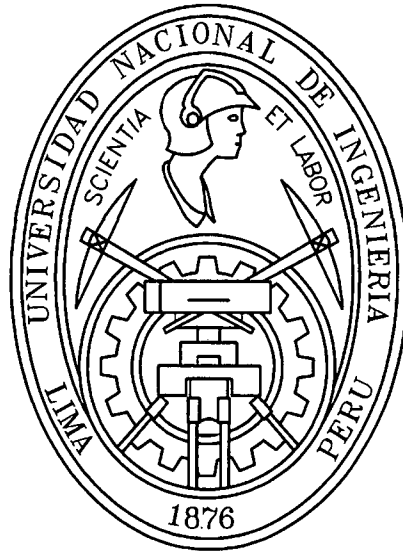


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS DE  
FLUJOS HIPERCONCENTRADOS APLICADOS A  
RELAVES MINEROS**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**KENÑE BENITO ROSARIO GARCILAZO**

**Lima – Perú**

**2010**

**Digitalizado por:**

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

## INDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE CUADROS .....</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPITULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>11</b>
1.1 ASPECTOS HIDRÁULICOS .....	11
1.1.1 Flujo alrededor de una esfera sólida .....	11
1.1.2 Flujo de una película descendente alrededor de una superficie cilíndrica.....	15
1.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SISTEMA SÓLIDO – LÍQUIDO.....	17
1.2.1 Densidad.....	17
1.2.2 Viscosidad.....	18
1.2.3 Calor Específico .....	22
1.2.4 Conductividad Térmica.....	23
1.3 INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA .....	24
1.3.1 Reología y Reometría .....	24
1.3.2 Numero de Deborah (De).....	25
1.3.3 Esfuerzo de corte ( $\tau$ ).....	26
1.3.4 Esfuerzo de Cedencia ( $\tau_c$ ).....	27
1.3.5 Gradiente de Velocidad ( $\frac{dv}{dy}$ ), Velocidad de deformación Angular ( $\dot{\gamma}$ ) ...	27
1.3.6 Viscosidad ( $\mu$ ).....	27
1.3.7 Ley de Newton de la viscosidad .....	29
1.3.8 Tipos de Fluido.....	31
1.3.9 Flujos hiperconcentrados .....	34
1.3.10 Modelos Reológicos.....	35
<b>CAPITULO 2 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS FÍSICOS Y REOLÓGICOS DEL SISTEMA SÓLIDO – LÍQUIDO .....</b>	<b>41</b>
2.1 TIPOS DE REOMETROS – VISCOSIMETROS .....	41
2.1.1 Rotatorios.....	43
2.1.2 Capilares.....	47
2.1.3 Caída de esfera.....	51
2.1.4 Caída de cilindro .....	52
2.2 PROTOTIPO DE EQUIPO DE MEDICION REOLOGICA – MAQUINA DE ATWOOD .....	54
2.2.1 Fundamentos básicos .....	54
2.2.2 Planteamiento del prototipo.....	63
2.2.3 Proceso de construcción del prototipo.....	68

2.3	CALIBRACIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL .....	72
2.3.1	Patrón de medida .....	72
2.3.2	Ajuste en la masa .....	72
2.3.3	Ajuste en la aceleración .....	73
2.3.4	Ajuste en la velocidad angular .....	80
2.4	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS .....	82
2.4.1	Medida de la densidad ( $\rho_m$ ) .....	82
2.4.2	Medida de la concentración ( $C_w$ y $C_v$ ) .....	83
2.4.3	Medida del Esfuerzo de Corte .....	84
2.4.4	Medida de la Gradiente de Velocidad, Velocidad de deformación Angular ( $\dot{\gamma}_R$ ) .....	86
2.4.5	Medida del Esfuerzo de Cedencia ( $\tau_y$ ) .....	86
2.4.6	Medida de la Viscosidad ( $\mu$ ) .....	86
<b>CAPITULO 3 ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS DEL SISTEMA SÓLIDO – LÍQUIDO .....</b>		<b>87</b>
3.1	METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN .....	87
3.1.1	Sustancias Comunes .....	88
3.1.2	Sustancias Heterogéneas .....	94
3.2	RELAVE MINERO .....	115
3.2.1	Instrumental de Medición reológica Caída de Varilla .....	118
3.2.2	Caracterización reológica .....	129
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>136</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>		<b>138</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>140</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>143</b>
A.1	ENSAYOS DE LABORATORIO .....	144
A.2	ENSAYOS REOLÓGICOS .....	152
A.3	PLANOS .....	194
A.4	PANEL FOTOGRÁFICO .....	201

## RESUMEN

La Determinación de Parámetros Reológicos de flujos hiperconcentrados, en especial atención a relaves mineros, se ha desarrollado bajo el estudio de la **Reología** para la parte conceptual y de la **Reometría** para la parte experimental.

La **Reología** como ciencia que estudia la deformación de los cuerpos sometidos a esfuerzos externos; partiendo de la premisa que todo cuerpo fluye para un determinado tiempo de relajación, introduce el término de "Número de Deborah" como una forma de evaluar el tiempo de relajación mencionado. En ese sentido la reología clasifica a los fluidos en función a su comportamiento de parámetros como viscosidad, esfuerzo de cedencia, en función del tiempo. Siendo uno de los objetivos de esta investigación determinar dichos parámetros

Otro aspecto importante es la **Reometría**, término que se refiere al conjunto de técnicas y metodologías utilizados para medir los parámetros reológicos. Por lo que, se tiene la necesidad de contar con equipos de medición reológica, que permitan cumplir con estos objetivos. Se optó por la fabricación del Reómetro de Caída de Varilla, por cuanto su modelamiento físico del equipo es simple y se fundamenta en los conceptos de la mecánica clásica. El equipo instrumental se ha fabricado en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Hidráulica

Los resultados de la investigación se puede considerar como favorables al haberse determinado los parámetros reológicos, como Esfuerzo de Cedencia y Viscosidad dinámica de la muestra de relave minero. El rango de aplicación de la muestra de relave minero (flujo hiperconcentrado) ensayada se ubica entre 63.37% al 79.01% de concentración en peso o su equivalente de 31.10% al 49.88% de concentración volumétrica respectivamente.

