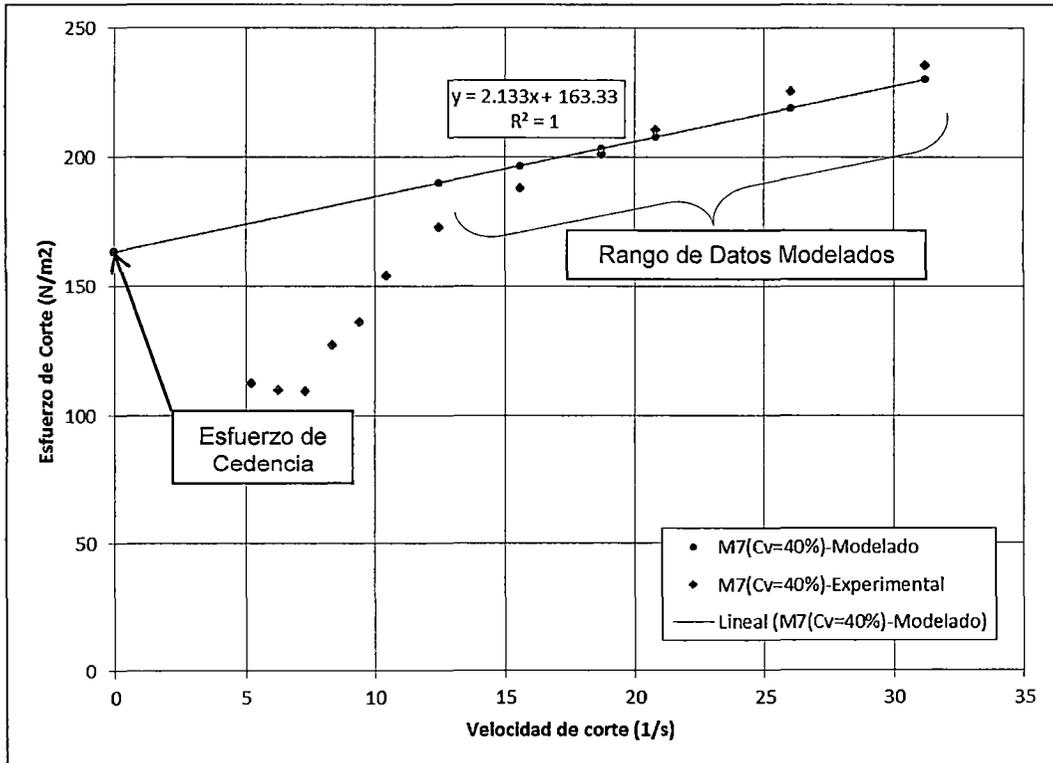
A5.4. Modelamiento de Bingham - μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan



Modelamiento de Bingham – μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan M-5

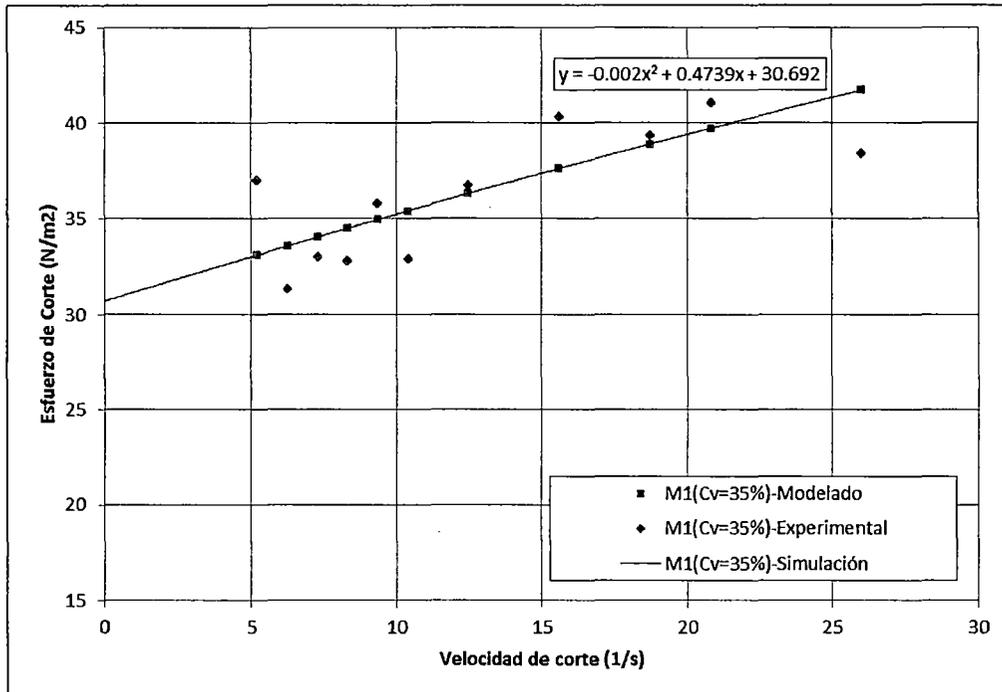


Modelamiento de Bingham – μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan M-6

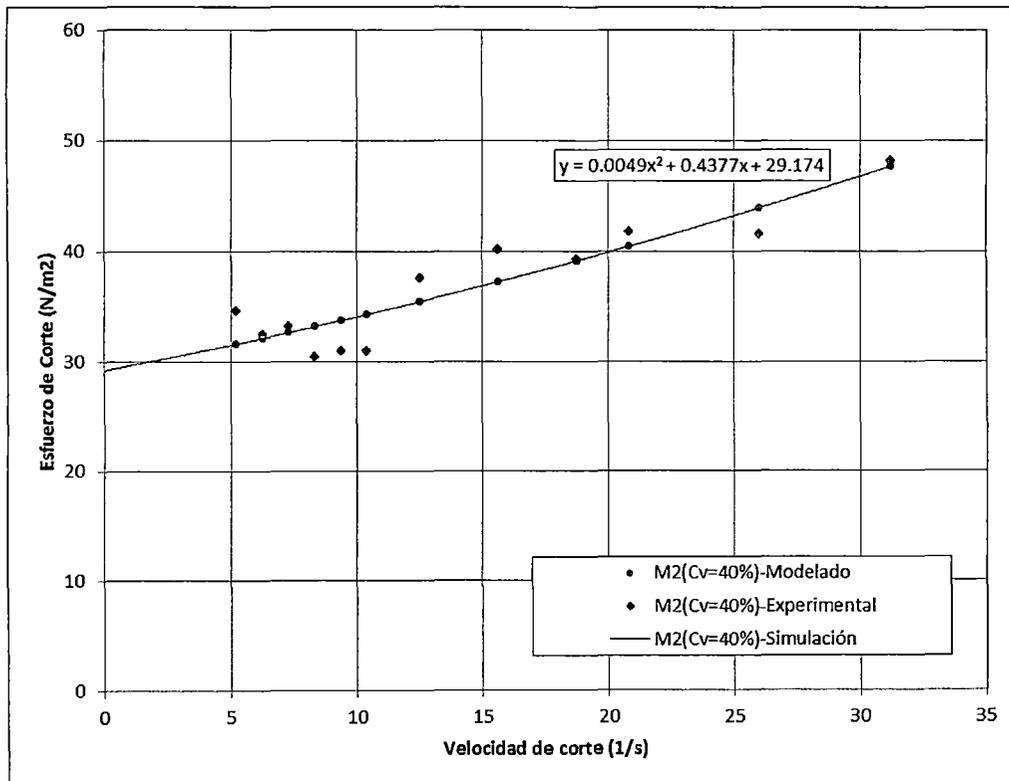


Modelamiento de Bingham – μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan M-7

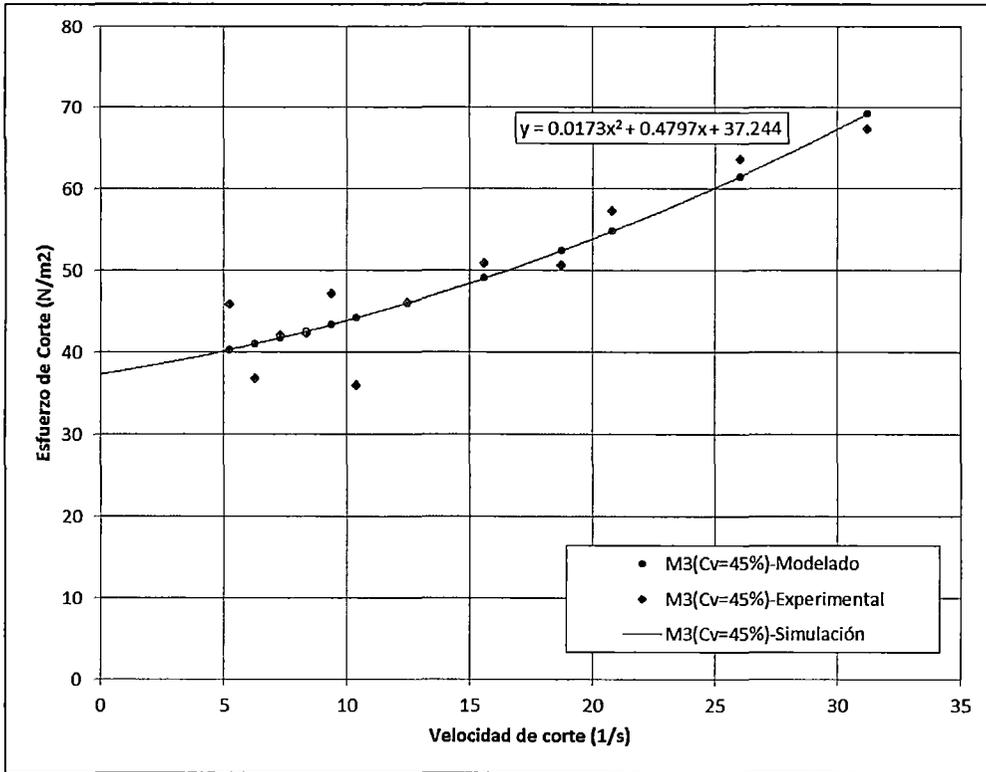
A5.5. Modelamiento de O'Brien y Julien - μ y τ_y simulados. Relave Cobriza