## LISTA DE CUADROS

CUADRO 1.1	VALORES DEL TIEMPO CARACTERISTICO DE ALGUNOS MATERIALES .....	26
CUADRO 1.2	VISCOSIDADES DEL AGUA Y EL AIRE A 1 ATM DE PRESION .....	30
CUADRO 1.3	VISCOSIDADES DE ALGUNOS GASES Y LIQUIDOS A PRESIÓN ATMOSFÉRICA .....	30
CUADRO 1.4	VISCOSIDAD DE ALGUNOS METALES LIQUIDOS.....	31
CUADRO 1.5	CLASIFICACIÓN SEGÚN COSTA (1988).....	35
CUADRO 1.6	PARAMETROS DEL PLASTICO DE BINGHAM PARA PRESIONES DE COMBUSTIBLES NUCLEARES .....	36
CUADRO 1.7	PARÁMETROS DEL MODELO DE LA POTENCIA PARA VARIOS FLUIDOS A TEMPERATURA AMBIENTE.....	37
CUADRO 1.8	PARAMETROS DE ELLIS PARA SOLUCIONES DE CARBOXIMETIL CELULOSA EN AGUA.....	38
CUADRO 1.9	PARAMETROS DE REINER – PHILIPPOFF PARA DIVERSOS FLUIDOS .....	39
CUADRO 2.1	VALORES DE LA ACELERACION DE LA GRAVEDAD PARA ALGUNAS CIUDADES DEL PERU .....	73
CUADRO 2.2	COEFICIENTE DE AJUSTE( $C_{av}$ ) Y FRICCION DE LA POLEA ( $F_p$ ).....	77
CUADRO 2.3	COEFICIENTE DE AJUSTE( $C_{av}$ ) Y FRICCION POLEA-VARILLA-ANILLO( $F_{pa}$ ) .....	80
CUADRO 2.4	COEFICIENTE DE AJUSTE PARA LA VELOCIDAD ANGULAR.....	81
CUADRO 2.5a	CARACTERISTICAS FÍSICAS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS .....	84
CUADRO 3.1	ESTRUCTURACION DE LOS EXPERIMENTOS .....	96
CUADRO 3.2	REÓMETRO DE CAIDA CARACTERISTICAS DE LOS ACCESORIOS .....	98
CUADRO 3.3	ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD $\mu$ DEL AGUA .....	100
CUADRO 3.4	ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD $\mu$ DEL ACEITE SAE 40.....	105

CUADRO 3.5a	ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_d$ ) Y VISCOSIDAD ( $\mu$ ): <b>1.- Aceite SAE 40</b> .....	109
CUADRO 3.5b	ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_d$ ) Y VISCOSIDAD ( $\mu$ ): <b>2.- Aceite SAE 40</b> .....	110
CUADRO 3.6	ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_d$ ) Y VISCOSIDAD ( $\mu$ ): <b>Harina – Agua</b> .....	114
CUADRO 3.7	CONCENTRACIONES EN PESO ( $C_w$ ) Y EN VOLUMEN ( $C_v$ ) EXPERIMENTADAS EN RELAVE ( $\rho_s=3.66$ g/cc).....	121
CUADRO 3.8	DIMENSIONES DE LA VARILLA DE ALUMINIO.....	122
CUADRO 3.9	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS PARTE 1.....	132
CUADRO 3.10	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS PARTE 2.....	133
CUADRO 3.11	PARÁMETROS REOLÓGICOS OBTENIDOS.....	134
CUADRO	RESUMEN DE RESULTADOS .....	137

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Sistema de coordenadas utilizado para describir el flujo alrededor de una esfera rígida .....	12
FIGURA 1.2	Flujo descendente en la superficie interior del cilindro .....	15
FIGURA 1.3	Diagrama esquemático del flujo descendente bajo la influencia de la gravedad .....	16
FIGURA 1.4	Viscosidad Relativa Vs. Concentración de Sólidos en Volumen .....	21
FIGURA 1.5	Deformación del fluido al ser sometido a esfuerzo .....	26
FIGURA 1.6	Interpretación grafica de la curva de fluidez y curva de viscosidad para la caracterización reológica .....	28
FIGURA 1.7	Formación del perfil de velocidad en estado estacionario para un fluido contenido entre dos láminas .....	29
FIGURA 1.8	Reograma de fluido Newtoniano y no Newtoniano .....	32
FIGURA 1.9	Modelos reológicos no-newtonianos en estado estacionario .....	35
FIGURA 2.1	Reómetro de cilindros coaxiales .....	43
FIGURA 2.2	Reómetro tipo cono – plato .....	45
FIGURA 2.3	Reómetro tipo platos paralelos .....	46
FIGURA 2.4	Reómetro – viscosímetro de tubo capilar de presión variable .....	49
FIGURA 2.5	Viscosímetro capilar gravitacional .....	49
FIGURA 2.6	Viscosímetro capilar de orificio .....	50
FIGURA 2.7	Viscosímetro de caída de una esfera .....	51
FIGURA 2.8	Reómetro de caída de cilindro .....	53
FIGURA 2.9	Concepto esquemático de la Máquina de Atwood para el movimiento uniformemente acelerado .....	55
FIGURA 2.10	Diagrama de Cuerpo libre de la caída de esfera en un medio fluido .....	57
FIGURA 2.11	Variación de la velocidad .....	59
FIGURA 2.12	Disposición del reómetro de caída de varilla .....	61
FIGURA 2.13	Esquema de la composición Cuerpo – estructura. Máquina de Atwood .....	63
FIGURA 2.14	Esquema de la composición del codificador óptico o encoder .....	64
FIGURA 2.15	Esquema del sistema de interface y adquisición de data .....	67
FIGURA 2.16	Prototipo, cuerpo – estructura .....	69
FIGURA 2.17	Composición del acople de la polea y el encoder .....	70
FIGURA 2.18	Dispositivo Interface – adquisición de datos .....	71

FIGURA 2.19 Diagrama de Cuerpo libre del sistema .....	74
FIGURA 2.20a: Ajuste de la aceleración para el experimento 20_07_07_FR_ESF.....	76
FIGURA 2.20b: Ajuste de la aceleración para el experimento 20_07_07_FR_ESF.....	76
FIGURA 2.21a . Ajuste varilla – anillo, para 23-10-07_FR_VAR_1.....	78
FIGURA 2.21b . Ajuste varilla – anillo, para 23-10-07_FR_VAR_2.....	78
FIGURA 2.21c . Ajuste varilla – anillo, para 23-10-07_FR_VAR_3.....	79
FIGURA 2.21d . Ajuste varilla – anillo, para 23-10-07_FR_VAR_4.....	79
FIGURA 2.21e . Ajuste varilla – anillo, para 23-10-07_FR_VAR_5.....	80
FIGURA 2.22 Toma de muestra para determinar la densidad.....	83
FIGURA 2.23 (a) antes de iniciación del movimiento y (b) en movimiento. ....	85
FIGURA 3.1 Viscosímetro tipo Drage y sus accesorios.....	89
FIGURA 3.2 Ajuste de la curva de calibración, usando la paleta N° 1.....	90
FIGURA 3.3 Ajuste de la curva de calibración, usando la paleta N° 2.....	90
FIGURA 3.4 Ajuste de la curva de calibración, usando la paleta N° 3.....	91
FIGURA 3.5 (a) Preparado y (b) experimentación de la mezcla azúcar – agua. ....	92
FIGURA 3.6: Viscosidad relativa y concentración. ....	92
FIGURA 3.7 Mezcla relave – agua, concentración mayor al 70%, no hay homogeneidad en la mezcla. ....	93
FIGURA 3.8 Viscosidad relativa y concentración para la mezcla relave – agua. ....	94
FIGURA 3.9 (a) Caída de Esfera y (b) Esfera sumergida dentro de agua. ....	96
FIGURA 3.10 Tendencia de la curva Velocidad Vs Tiempo. ....	97
FIGURA 3.11 Tendencia de la curva para la estimación de $K$ .....	99
FIGURA 3.12 (a) Aceite SAE 40 y (b) Caída de Esfera en Aceite SAE 40. ....	101
FIGURA 3.13a 1.- Aceite SAE 40 para la estimación $v_l$ , EXP1, ENS1.....	102
FIGURA 3.13b 1.- Aceite SAE 40 para la estimación $v_l$ , EXP2, ENS5.....	102
FIGURA 3.14a 1.- Aceite SAE 40 agrupamiento para el EXP1.....	103
FIGURA 3.14b 1.- Aceite SAE 40 agrupamiento para el EXP2.....	103
FIGURA 3.15a 1.- Aceite SAE 40 estimación $K/M$ para el EXP1.....	104
FIGURA 3.15b 1.- Aceite SAE 40 estimación $K/M$ para el EXP2.....	104
FIGURA 3.16a 1.- Aceite SAE 40 estimación $2a.b$ para el EXP1.....	108
FIGURA 3.16b 1.- Aceite SAE 40 estimación $2a.b$ para el EXP2.....	108



FIGURA 3.17a	Harina – Agua para el EXP2 .....	111
FIGURA 3.17b	Harina – Agua para el EXP3 .....	112
FIGURA 3.17c	Harina – Agua para el EXP1 .....	112
FIGURA 3.18a	Harina – agua, estimación <i>2a.b</i> para el EXP2.....	113
FIGURA 3.18b	Harina – agua, estimación <i>2a.b</i> para el EXP3.....	113
FIGURA 3.19	Ensayo para determinar la densidad de sólidos por el método del picnómetro. ....	116
FIGURA 3.20	a) Lectura con el hidrómetro, b) Lectura de la temperatura.....	117
FIGURA 3.21a	Extracción de la muestra del depósito de barril hermético después de haber sacado el agua.....	118
FIGURA 3.21b	Muestra secada en el horno eléctrico del Laboratorio Nacional de Hidráulica. ....	119
FIGURA 3.22a	Molienda inicial.....	119
FIGURA 3.22b	Tamizado inicial. ....	120
FIGURA 3.22c	Molienda final. ....	120
FIGURA 3.23	Proceso de mezclado de la muestra.....	121
FIGURA 3.24	(a) Caída de Varilla y (b) Varilla sumergida en el relave. ....	123
FIGURA 3.25	Expresión algebraica que relaciona velocidad y tiempo. ....	125
FIGURA 3.26	Reograma del ensayo ENS4 del experimento EXP1.....	125
FIGURA 3.27	Expresión que relaciona velocidad y tiempo. ....	126
FIGURA 3.28	Reograma del ensayo ENS1 del experimento EXP 2.....	126
FIGURA 3.29	Expresiones que relacionan velocidad y tiempo.....	127
FIGURA 3.30	Reograma del ensayo ENS6 del experimento EXP5.....	127
FIGURA 3.31	Expresión que relaciona velocidad y tiempo. ....	128
FIGURA 3.32	Reograma del ensayo ENS1 del experimento EXP10.....	128
FIGURA 3.33	Procedimiento gráfico para obtener los parámetros reológicos .....	129
FIGURA 3.34	Reograma de los experimentos EXP 1, EXP 2 .....	130
FIGURA 3.35	Reograma de los experimentos EXP 3, EXP 4, EXP 5, EXP 6 .	130
FIGURA 3.36	Reograma de los experimentos EXP 7, EXP 8 .....	131
FIGURA 3.37	Reograma de los experimentos EXP 9, EXP 10 .....	131
FIGURA 3.38	Relación $\tau$ y $V_s$ $C_v$ , del relave minero.....	134
FIGURA 3.39	Relación $\mu$ Vs $C_v$ , del relave minero .....	135

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de conocer el comportamiento de flujos, que en algunos casos, por su misma naturaleza, coexisten los tres estados de la materia como flujos bifásicos o trifásicos, recurrimos al análisis del modelamiento físico y matemático para su mejor entendimiento. Por lo que estudiar flujos hiperconcentrados, estado bifásico de sólido – líquido, se hace necesario por su existencia en la naturaleza de forma más generalizada.

Esta situación, conlleva a que el punto de partida para el entendimiento del fenómeno del movimiento de flujos está condicionado, en gran parte, en conocer las propiedades físicas fundamentales de los flujos hiperconcentrados, por lo que, es necesario obtener los parámetros Reológicos que nos permita caracterizarlos. En tal sentido, se ha desarrollado la investigación al estudio de **flujos hiperconcentrados**, particularizado especialmente al relave minero.

Los casos de interés en el tema, son aplicables en el estudio de flujos de lodos, transporte de concentrado de minerales o relaves, transportes de pulpas, control de calidad de alimentos, etc. Esto por citar algunos casos.

Todo esto, induce a ingresar al conocimiento de conceptos básicos de la **Reología**, del conocimiento del tipo de instrumentación requerida, y finalmente la aplicación de la Reometría para su caracterización.

El **objetivo principal** de esta investigación es determinar los parámetros reológicos del flujo hiperconcentrado aplicado a relave minero. Para cumplir con este objetivo, se desarrollan **objetivos específicos** como la fabricación del prototipo de **Reómetro de Caída de Varilla**, análisis e interpretación de la Reometría para la muestra estudiada y finalmente la caracterización reológica.

El desarrollo de la investigación pasó por tres etapas importantes, siendo la primera la etapa conceptual, desarrollando el marco teórico para la investigación con los conceptos básicos de Reología y de la mecánica de fluidos; la segunda etapa consiste en la fabricación del equipo instrumental Reómetro de Caída de Varilla, basada en el principio de la Máquina de Atwood, al que se le acopla un sistema de interface para la adquisición de datos; y la tercera etapa consiste en la experimentación de las muestras de relave para su caracterización,

obteniéndose los parámetros Reológicos. Gran parte del desarrollo de la investigación, en especial la etapa experimental, se realizó en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Hidráulica.

El contenido de la investigación se desarrolla en tres capítulos, cada uno de ellos se resumen a continuación:

En el **CAPITULO 1**, se exponen los fundamentos teóricos básicos que sustentan la investigación. El análisis del flujo alrededor de una esfera sólida, flujo de una película descendente alrededor de una superficie cilíndrica, es desarrollado con la finalidad de explicar el principio en la que se basa el modelo adoptado para el equipo instrumental. También, se hace una descripción conceptual de las propiedades físicas del sistema sólido – líquido, como la densidad, viscosidad, calor específico, etc. Además se ha desarrollado en este capítulo, el estudio a la Reología de forma introductoria, en la que se definen conceptos de Reología y Reometría, número de Deborah, esfuerzo de cedencia, velocidad de deformación, flujo hiperconcentrado y también se destacan algunos modelos reológicos de interés.

El **CAPITULO 2**, se centra en la determinación de los parámetros físicos y reológicos del sistema sólido – líquido. Para ello, se hace una descripción de instrumentos de medición reológica utilizados tales como instrumentos de principio rotatorio, principio capilar, caída de esfera y caída de cilindro. Se establece el Prototipo de equipo de medición reológica de Caída de Varilla basada en la máquina de Atwood, estableciéndose el mecanismo de medición.