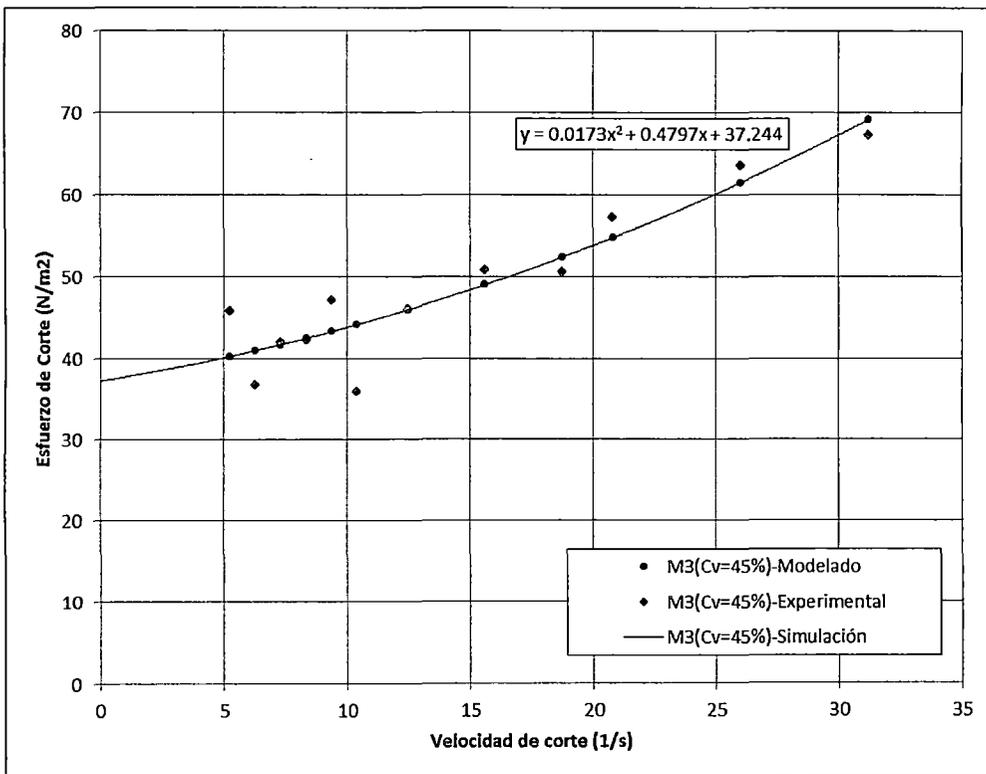
Modelamiento de O'Brien y Julien - μ y τ_y simulados. Relave Cobriza M-1



Modelamiento de O'Brien y Julien - μ y τ_y simulados. Relave Cobriza M-2



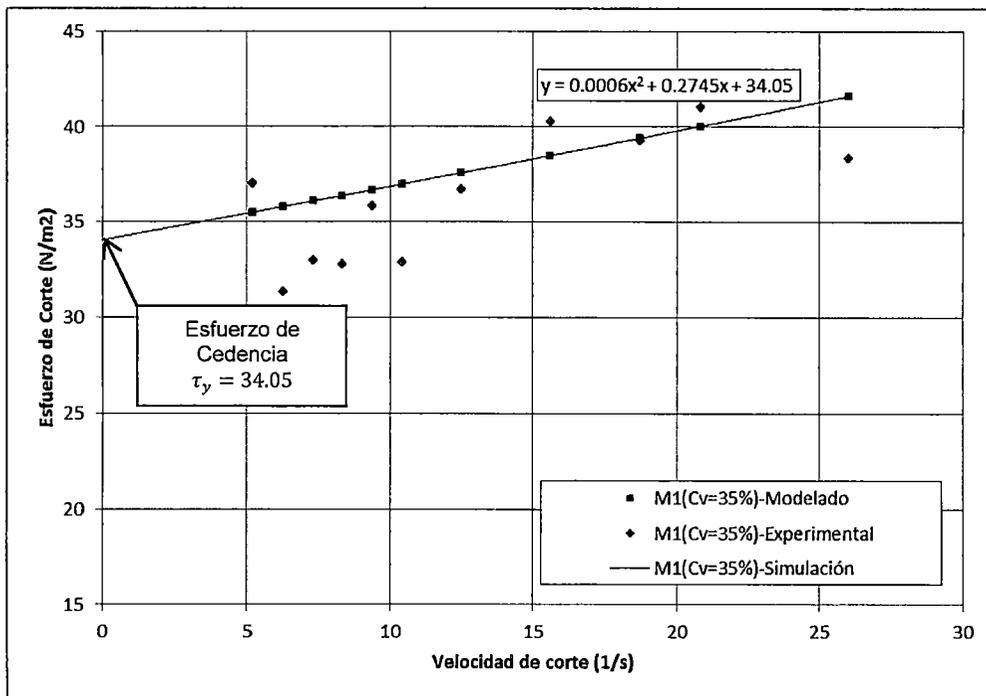
Modelamiento de O'Brien y Julien – μ y τ_y simulados. Relave Cobriza M-3



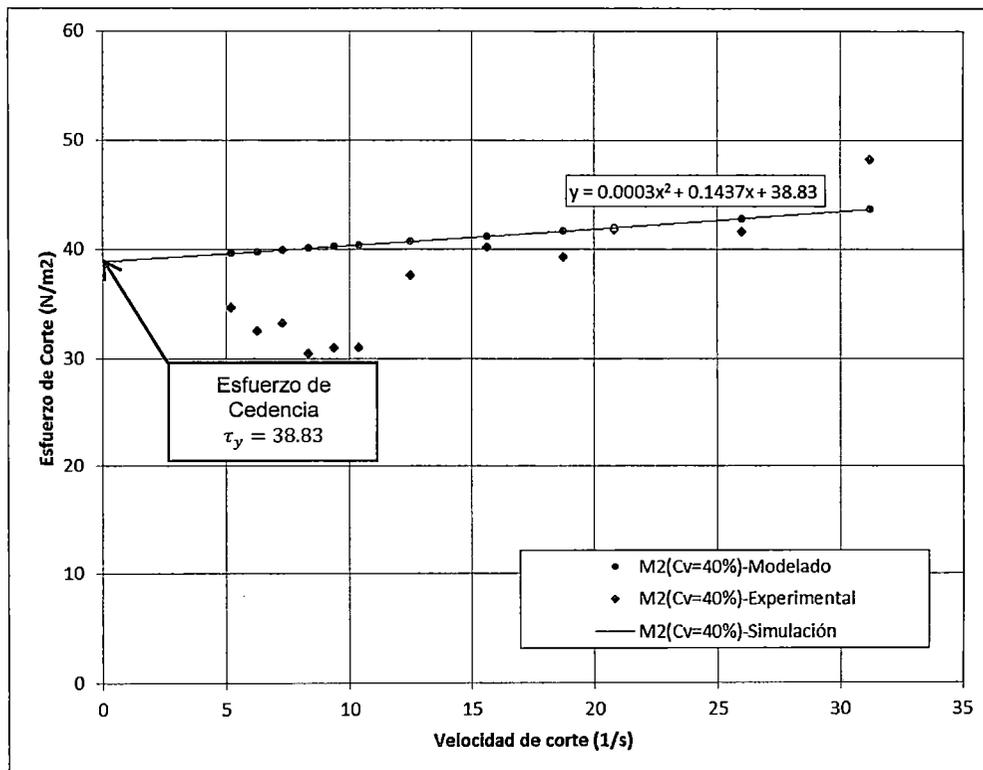
Modelamiento de O'Brien y Julien – μ y τ_y simulados. Relave Cobriza M-4

A5.6. Modelamiento de O'Brien y Julien - μ simulado y τ_y experimental.

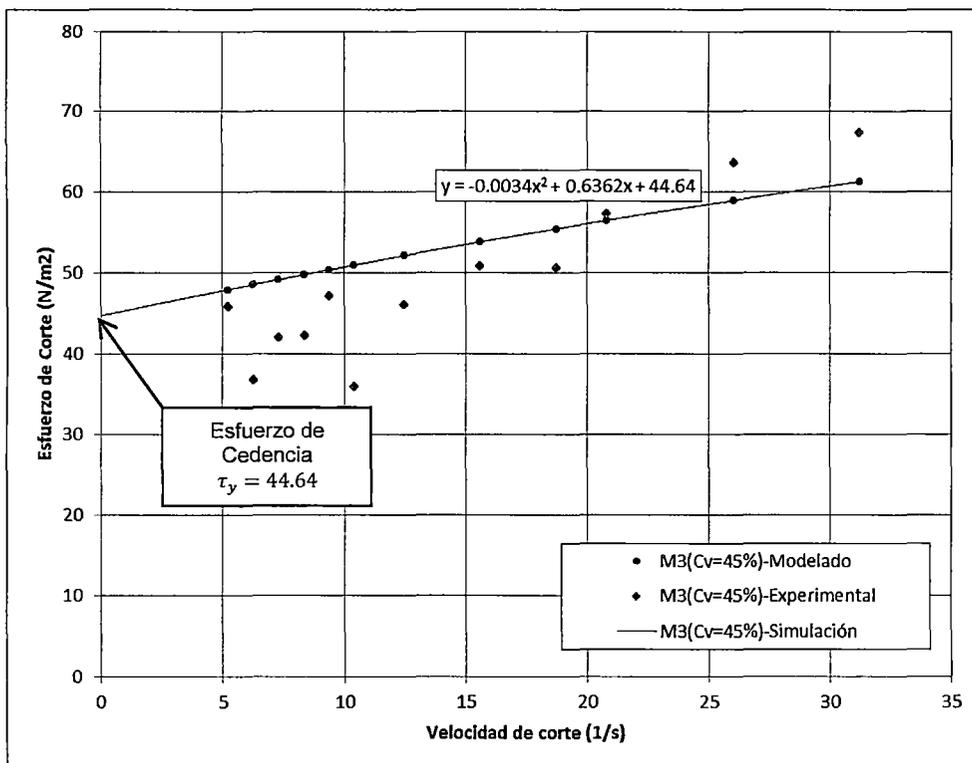
Relave cobriza



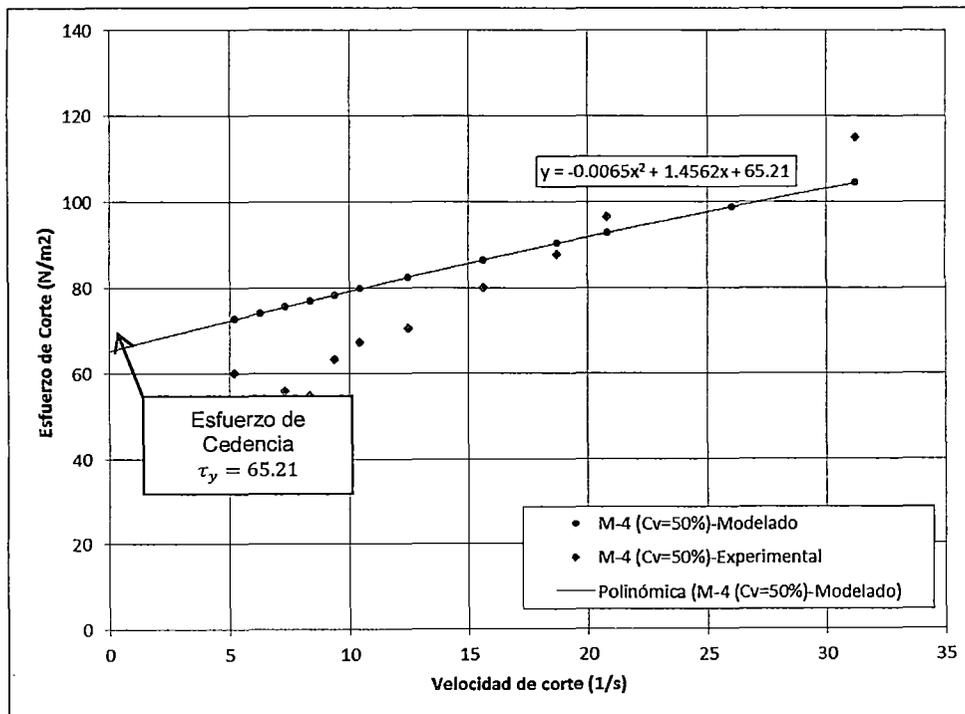
Modelamiento de O'Brien y Julien - μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza M-1