Finalmente, en el **CAPITULO 3**, describe la metodología empleada en la experimentación, en el análisis de los resultados para la obtención de los parámetros reológicos. Se exponen los tipos de sustancias utilizadas en los experimentos, las que se ensayaron con el viscosímetro tipo Drage, con el instrumental caída de esfera y con el reómetro caída de varilla. Se ha tenido como aplicación del flujo hiperconcentrado a la muestra de relave minero.

Se adjunta un **ANEXO**, en la que se incluye información adicional referente a los registros, procesamiento de la información, experimentos realizados, construcción del equipo instrumental y resultados de los experimentos.

## CAPITULO 1

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A partir de los principios de la mecánica de fluidos, se analiza el movimiento bajo condiciones particulares en que se presenta el problema de los flujos reales. Además se presentan las expresiones matemáticas para la determinación de las propiedades físicas del sistema sólido – líquido, partiendo de las propiedades físicas elementales [3]. El desarrollo de estos temas, son de singular importancia para el análisis del flujo hiperconcentrado, requiriéndose para su estudio la comprensión de conceptos básicos de la ciencia denominada reología.

#### 1.1 ASPECTOS HIDRÁULICOS

##### 1.1.1 Flujo alrededor de una esfera sólida

Consideremos el flujo muy lento de un fluido incompresible alrededor de una esfera sólida, tal como se indica en la Figura 1.1. La esfera es de radio  $R$  y diámetro  $D$ . El fluido tiene una viscosidad  $\mu$  y una densidad  $\rho$ , y asciende verticalmente hacia la esfera con una velocidad uniforme  $v_\infty$  a lo largo del eje  $z$ . Analíticamente se ha comprobado que para un flujo muy lento, la distribución de esfuerzos cortantes, la distribución de presión, y los componentes de la velocidad, expresados en coordenadas esféricas, son:

$$\tau_{r\theta} = \frac{3}{2} \frac{\mu v_\infty}{R} \left(\frac{R}{r}\right)^4 \text{sen}\theta \quad (1.1)$$

$$p = p_0 - \rho g z - \frac{3}{2} \frac{\mu v_\infty}{R} \left(\frac{R}{r}\right)^2 \cos\theta \quad (1.2)$$

$$v_r = v_\infty \left[ 1 - \frac{3}{2} \left(\frac{R}{r}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{R}{r}\right)^3 \right] \cos\theta \quad (1.3)$$

$$v_\theta = -v_\infty \left[ 1 - \frac{3}{4} \left(\frac{R}{r}\right) - \frac{1}{4} \left(\frac{R}{r}\right)^3 \right] \text{sen}\theta \quad (1.4)$$

En la Ec. 1.2,  $p_0$  es la presión en el plano  $z=0$  alejado de la esfera,  $-\rho g z$  es la contribución del peso del fluido (efecto hidrostático), y el término que contiene  $v_\infty$  resulta como consecuencia del flujo del fluido alrededor de la esfera. Estas

ecuaciones son solamente válidas para “flujo reptante”(muy lento), que para este sistema tiene lugar cuando el número de Reynolds ( $Dv_{\infty}\rho/\mu$ ) es inferior a aproximadamente 0.1. Esta región se caracteriza por la virtual ausencia de remolinos aguas abajo de la esfera.

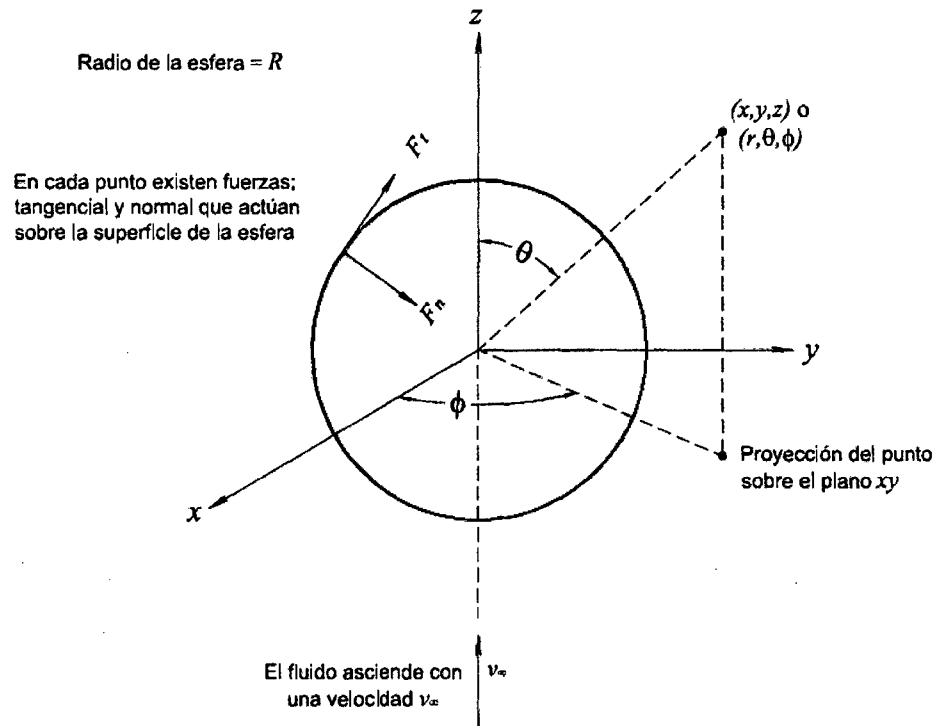


FIGURA 1.1 Sistema de coordenadas utilizado para describir el flujo alrededor de una esfera rígida  
 Fuente: Referencia bibliográfica [3]

Obsérvese que la distribución de velocidad cumple con la condición de que  $v_r = v_{\theta} = 0$  en la superficie de la esfera. Además, puede demostrarse que  $v_z$  tiende a  $v_{\infty}$  para puntos alejados de la esfera. Por otra parte, se ve claramente que, lejos de la superficie esférica, la distribución de presión se transforma en la ecuación hidrostática  $p = p_0 - \rho gz$ . Por lo tanto, las ecuaciones deben de satisfacer las condiciones límites para  $r = R$  y  $r = \infty$ .

Ahora, se calcula la fuerza neta que el fluido ejerce sobre la esfera. Esta fuerza se obtiene integrando la fuerza normal y la fuerza tangencial sobre la superficie de la esfera.