Modelamiento de O'Brien y Julien - μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza M-2

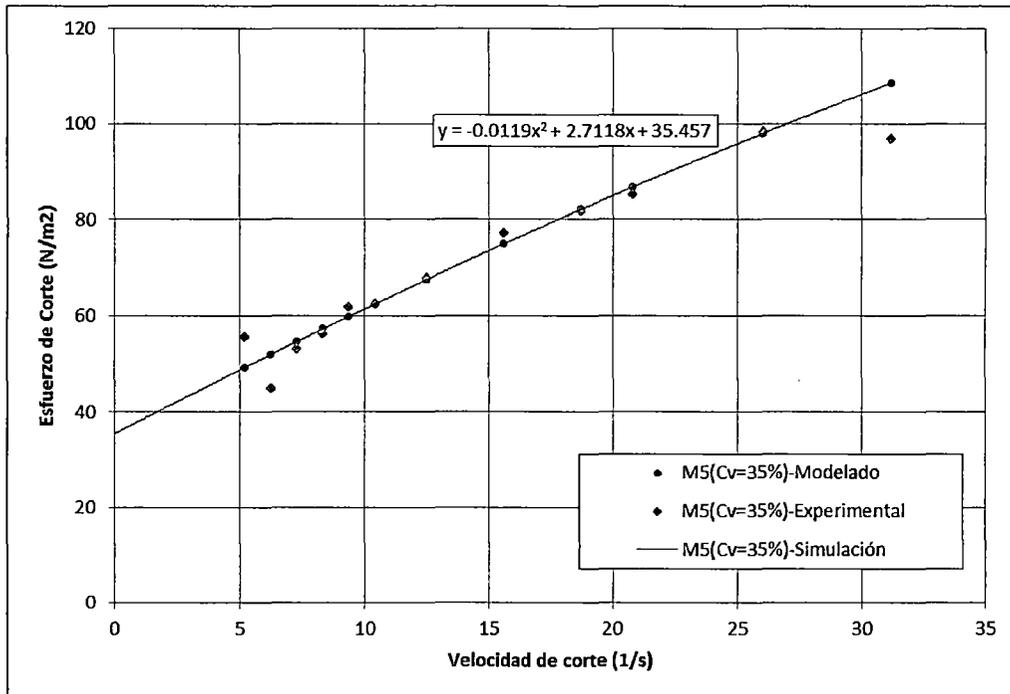


Modelamiento de O'Brien y Jlien – μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza M-3

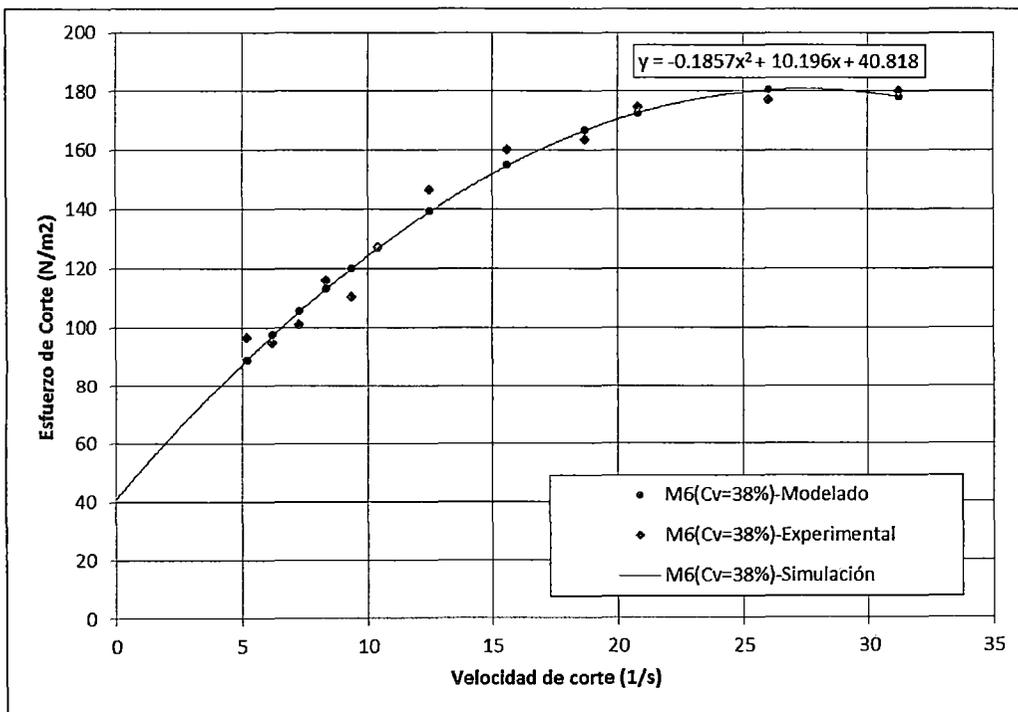


Modelamiento de O'Brien y Jlien – μ simulado y τ_y experimental. Relave Cobriza M-4

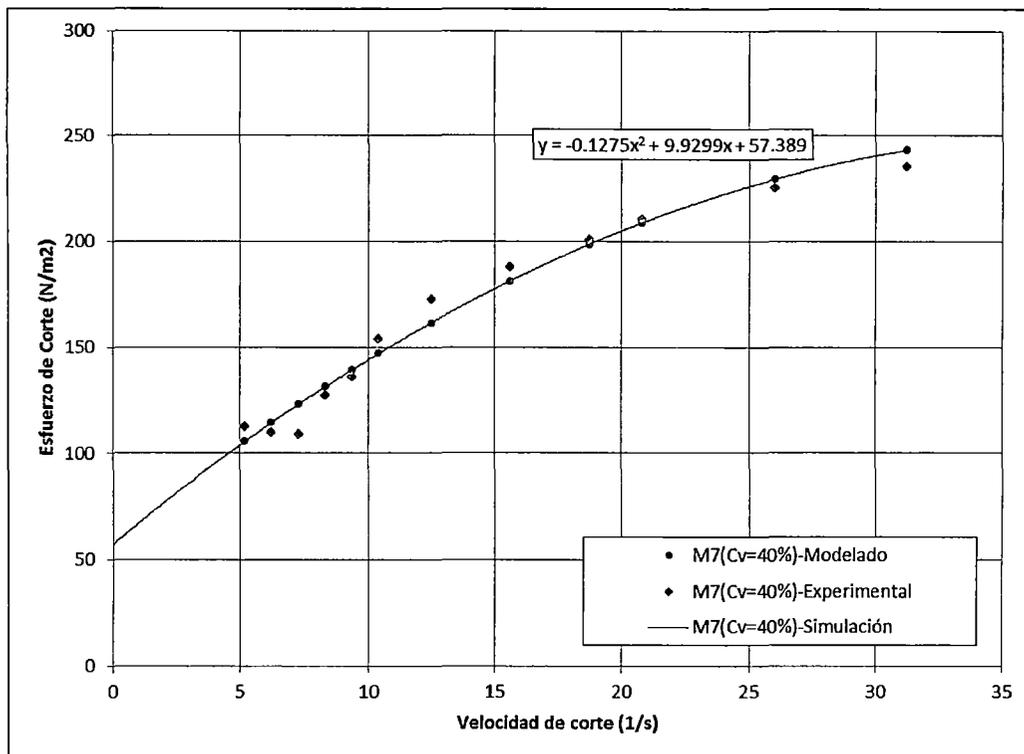
A5.7. Modelamiento de o'brien y julien - μ y τ_y simulados. Relave Volcan



Modelamiento de O'Brien y Jlien - μ y τ_y simulados. Relave Volcan M-5

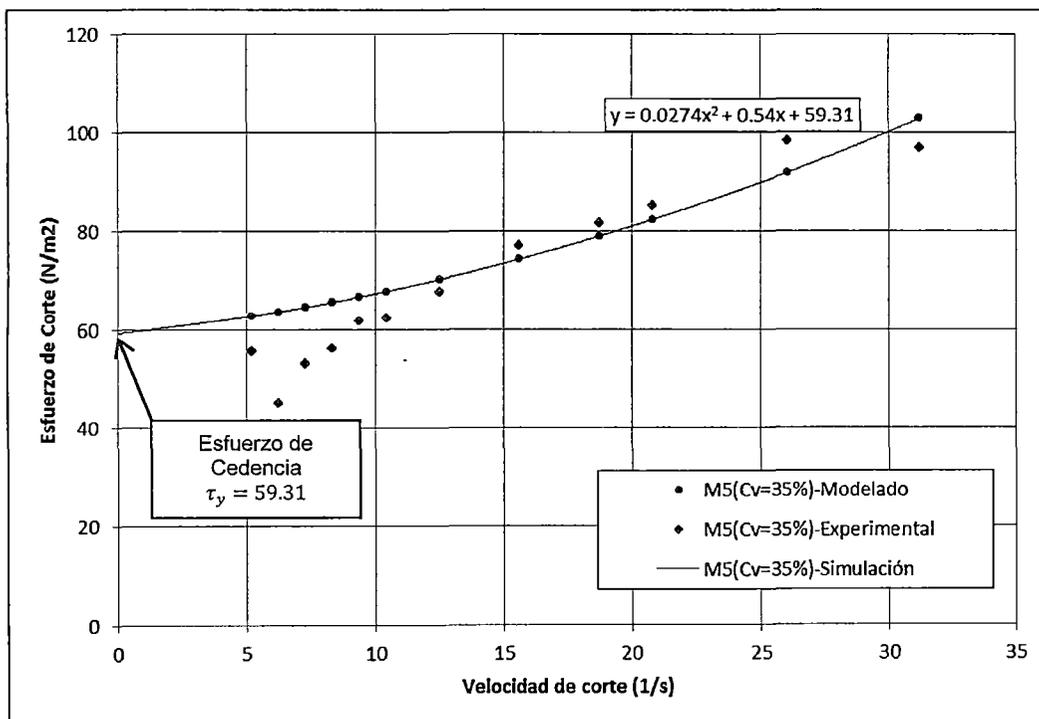


Modelamiento de O'Brien y Jlien - μ y τ_y simulados. Relave Volcan M-6

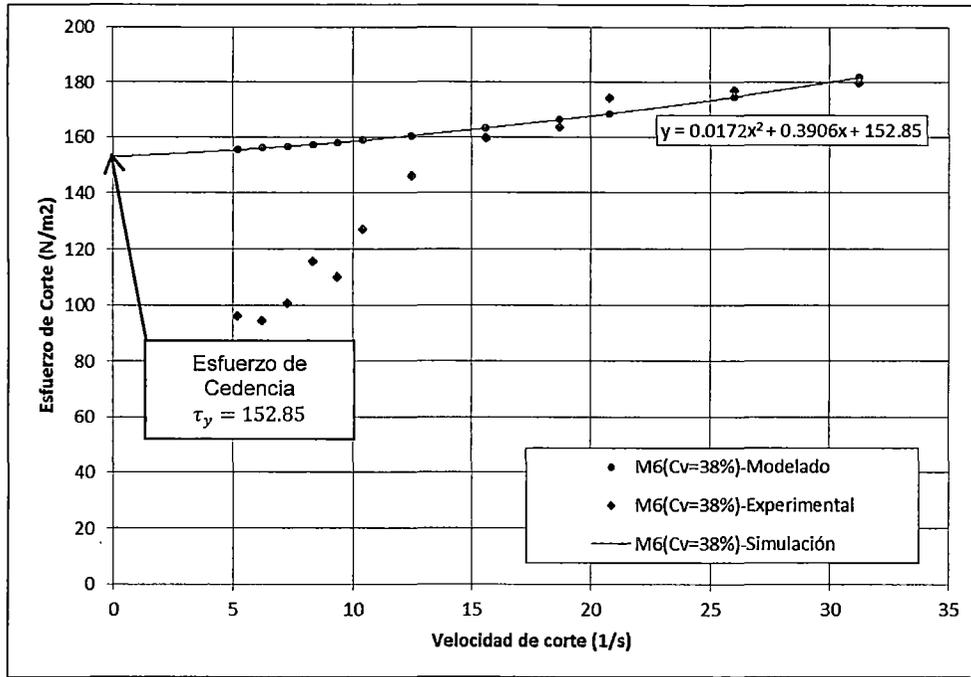


Modelamiento de O'Brien y Jlien – μ y τ_y simulados. Relave Volcan M-7

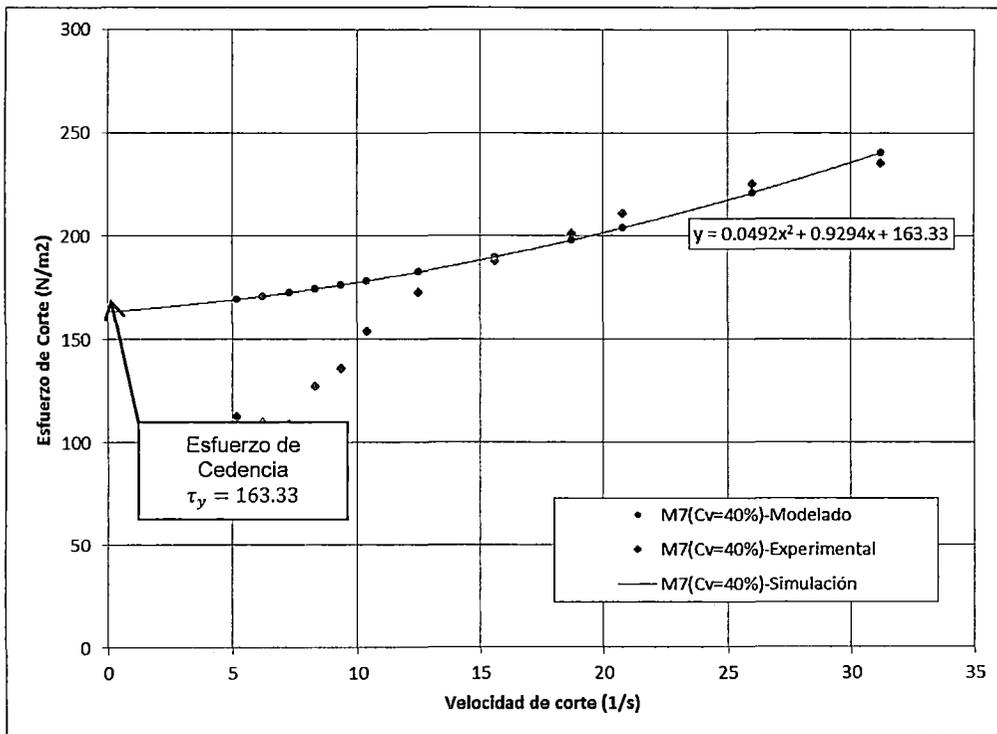
**A5.8. Modelamiento de O'Brien y Julien - μ simulado y τ_y experimental.
 Relave Volcan**



Modelamiento de O'Brien y Jlien – μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan M-5



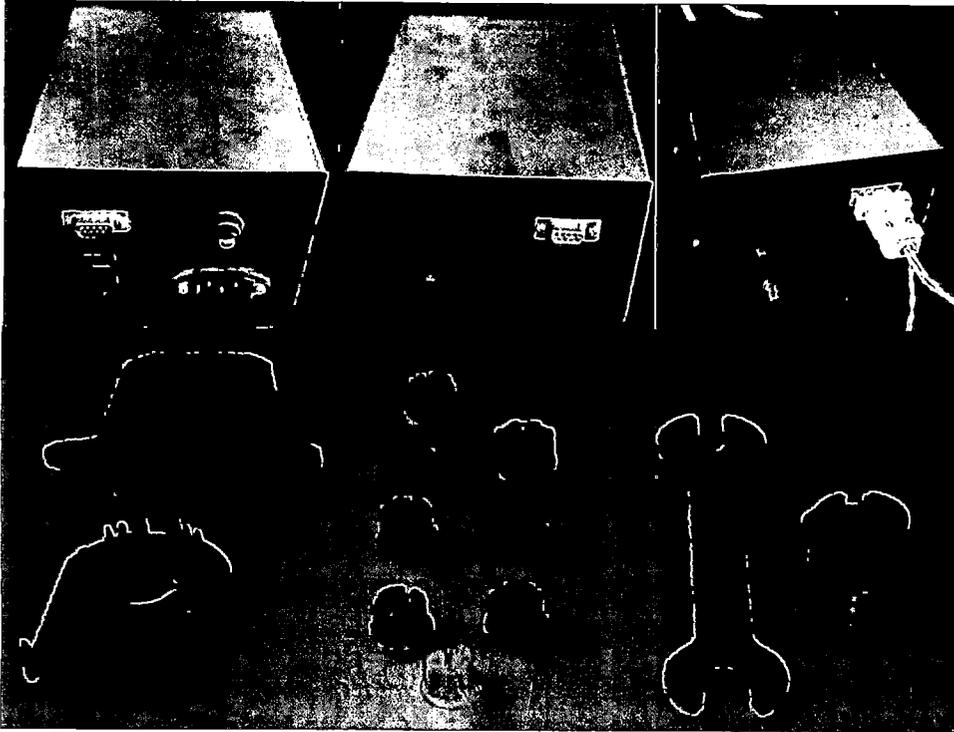
Modelamiento de O'Brien y Jlien – μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan M-6



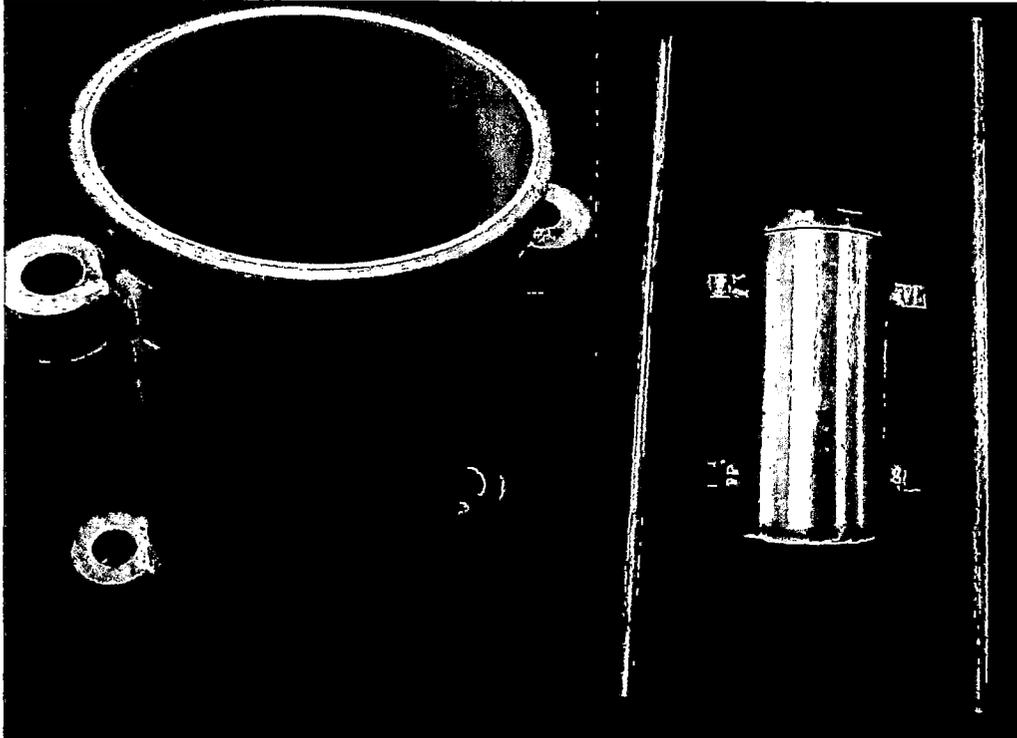
Modelamiento de O'Brien y Jlien – μ simulado y τ_y experimental. Relave Volcan M-7

A.6. PANEL FOTOGRÁFICO

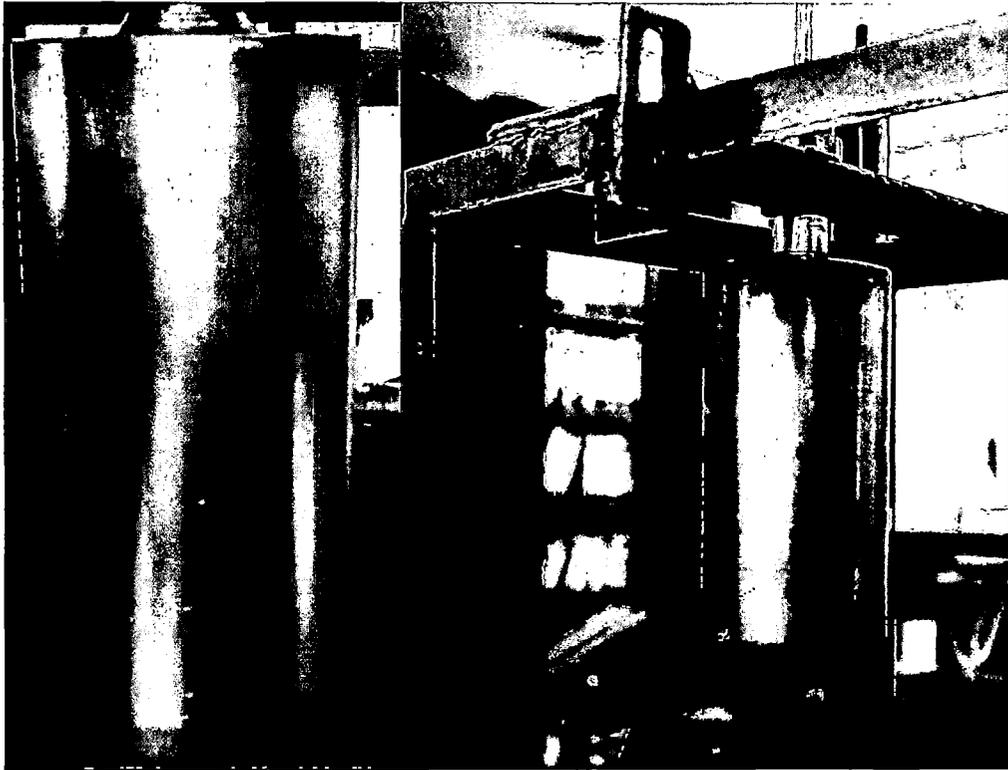
A6.1. Equipo reométrico



Fotografía 1. Arriba: interfaz mecánico-electrónico. Abajo: encoder de velocidad.