**Integración de la fuerza normal:** En cada punto de la superficie esférica existe una presión sobre el sólido que actúa perpendicularmente a la superficie. La componente  $z$  de esta presión es  $-P \cos \theta$ . Esta presión local se multiplica por el área de la superficie sobre la que actúa,  $R^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi$ , y se integra sobre la superficie esférica para obtener la fuerza resultante en la dirección  $z$ :

$$F_n = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (-p|_{r=R} \cos \theta) R^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (1.5)$$

La distribución de la presión en la superficie de la esfera ( $r = R$ ) es:

$$p|_{r=R} = p_0 - \rho g R \cos \theta - \frac{3}{2} \frac{\mu v_\infty}{R} \cos \theta \quad (1.6)$$

Esta expresión se sustituye en la integral de la Ec. 1.5. La integral que contiene  $p_0$  se anula, la de  $-\rho g R \cos \theta$  da la fuerza de flotación del fluido sobre el sólido (fuerza de empuje), y la integral en que interviene la velocidad da la resistencia de forma. Por lo tanto, queda finalmente:

$$F_n = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g + 2\pi \mu R v_\infty \quad (1.7)$$

**Integración de la fuerza tangencial:** En cada punto de la superficie existe también un esfuerzo cortante tangencial. Este esfuerzo  $-\tau_{r\theta}$ , es la fuerza que actúa en la dirección  $\theta$  sobre la unidad de área de la superficie esférica. La componente  $z$  de esta fuerza por unidad de área, es  $(-\tau_{r\theta})(-\sin \theta)$ . Multiplicando por  $R^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi$  e integrando sobre la superficie de la esfera, se obtiene la fuerza resultante en la dirección  $z$ :

$$F_t = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (+\tau_{r\theta}|_{r=R} \sin \theta) R^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (1.8)$$

La distribución de esfuerzo cortante en la superficie de la esfera de acuerdo con la Ec.1.1, es:

$$\tau_{r\theta}|_{r=R} = \frac{3}{2} \frac{\mu v_{\infty}}{R} \operatorname{sen}\theta \quad (1.9)$$

Sustituyendo esta expresión en la integral de la Ec. 1.8, se obtiene la fuerza a la “resistencia de fricción”

$$F_f = 4\pi\mu R v_{\infty} \quad (1.10)$$

Por lo tanto, la fuerza total  $F$  del fluido sobre la esfera, viene dada por la suma de las Ecs. 1.7 y 1.10:

$$F = \underbrace{4/3\pi R^3 \rho g}_{\text{Fuerza de empuje}} + \underbrace{2\pi\mu R v_{\infty}}_{\text{Resistencia de forma}} + \underbrace{4\pi\mu R v_{\infty}}_{\text{Resistencia de fricción}} \quad (1.11)$$

Por lo que tendremos:

$$F = 4/3\pi R^3 \rho g + 6\pi\mu R v_{\infty} \quad (1.12)$$

El primer término del segundo miembro de la Ec. 1.12 representa el empuje y el segundo resulta como consecuencia del movimiento del fluido alrededor de la esfera. Es conveniente designar estos dos términos por  $F_s$  (la fuerza que se ejerce aunque el fluido esté en reposo) y  $F_k$  (la fuerza que resulta del movimiento del fluido, o sea, la contribución “cinemática”); para las consideraciones del caso, estas fuerzas son:

$$F_s = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g \quad (1.13)$$

$$F_k = 6\pi\mu R v_{\infty} \quad (1.14)$$

La Ec. 1.14 es la conocida **ley de Stokes**. Se aplica en el movimiento de partículas coloidales por efecto de un campo eléctrico, en la teoría de sedimentación, y en el estudio de movimiento de partículas de aerosoles

### 1.1.2 Flujo de una película descendente alrededor de una superficie cilíndrica

Consideraremos un flujo sobre una superficie cilíndrica, cuyo movimiento se realiza en forma descendente accionado por su propio peso, tal como se muestra en la Figura 1.2. Además de considerar al fluido incompresible, para un instante  $t$ , el flujo presenta un estado permanente (estacionario). Teniendo en cuenta estas condiciones se analizará el flujo.

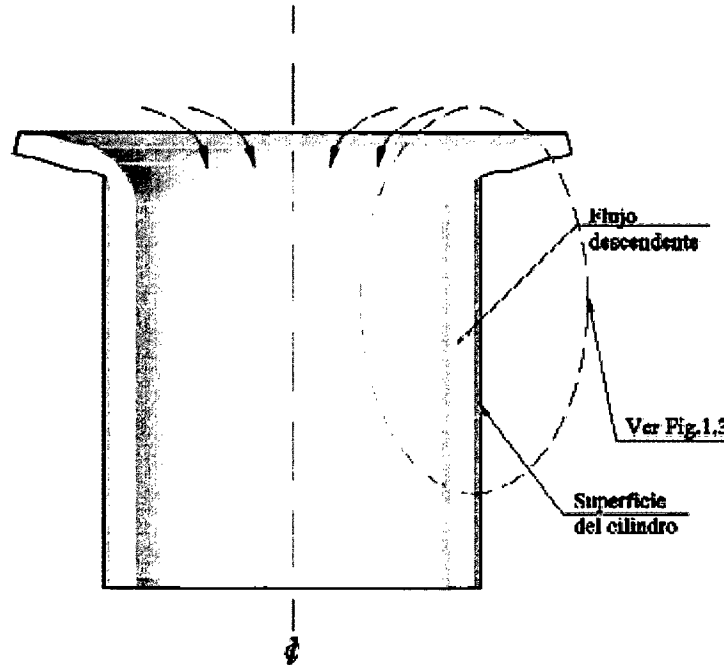


FIGURA 1.2 Flujo descendente en la superficie interior del cilindro

Fuente: Elaboración Propia

Tomamos una sección del flujo en movimiento, tal como se muestra en la Figura 1.3. Analizando las fuerzas actuantes en el sistema, aplicando la segunda ley de Newton para el movimiento, tenemos:

$$\begin{aligned}
 P_0 - P_L + mg - f &= ma_z \\
 A_0 \cdot \rho \cdot v_0^2 - A_L \cdot \rho \cdot v_L^2 + mg - f &= ma_z
 \end{aligned}
 \tag{1.15}$$

Donde  $P_0$  y  $P_L$  son las fuerzas actuantes en la sección transversal,  $A_0$  y  $A_L$  área de la sección sobre las que actúan las fuerzas  $P_0$  y  $P_L$  respectivamente,  $m$  masa del fluido,  $\rho$  densidad del fluido,  $f$  fuerza de corte interna entre las superficies y  $a_z$  aceleración con la que se desplaza,  $v_0$  y  $v_L$  las velocidades al



inicio y final respectivamente, en el sector analizado, tal como se indica en la Figura 1.3.