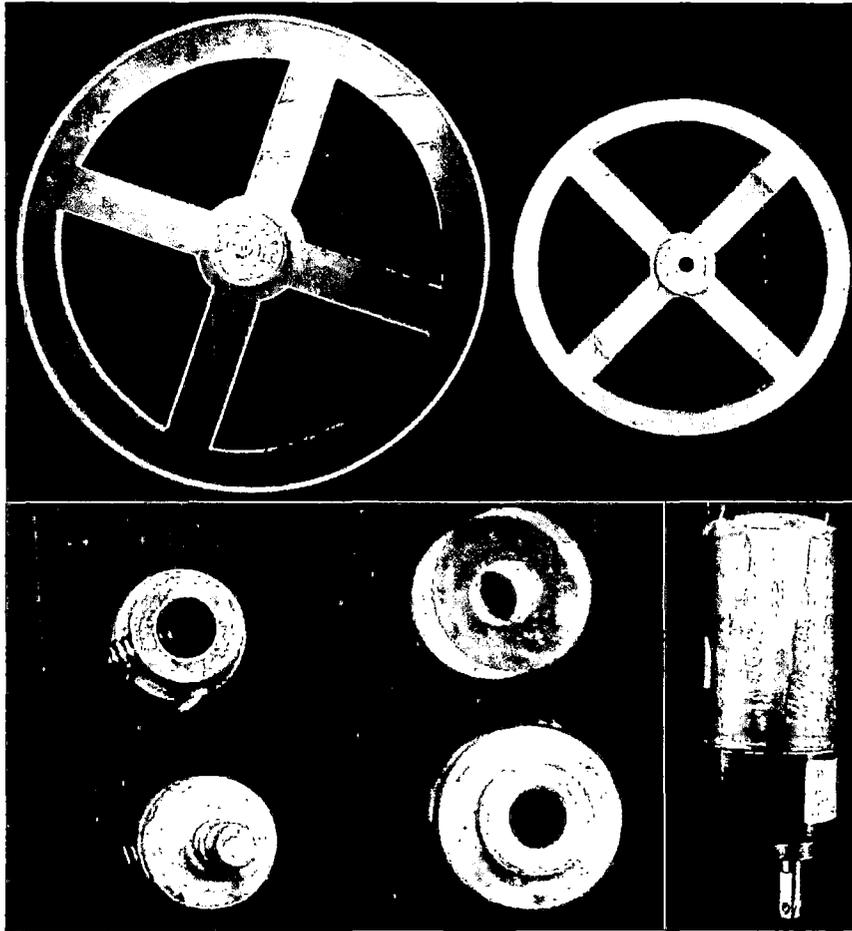
Fotografía 2. Cilindros exterior.



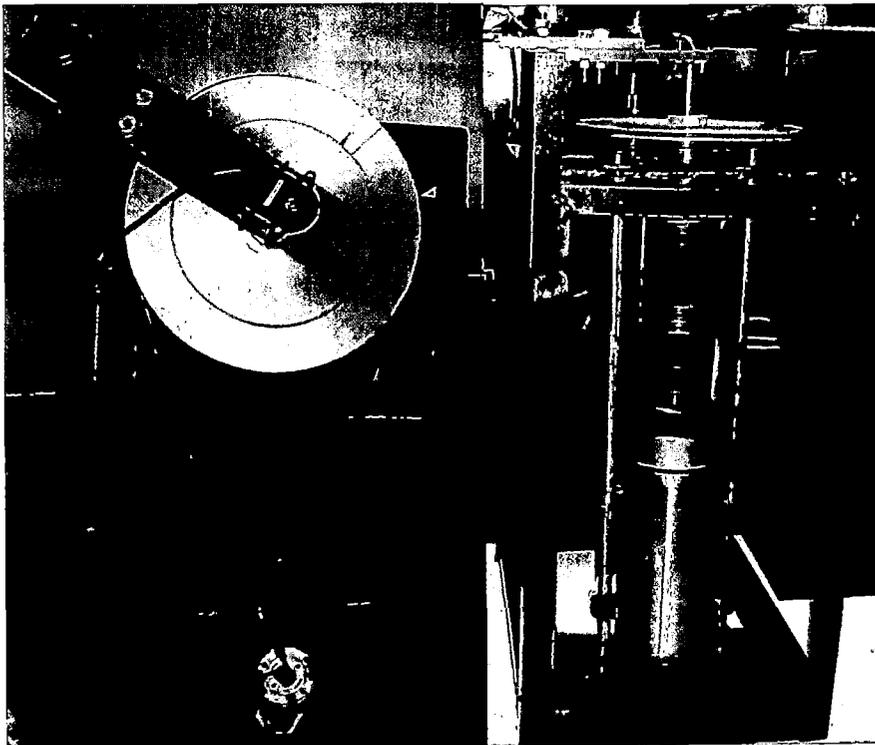
Fotografía 3. Cilindros coaxiales interior, exterior y disposición final.



Fotografía 4. Base metálica.



Fotografía 5. Discos de rotación y motor eléctrico de revoluciones.

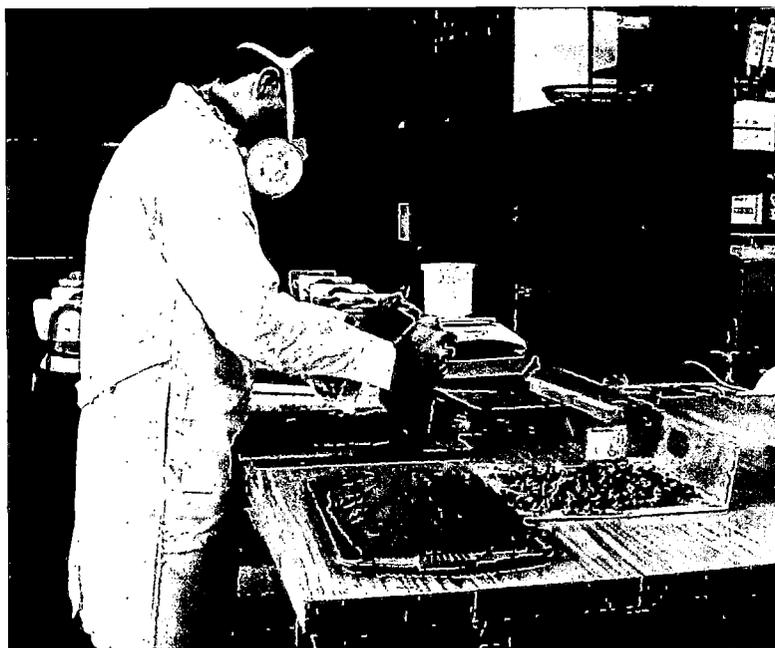


Fotografía 6. Disposición de discos reductores de velocidad.

A6.2. Preparación de muestras



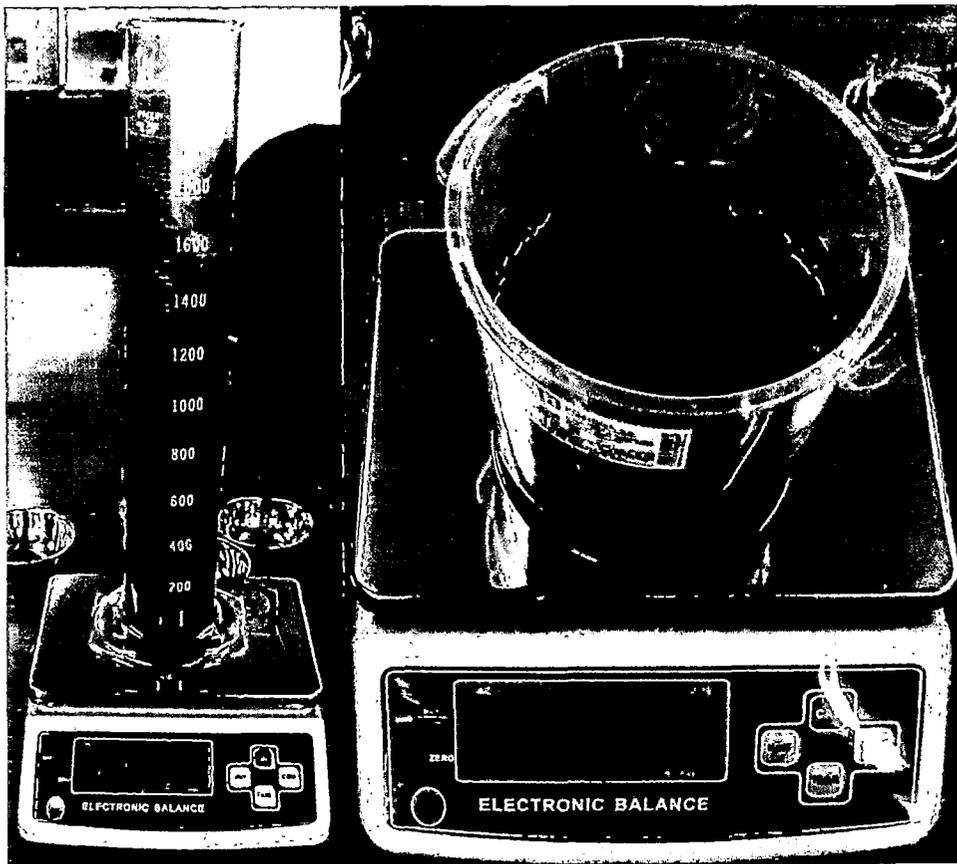
Fotografía 7. Muestra de relave ingresada al horno



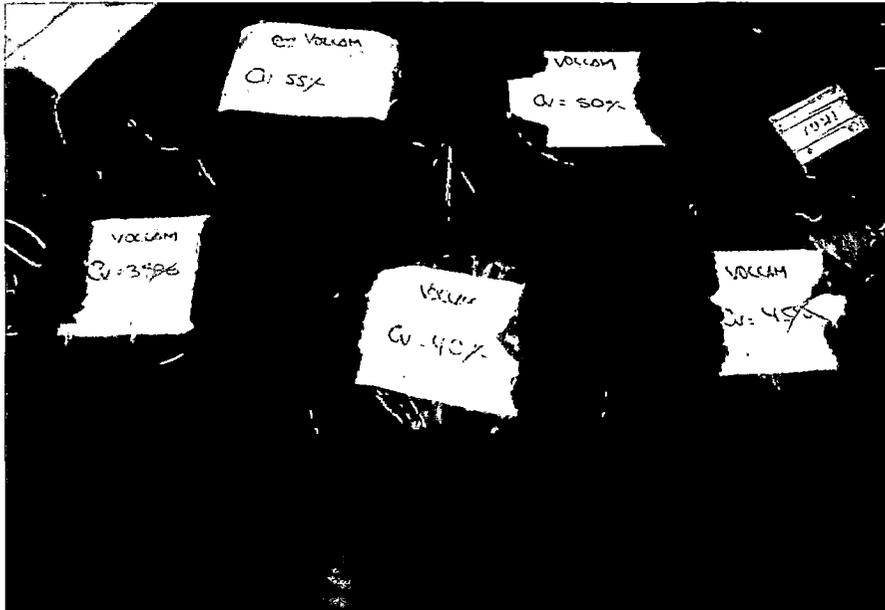
Fotografía 8. Proceso de molienda de muestra.



Fotografía 9. Muestra de relave seca y molida



Fotografía 10. Preparación de muestra de fluido hiperconcentrado

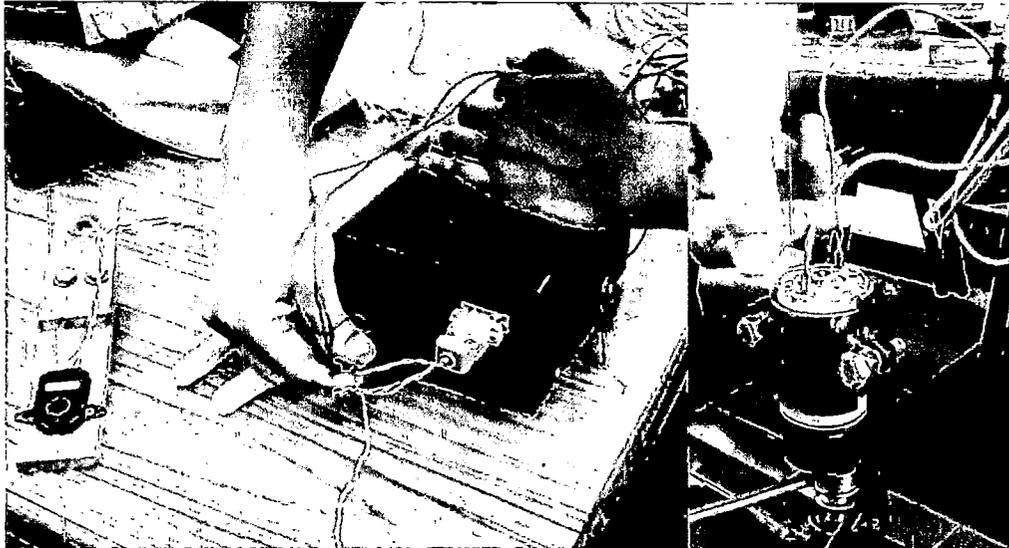


Fotografía 11. Etiquetado y almacenamiento de muestras

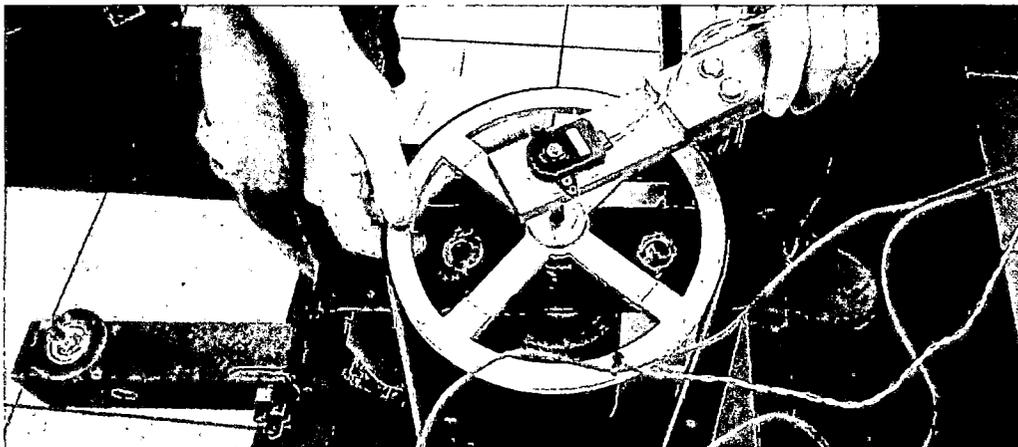
A6.3. Instalación de reómetro



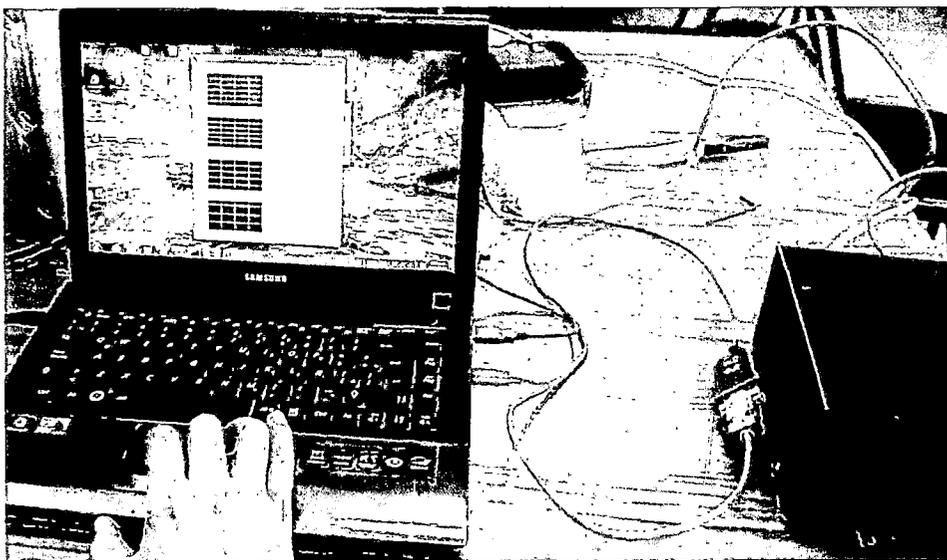
Fotografía 12. Instalación de motor y discos reductores



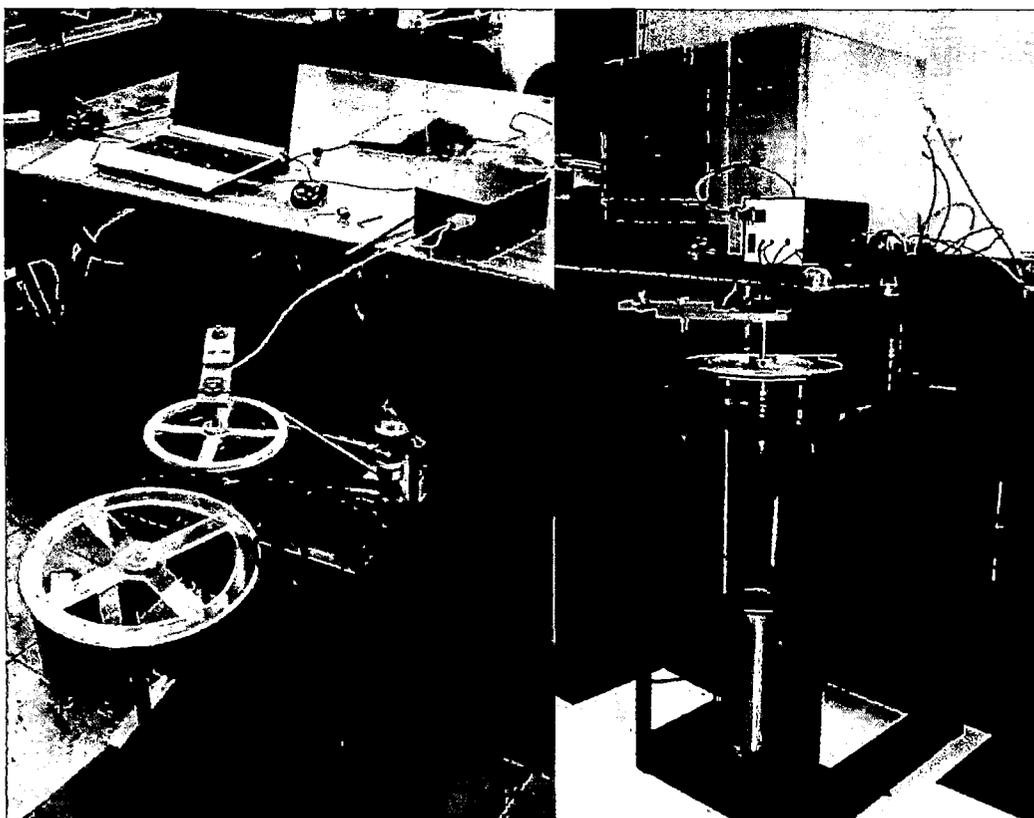
Fotografía 13. Instalación de terminales electrónicos