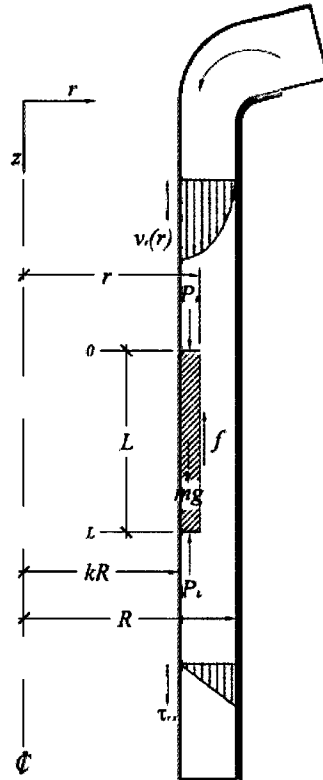


FIGURA 1.3 Diagrama esquemático del flujo descendente bajo la influencia de la gravedad

Fuente: Elaboración Propia

Desarrollando la Ec. 1.15 se tiene:

$$2\pi r L \tau_r = A_0 \cdot \rho \cdot v_0^2 - A_L \cdot \rho \cdot v_L^2 - \rho \cdot \pi (r - kR) \cdot (r + kR) \cdot L (a_z - g) \quad (1.16)$$

Para un instante  $t$ , el flujo es permanente, por lo que  $v_0 = v_L$ , además que  $A_0 = A_L$ . Reemplazando en la Ec. 1.16, ésta quedaría de la siguiente manera:

$$\tau_r = \frac{\rho \cdot (r^2 - k^2 R^2)}{2r} \cdot (g - a_z) \quad (1.17)$$

Para  $r = R$ , tendremos el esfuerzo en las paredes del cilindro:

$$\tau_R = \frac{\rho \cdot R(1 - k^2)}{2} \cdot (g - a_z) \quad (1.18)$$

## 1.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SISTEMA SÓLIDO – LÍQUIDO

El complejo sistema sólido – líquido, presenta tres fases materiales por analizar. La fase sólida, compuesta por partículas finas (finos o limos); la fase líquida, compuesta normalmente por un fluido acuoso o sustancia líquida homogénea y la tercera fase que es consecuencia de la mezcla de las dos anteriores, pero que se encuentra en la fase sólido – líquido, constituyéndose en un medio heterogéneo de singulares características [17].

Dentro del desarrollo de la investigación se requiere conocer las propiedades físicas más relevantes del sistema sólido – líquido, ya que estas permiten tener una mejor comprensión de su comportamiento. Para ello, debido a su importancia, analizaremos las principales propiedades físicas del sistema sólido – líquido.

### 1.2.1 Densidad

Directa o indirectamente en el sistema sólido – líquido hay tres densidades involucradas, la densidad de las partículas sólidas (estado o fase sólida), la densidad del medio de suspensión (el estado líquido) y la densidad del sistema sólido – líquido (fase sólido – líquido) propiamente dicho.

Las densidades de las partículas sólidas y la del medio de suspensión pueden ser evaluadas por métodos convencionales, tal es la técnica para determinar la *gravedad específica* por el método del picnómetro. Sin embargo, se debe tener cuidado cuando se trate de evaluar la densidad del sistema sólido – líquido en las cuales las partículas sólidas tienden a sedimentarse rápidamente.

En la práctica, es mejor determinar en forma independiente las densidades de las partículas sólidas y la del medio de suspensión (fluido líquido) para definir la densidad del sistema sólido – líquido a una concentración de sólido dada. Finalmente la densidad del sistema sólido – líquido en términos de sus densidades componentes, está dada por:

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{100 - C_w}{\rho_l}} \quad (1.19)$$

Donde:

$\rho_m$  : Densidad del sistema sólido – líquido.

$\rho_s$  : Densidad de las partículas sólidas

$\rho_l$  : Densidad del medio de suspensión (fluido líquido)

$C_w$  : Concentración de sólidos en peso, expresados en porcentaje (%)

Sin embargo en la mecánica de los flujos se usan relaciones más directamente entre las partículas sólidas y el sistema sólido – líquido en forma volumétrica. Estas relaciones se expresan en términos de  $C_v$  que es la concentración de sólidos en volumen,  $C_v$  está expresada en porcentaje (%) y se plantea de la siguiente manera:

$$C_v = \frac{100 C_w / \rho_s}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{100 - C_w}{\rho_l}} = \frac{C_w \rho_m}{\rho_s} \quad (1.20)$$

$$C_w = \frac{C_v \rho_s}{C_v \rho_s + (100 - C_v) \rho_m} = \frac{C_v \rho_s}{\rho_m} \quad (1.21)$$

### 1.2.2 Viscosidad

El estudio de la viscosidad de los fluidos, ha sido analizado ampliamente y se encuentra desarrollada en la literatura especializada de mecánica de fluidos, las mismas que en sus análisis, están condicionadas a fluidos monofásicos, homogéneos, incompresible, permanente (no varían en el tiempo), por lo que bajo estas consideraciones es que se clasifican los fluidos en Newtonianos y no Newtonianos. La gran variedad de fluidos no Newtonianos, implica para su estudio, particularizar algunas condiciones para su modelamiento o análisis físico, por lo que las propiedades físicas del sistema sólido – líquido son totalmente diferentes de sus componentes individuales.

Un aspecto importante al adicionar partículas sólidas a un fluido, es la influencia que ésta genera en la viscosidad al sistema sólido - líquido. En efecto la presencia de las partículas sólidas producen incrementos de la viscosidad en el sistema sólido – líquido siendo éstos mayores al del fluido mismo (medio de suspensión), resultando que el sistema sólido – líquido tenga características de fluidos no Newtonianos.

El estudio de la viscosidad del sistema sólido – líquido ha motivado una cantidad de controversias, debido a su naturaleza compleja, puesto que ésta depende de muchos factores que involucran las propiedades físicas de las partículas sólidas, el medio de suspensión, la interacción de partículas sólido – líquido como sistema, condiciones de escurrimiento (esfuerzos de corte), etc.

Esta singular característica se estudia en el campo de la reología, analizando el comportamiento entre esfuerzos de corte y la gradiente de velocidad (velocidad de deformación), puesto que el sistema sólido – líquido con alta concentración de sólidos ya no tiene un comportamiento Newtoniano.

Las investigaciones preliminares para el sistema sólido – líquido, se basan en la hipótesis del comportamiento Newtoniano de la viscosidad, el cual sirve como base para ajustes al comportamiento viscoso no Newtoniano.

### **Fluidos con suspensión de sólidos diluidos**

La viscosidad de “fluidos con suspensión de sólidos diluidos” fue analizada por EINSTEIN en 1905 [17], quien concluyó que la viscosidad podría ser representada de la siguiente manera:

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = 1 + 2.5\phi \quad (1.22)$$

Donde:

$\mu_m$  : Viscosidad del sistema sólido – líquido

$\mu_0$  : Viscosidad del medio de suspensión (fluido líquido)

$\phi$  : Concentración de sólidos en volumen

Este planteamiento (Ec. 1.22) es aplicable para flujo en régimen laminar cuyas partículas sólidas en suspensión son esferas rígidas en las cuales las partículas son grandes comparadas a las dimensiones moleculares, pero pequeñas respecto a las características de la escala longitudinal de las mediciones de los instrumentos. Por ello se asume que las partículas sólidas en suspensión se encuentran extremadamente diluidas; por lo que no hay interacción de partículas.

La mayoría de estudios teóricos reportados concuerdan con el planteamiento de la Ec. 1.22, otros investigadores, como THOMAS [15] establecen limitaciones en

la ecuación, ya que no es válida para concentraciones mayores de 1% ( $\phi = 0.01$ ) de partículas sólidos en volumen.

### **Fluidos con suspensión de sólidos concentrados**

En la mayoría de los “fluidos” con suspensión de sólidos concentrados deben tomarse en cuenta las interacciones de las partículas sólidas que pueden ocurrir en el estado o sistema sólido – líquido. THOMAS [15] planteó, dentro de sus estudios, expresiones teóricas y experimentales para las viscosidades de los fluidos con suspensión de sólidos concentrados, muchas de estas expresiones se asemejan a las series de Taylor expandido:

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = 1 + K_1\phi + K_2\phi^2 + K_3\phi^3 + \dots \quad (1.23)$$

Donde:

$\mu_m$  : Viscosidad del sistema sólido – líquido

$\mu_0$  : Viscosidad del medio de suspensión (fluido líquido)

$\phi$  : Concentración de sólidos en volumen

$K_1, K_2, K_3, \dots$  : Constantes.

El valor de  $K_1$  es generalmente asumido por el valor determinado por EINSTEIN. Varios valores han sido asignados a  $K_2$  para llevar la cuenta de ciertas interacciones que se generan en el sistema sólido – líquido: GUTH y SIMHA [10] obtuvieron un valor de  $K_2 = 14.1$ . Sin embargo los coeficientes correspondientes a los términos de la serie de mayor orden no son fácilmente calculables. De acuerdo a THOMAS [15] esto representa una severa limitación en el uso de la Ec. 1.23 puesto que la serie después del término  $\phi^2$  conlleva a errores en exceso del 10% para concentración de sólidos en volumen mayores ( $\phi$  aproximadamente 0.20); la incorporación del término  $\phi^3$  extiende la validez de la ecuación para  $\phi = 0.40$  aproximadamente.

Para el análisis y racionalización de una gran cantidad de datos publicados, THOMAS sugiere una ecuación de la siguiente forma:

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = 1 + 2.5\phi + 10.05\phi^2 + A.\exp(B\phi) \quad (1.24)$$

Las dos constantes regulables  $A$  y  $B$  tienen los siguientes valores:

$$A = 0.00273$$

$$B = 16.6$$

THOMAS encontró que la Ec. 1.24 presenta un buen ajuste para los datos disponibles de viscosidad con las constantes regulables anteriormente mencionadas, como se muestra en la Figura 1.4.

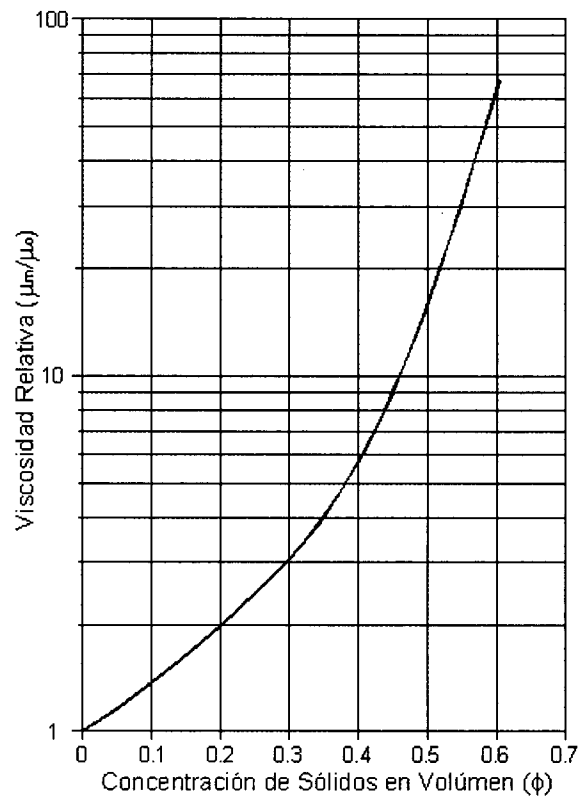


FIGURA 1.4 Viscosidad Relativa Vs. Concentración de Sólidos en Volumen

Fuente: Referencia bibliográfica [17]

Otra ecuación para la viscosidad del sistema sólido – líquido es la propuesta por GAY, NELSON y ARMSTRONG [8]:

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = \exp \left[ 2.5 + \left( \frac{\phi}{\phi_m - \phi} \right)^n \right] \frac{\phi}{\phi_m} \quad (1.25)$$

Donde  $\phi_m$  es la máxima concentración volumétrica alcanzable. Es interesante notar que el término  $\phi/(\phi_m - \phi)$  puede ser expresada como  $(\phi/\phi_m)/(1 - \phi/\phi_m)$ . Al

efectuar este cambio en la Ec. 1.25, entonces  $\mu_m/\mu_0$  queda en función solamente de  $\phi/\phi_m$ .

Para pequeños valores de  $\phi/\phi_m$ , por ejemplo, para fluidos con suspensión de sólidos diluidas la serie de expansión de la Ec. 1.25 resulta:

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = 1 + 2.5 \frac{\phi}{\phi_m} \quad (1.26)$$

Que es similar a la Ec. 1.22 planteada por EINSTEIN, con la diferencia de que el término  $\phi/\phi_m$  sustituye a  $\phi$ .

### 1.2.3 Calor Específico

El calor específico o capacidad calorífica específica,  $c$ , de una sustancia es la cantidad de calor necesaria para aumentar su temperatura en una unidad por unidad de masa, sin cambio de estado:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (1.27)$$

En donde  $c$  es el calor específico,  $Q$  es la cantidad de calor,  $m$  la masa y  $\Delta T$  la diferencia entre las temperaturas inicial y final.

En analogía al tratamiento de la densidad de mezcla, la capacidad de calor de una mezcla puede ser determinada de los calores específicos de los componentes puros. Este principio fue aplicado por THOMAS [14] utilizando suspensiones de óxido de torio, y también por ORR y DALLA VALLE [11] en estudios de transferencia de calor en un extenso rango de materiales, ambos usaron una expresión de la forma:

$$(C_p)_m = \frac{(C_p)_s(C_w)_s + (C_p)_l(C_w)_l}{100} \quad (1.28)$$

Donde:

$(C_p)_m$  : Calor específico del sistema sólido – líquido

$(C_p)_s$  : Calor específico de sólidos

$(C_p)_l$  : Calor específico del medio de suspensión (fluido líquido)

$(C_w)_s$  : Concentración de sólidos en peso

$(C_w)_l$  : Concentración en peso del medio de suspensión (fluido líquido).

### 1.2.4 Conductividad Térmica

La conductividad térmica es la capacidad de los materiales para dejar pasar el calor. En otras palabras, la conductividad térmica es la capacidad de los elementos de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otros elementos cercanos.

Se han propuesto diversos métodos para la medición de la conductividad térmica en suspensiones (partículas en suspensión), pero al igual que en las mediciones en fluidos puros, deben tomarse con mucho cuidado para evitar la convección (transporte de calor por medio de corrientes ascendente y descendente del fluido). Además, la tendencia de las partículas en suspensión para decantarse debe ser reducida o eliminada.