Fotografía 14. Instalación de sensor de velocidad

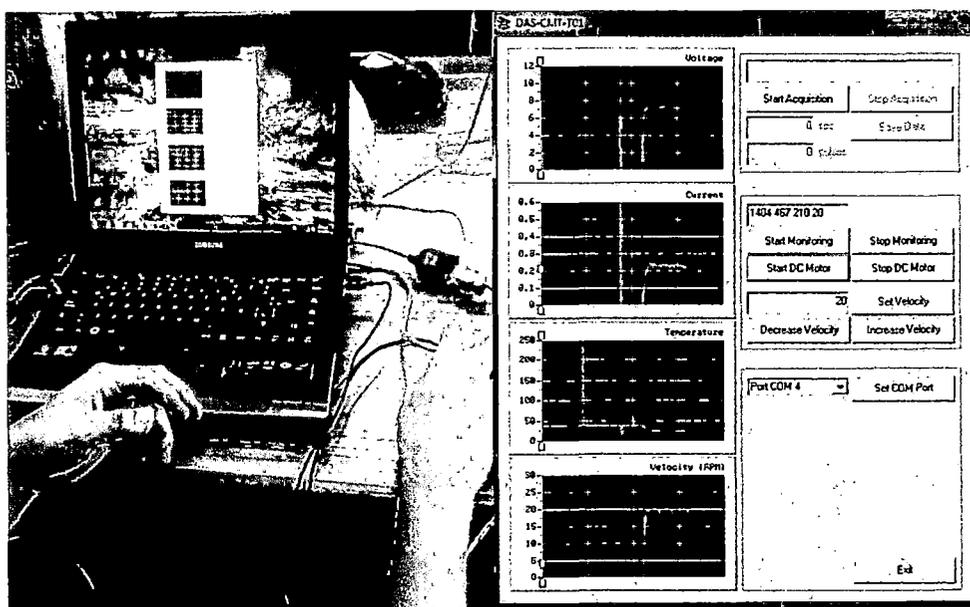


Fotografía 15. Conexión al ordenador

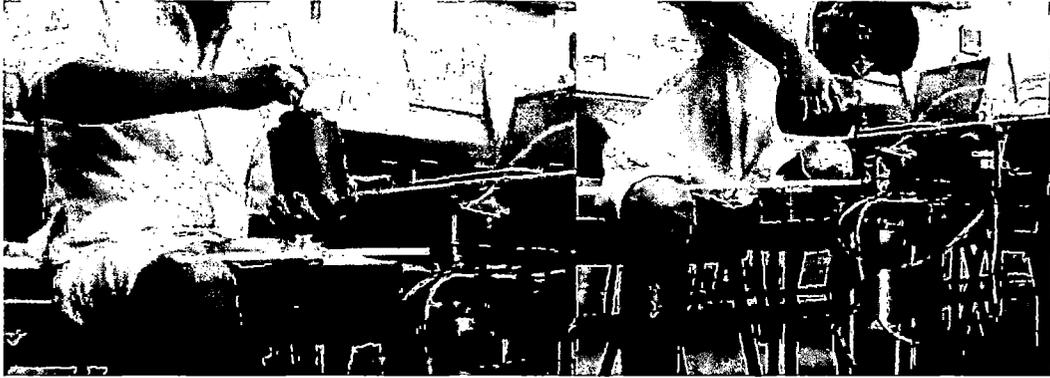


Fotografía 16. Disposición final de reómetro

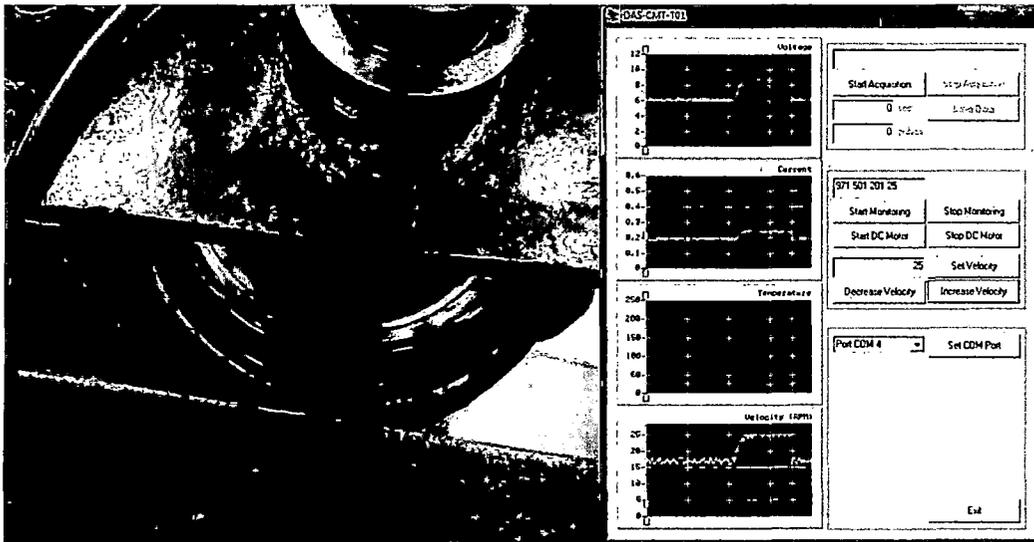
A6.4. Experimentación



Fotografía 17. Inicio del monitoreo (rotación del sistema: 20 rpm.)



Fotografía 18. Batido y vertido de la muestra con réómetro en funcionamiento



Fotografía 19. Muestra entre cilindros e incremento del consumo eléctrico



Fotografía 20. Retiro de cilindro exterior y medición de altura de contacto

A.7. ESPECIFICACIONES ELECTRICAS Y ELECTRONICAS

A7.1. Especificaciones técnicas motor electrico

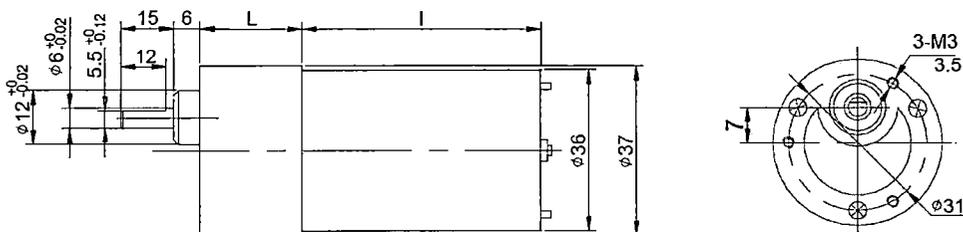
BDSG-37-57-12V Series



- DC Brush GearMotor
- Designed for high volume applications
- Up to 166 oz in (12 kg-cm) of Peak Torque
- Up to 83 oz in (6 kg-cm) of Continuous Torque
- 37 mm motor body diameter
- Custom versions are available

BDSG-37-057-12V-4200-Rxx Specifications

Gear Ratio, Rxx number	6	10	18	30	50	75	100
Rated Voltage (VDC)	12V						
No-load speed before gearbox (RPM)	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200
No-load current (A)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Rated speed before gearbox (RPM)	3650	3650	3650	3650	3650	3650	3650
Output Power (Watts)	7	7	7	7	7	7	7
Rated current (A)	2	2	2	2	2	2	2
Stall current (A)	5	5	5	5	5	5	5
Length "I" (mm)	57	57	57	57	57	57	57
Length "L" (mm)	21.5	21.5	26.5	26.5	29	29	29
No Load Speed after gearbox (RPM)	700	420	233	140	84	56	42
Rated Speed after gearbox (RPM)	608	365	202	122	73	51	39
Rated Torque after gearbox (kg-cm)	0.9	1.5	2.4	4.0	6	6	6
Peak Torque after gearbox (kg-cm)	3	3	6	6	12	12	12
Rotation Direction	CCW	CCW	CW	CW	CCW	CCW	CCW



Doc #L.010329

910 E. Orangefair Ln. Anaheim, CA 92801 Tel (714) 992-6990 Fax (714) 992-0471
www.anaheimautomation.com

A7.2. Especificaciones encoder de velocidad

SLEEVES		SHAFT ADAPTER	102 WIDE BASE	PIN-OUT																					
	2mm			<table border="1"> <tr> <th>PIN</th> <th>DESCRIPTION</th> </tr> <tr> <td>B</td> <td>B CHANNEL</td> </tr> <tr> <td>5V</td> <td>+5VDC POWER</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>A CHANNEL</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>INDEX OUTPUT</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>GROUND</td> </tr> <tr> <td>T</td> <td>FOR FUTURE USE</td> </tr> </table>	PIN	DESCRIPTION	B	B CHANNEL	5V	+5VDC POWER	A	A CHANNEL	X	INDEX OUTPUT	G	GROUND	T	FOR FUTURE USE	<table border="1"> <tr> <th>102 BASE</th> <th>102 TOP COVER</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>	102 BASE	102 TOP COVER				
PIN	DESCRIPTION																								
B	B CHANNEL																								
5V	+5VDC POWER																								
A	A CHANNEL																								
X	INDEX OUTPUT																								
G	GROUND																								
T	FOR FUTURE USE																								
102 BASE	102 TOP COVER																								
	3mm																								
	1/8 inch (3.175mm)																								
	4mm																								
	3/16 inch (4.76mm)																								
	5mm																								
	6mm																								
	1/4 inch (6.35mm)																								
	8mm																								

MATING CONNECTOR
 MOLEX 50-57-9405 HOUSING
 MOLEX 16-02-0086 TERMINALS
 (CABLES AVAILABLE, SOLD SEPARATELY)

Resolution Options (PPR)
 All resolutions listed are before quadrature decoding (example: 1000PPR x 4 = 4000 counts).
 Resolutions of AMT102 VersaPak = 48, 96, 100, 125, 196, 200, 250, 256, 384, 400, 500, 512, 800, 1000, 1024, 2048.

Max RPM
 7500
 15000
 30000

Resolutions
 2048, 1000, 800, 384 (plus res. from 15k and 30k RPM)
 1024, 500, 400, 192 (plus res. from 30k RPM)
 512, 250, 200, 96; 256; 125, 100, 48

Mounting Hole Options (see dim. drawing for layout)
 2 each M1.6 holes on 16mm (1.63") bolt circle
 2 each #4 holes on 19.05 (1.75") bolt circle
 3 each M1.6 or M2 holes on 20mm (1.76") bolt circle
 3 each M1.6 or M2 holes on 22.4mm (1.665") bolt circle
 4 each M1.6 or M2 holes on 25.4mm (1") bolt circle
 2 each #4 holes on 15.75mm (0.62") x 20.96 (0.825") hole layout
 2 each #4 holes on 32.43mm (1.277") bolt circle
 2 each #4 holes on 46.03mm (1.812") bolt circle

Note: Some stepper motors may leak a magnetic field causing the AMT index pulse to not function properly.

AMT102 VersaPak comes with all items shown: all Sleeve sizes, Shaft Adapter, Base, Wide Base, Top Cover, Tool A, Tool B, Index Pulse, and 16 Resolution Dip Switch.

Sleeve Sizes
 The AMT comes with sleeve adapters to fit the following bore diameters: 2mm, 3mm, 3.17mm (1/8"), 4mm, 4.76mm (3/16"), 5mm, 6mm, 6.35mm (1/4"), 8mm.

Operational Specs
 3.6 Vdc-5.5Vdc; Max power consumption 10mA
 Temp Range: -40°C to 100°C
 Current consumption: 6mA (typ), 10mA max

Resolution Options (PPR)
 All resolutions listed are before quadrature decoding (example: 1000PPR x 4 = 4000 counts).
 Resolutions of AMT102 VersaPak = 48, 96, 100, 125, 196, 200, 250, 256, 384, 400, 500, 512, 800, 1000, 1024, 2048.

Max RPM
 7500
 15000
 30000

Resolutions
 2048, 1000, 800, 384 (plus res. from 15k and 30k RPM)
 1024, 500, 400, 192 (plus res. from 30k RPM)
 512, 250, 200, 96; 256; 125, 100, 48

Mounting Hole Options (see dim. drawing for layout)
 2 each M1.6 holes on 16mm (1.63") bolt circle
 2 each #4 holes on 19.05 (1.75") bolt circle
 3 each M1.6 or M2 holes on 20mm (1.76") bolt circle
 3 each M1.6 or M2 holes on 22.4mm (1.665") bolt circle
 4 each M1.6 or M2 holes on 25.4mm (1") bolt circle
 2 each #4 holes on 15.75mm (0.62") x 20.96 (0.825") hole layout
 2 each #4 holes on 32.43mm (1.277") bolt circle
 2 each #4 holes on 46.03mm (1.812") bolt circle

Note: Some stepper motors may leak a magnetic field causing the AMT index pulse to not function properly.

FC FILE NAME: AMT102-V-REV-C

PCB RIGHT 2007 BY CUI INC.



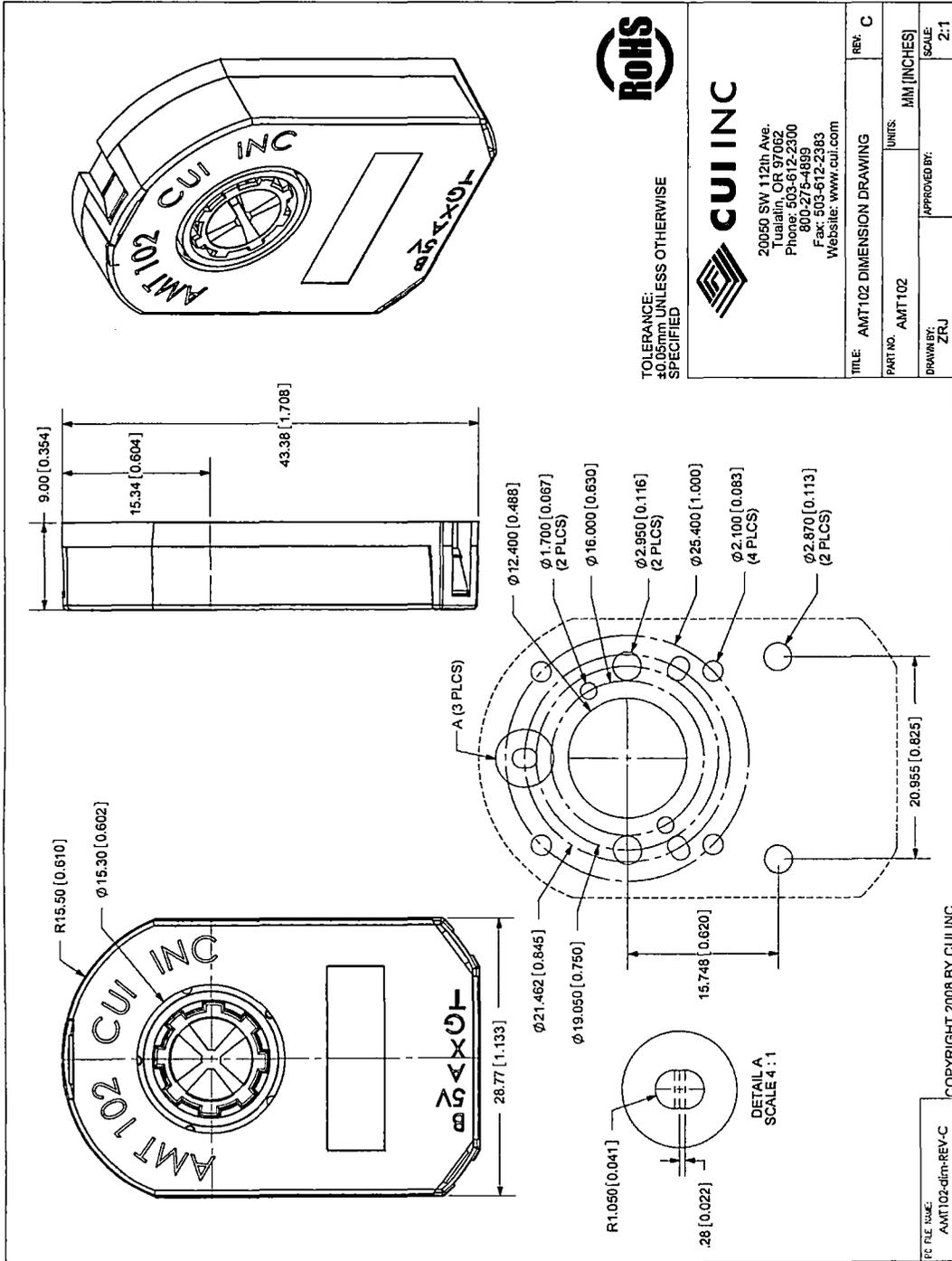
CUI INC

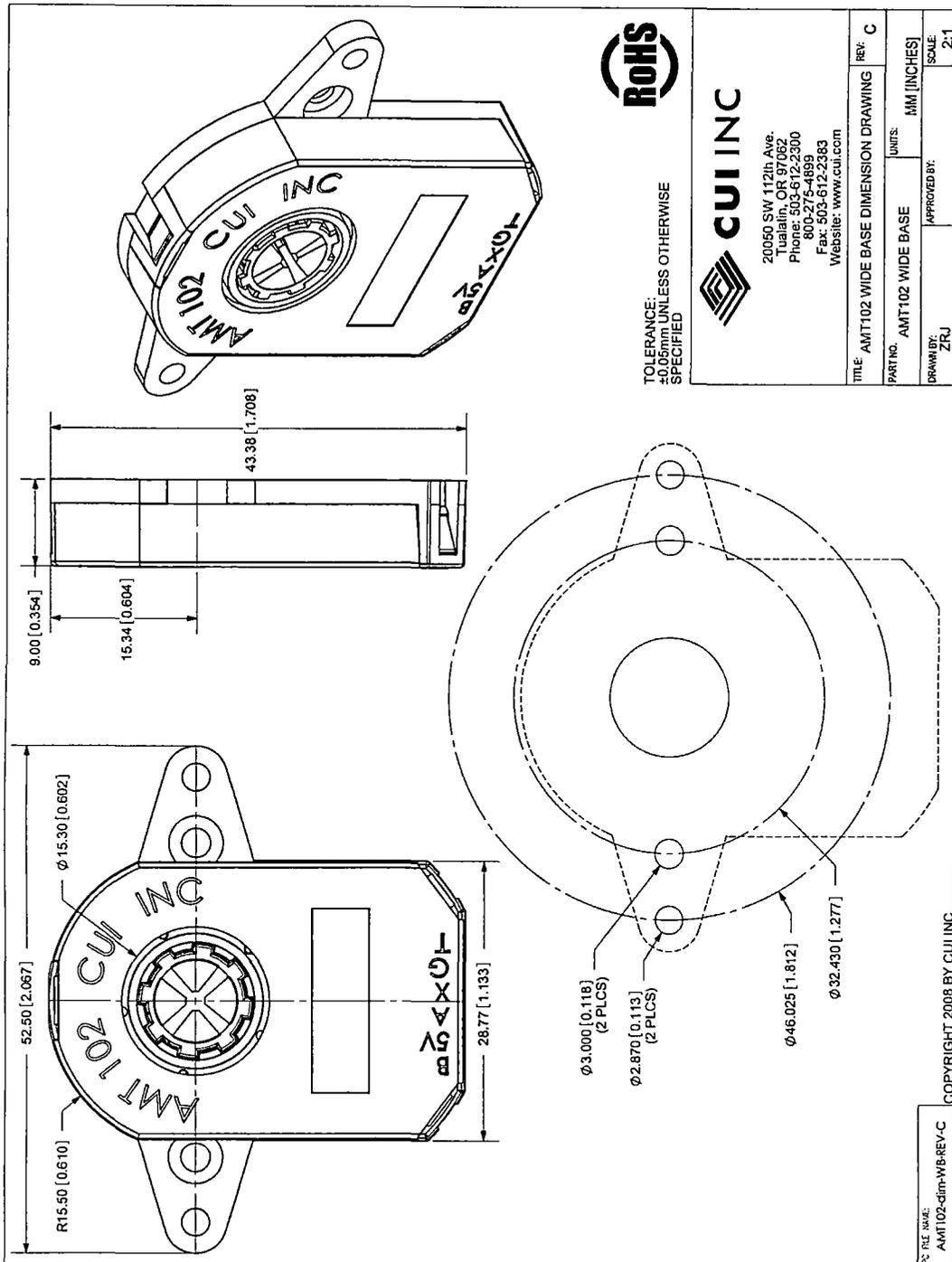
20050 SW 112th Ave.
 Tualatin, OR 97062
 Phone: 503-612-2300
 800-275-4899
 Fax: 503-612-2383
 Website: www.cui.com

TITLE: AMT102 VersaPak
REP: C

PART NO.: AMT102-V
UNITS:

APPROVED BY: ZRJ
SCALE: N/A





A.8. GLOSARIO DE TÉRMINOS ELECTRÓNICOS

MICROCONTROLADOR: Circuito integrado programable que ofrece las posibilidades de un pequeño computador en las tres unidades funcionales: CPU (Unidad De Control De Procesamiento), memoria de almacenamiento y unidades de entrada y salida. Su objetivo es, frente a datos de entrada, seguir un programa o algoritmo establecido transformando o realizando operaciones que producen cambios en estos datos de entrada, de forma similar a una calculadora.

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL: El amplificador diferencial (o par diferencial) es un circuito versátil que sirve como etapa de entrada a la mayoría de los amplificadores, cuya salida es proporcional a la diferencia entre sus dos entradas (V_{i+} y V_{i-}). Este sistema suele construirse de dos transistores que comparten la misma conexión de emisor, por la que se inyecta una corriente de polarización. La base de los transistores son las entradas (I_+ e I_-), mientras que los colectores son las salidas.

TRANSISTOR NPN: Es un transistor de unión bipolar o un dispositivo electrónico consistente en dos uniones muy cercanas entre sí, que permiten controlar el paso de la corriente a través de sus terminales. Consta de tres regiones: Emisor, que se comporta como un metal, Base, que separa el emisor del colector y el Colector, de extensión mucho mayor.

TRANSISTOR MOSFET: son semiconductores de silicio, creados por capas que constan básicamente de tres terminales en su aspecto físico, denominados, drenador (drain), suministrador (source), y gate (compuerta). Estos elementos son distribuidos en un arreglo de cientos de transistores integrados en el que cada uno entrega una parte a la corriente total. Es un dispositivo extremadamente veloz en virtud a la pequeña corriente necesaria para ajustar o liberar el canal. Por esta facultad se usa en conmutación, además su velocidad permite diseñar etapas con grandes anchos de banda minimizando, así, lo que se denomina distorsión por fase.

REGULADOR DE VOLTAJE. Un regulador de voltaje es un dispositivo electrónico diseñado para proteger aparatos eléctricos y electrónicos delicados, de posibles variaciones de diferencia de potencial (tensión/voltaje), descargas eléctricas y "ruido" existente en la corriente alterna de la distribución eléctrica.

ENCODERS. Son codificadores angulares de posición que constan de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí, de un sistema de iluminación y de un elemento fotorreceptor. El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco, a medida que el eje gira se van generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese las marcas, llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje y la velocidad del giro. La resolución depende del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco.

TERMISTOR: Un termistor es un resistor cuyo valor varía en función de la temperatura. Existen dos clases de termistores. NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo), que es una resistencia variable cuyo valor se decrementa a medida que aumenta la temperatura; y PTC (Coeficiente de Temperatura Positivo), cuyo valor de resistencia eléctrica aumenta cuando aumenta la temperatura.

RS232:(Recommended Standard 232) es una interfaz que designa una norma para el intercambio de una serie de datos binarios entre un DTE (Equipo terminal de datos) y un DCE (Data Communication Equipment, Equipo de Comunicación de datos).

A.9. PLAN DE DESARROLLO DE LINEAS DE INVESTIGACIÓN DEL IMEFEN

Tema de investigación: Reología y Reometría.

Director de investigación: Ing. Róger Hidalgo García.

Entidad promotora: IMEFEN - UNI.

El Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño (IMEFEN) dentro de sus objetivos promueve la investigación por medio del desarrollo de tesis profesionales, habiéndose abocado en los últimos años a la investigación en temas de reología básica en el manejo de relaves mineros, experiencia que nos conducirá a la investigación y manejo de flujos hiperconcentrados (huaycos) en quebradas de características singulares en la orografía del país. En este contexto, a la actualidad se realizaron investigaciones con el fin de lograr un entendimiento mayor del comportamiento del flujo a través de técnicas de medición indirecta, calibración de ecuaciones empíricas ajustadas a nuestra realidad y la caracterización de flujos de alta concentración bajo el principio del desplazamiento rotacional y penetración. A futuro, se pretende estudiar procesos de optimización en el transporte de relaves mineros y la caracterización in-situ del flujo de lodos en quebradas activadas natural y artificialmente.

A continuación se lista en un cuadro, las investigaciones desarrolladas a la fecha.