ORR y DALLA VALLE [11] propusieron un método por el cual la decantación de las partículas en suspensión podrían ser eliminadas por la adición de pequeñas cantidades de agar (polímero) a la suspensión (mezcla), así formando un gel (sustancia gelatinosa). El valor de la conductividad térmica así medido debe ser corregido por el efecto del agar (solo en la conductividad térmica). La técnica de la medida de la conductividad térmica de slurry (flujo hiperconcentrado) por medio de esta sustancia gelatinosa es calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$k_m = k_l \left[ \frac{2k_l + k_s - 2\phi(k_l - k_s)}{2k_l + k_s + \phi(k_l - k_s)} \right] \quad (1.29)$$

Dónde  $k$  es la conductividad térmica, y  $l$ ,  $m$ , y  $s$  se refieren al líquido, la mezcla, y el sólido, respectivamente.

Esta ecuación se basa en una expresión derivada por MAXWELL para la determinación de la conductividad eléctrica de mezclas de dos-fase. Esto ha sido empleado por numerosos investigadores en el campo de la transferencia del calor a suspensiones (partículas en suspensión), inclusive THOMAS [14].



### 1.3 INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA

El término Reología fue sugerido en 1929 por Eugene Cook Bingham para definir la rama de la física que tiene por objeto el conocimiento de la deformación de los cuerpos.

Desde el punto de vista histórico el origen de la reología se fija en la segunda mitad del siglo XVII, época en la que Robert Hooke e Isaac Newton dieron a conocer sus ideas acerca del sólido elástico y del fluido viscoso, respectivamente.

La reología moderna, además de los comportamientos elástico y viscoso, estudia también sistemas complejos que presentan simultáneamente propiedades elásticas y viscosas, es decir, sustancias visco elásticas.

La reología es una ciencia en cuyo estudio se involucran físicos, matemáticos, químicos, ingenieros vinculándose con otras especialidades como las biológicas, farmacéuticas, etc.; lo cual da lugar a diferentes métodos de análisis, así como un amplio abanico de posibilidades prácticas de su aplicación.

#### 1.3.1 Reología y Reometría

**Reología**, es la “ciencia del flujo y la deformación”, es decir, es parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. Por lo tanto, el campo de la reología se extiende desde la mecánica de fluidos newtonianos por una parte, hasta la elasticidad de Hooke por otra parte, la región comprendida entre ellas (fluidos newtonianos y elasticidad de Hooke) corresponde a la deformación y flujo de todos los tipos de materiales pastosos y las de suspensiones.

**Reometría**; se encarga en determinar en forma experimental el comportamiento de un fluido. Para ello hace uso de instrumentos llamados Reómetros que nos permite medir las propiedades reológicas.

Dependiendo del tipo de fluido, es que se emplean diferentes tipos de reómetros y métodos para la medición de las propiedades reológicas, por ello es importante reconocer y elegir bien el tipo de instrumental a usar.

### 1.3.2 Numero de Deborah ( $D_e$ )

Los cuerpos pueden comportarse como sólidos o líquidos o una combinación de ellas. Para la diferenciación entre los cuerpos sólidos y líquidos se define el número de Deborah ( $D_e$ ) como la relación entre el tiempo característico del material y el tiempo característico del proceso de deformación, expresándose de la siguiente manera:

$$D_e = \frac{t_c}{t_p} \quad (1.30)$$

Donde:

$D_e$ : Número de Deborah.(adimensional)

$t_c$ : Tiempo característico del material (tiempo de relajación).

$t_p$ : Tiempo característico del proceso de deformación (asociada al tiempo de experimentación).

El concepto del número de Deborah fue introducido por Marcus Reiner en 1,945, para diferenciar sólidos y líquidos. Por esto, el Número de Deborah está destinado a convertirse, fundamentalmente, en el número de la Reología, tratando a los sólidos y líquidos bajo un mismo concepto. El concepto es aplicable, también, a los fluidos, por lo que la diferencia entre los sólidos y los fluidos están definidos por el número adimensional  $D_e$ .

El concepto de tiempo característico del material, está asociada al tiempo de relajación que tiene un cuerpo a fluir, donde para los fluidos son valores muy pequeños y para los sólidos estos valores tienden al infinito. El tiempo característico del proceso de deformación, está referida al tiempo a la que es sometida el cuerpo a ser deformada en la experimentación, pudiendo ser valores pequeños o toda una vida, dependiendo del investigador u observador que lo experimenta.

CUADRO 1.1  
 VALORES DEL TIEMPO CARACTERISTICO DE ALGUNOS MATERIALES

$D_e \ll 1$ Comportamiento viscoso (fluido)	
Agua	$t_c \approx 10^{-13}$ s
Aceite	$t_c \approx 10^{-05}$ s
Poliéster	$t_c \approx 10^{-02}$ s
$D_e \approx 1$ Comportamiento viscoelastico	
Poliolefinas	$t_c \approx 10$ s
$D_e \gg 1$ Comportamiento elástico (sólido)	
Montañas	$t_c \approx 10^{+13}$ s

Fuente: Referencia bibliográfica [9]

También se debe tener en cuenta los conceptos básicos de algunos parámetros reológicos que se explican a continuación.

### 1.3.3 Esfuerzo de corte ( $\tau$ )

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

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1.31)$$

Donde,  $\tau$  es el esfuerzo de corte,  $F$  la fuerza tangencial aplicada y  $A$  el área sobre la cual actúa la fuerza tangencial.

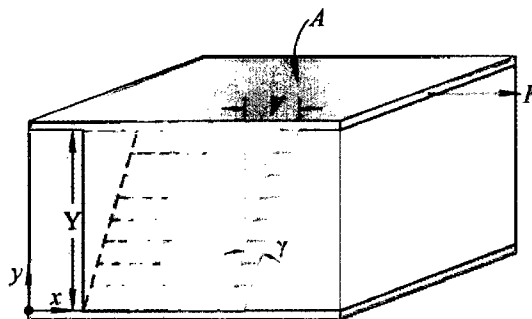


FIGURA 1.5 Deformación del fluido al ser sometido a esfuerzo

Fuente: Referencia bibliográfica [3]

### 1.3.4 Esfuerzo de Cedencia ( $\tau_r$ )

Es el esfuerzo cortante mínimo para que el fluido se ponga en movimiento. Este valor del esfuerzo de cedencia se obtiene al extender una recta tangencial a la curva generada en el reograma en las proximidades de iniciación del movimiento, es decir en el rango de los primeros valores de esfuerzos y deformación angular, tal como se muestra en la Figura 1.5.

### 1.3.5 Gradiente de Velocidad ( $\frac{dv}{dy}$ ), Velocidad de deformación Angular ( $\dot{\gamma}$ )

Cuando existe variación de la velocidad, entonces existe gradiente de velocidad. Se define como el cambio de velocidad “ $v$ ” a través de la distancia “ $y$ ” entre dos placas paralelas. Derivada de la velocidad del flujo con respecto a una coordenada espacial.

También es equivalente a la velocidad de la deformación que viene a ser el cambio de la deformación por unidad de tiempo.

$$\frac{d\gamma}{dt} \equiv \dot{\gamma} \equiv \frac{dv}{dy} \quad (1.32)$$

Donde:

$\gamma$ : Deformación (%)

$\frac{d\gamma}{dt} \equiv \dot{\gamma}$ : Velocidad de deformación angular.

$\frac{dv}{dy}$ : Gradiente de velocidad

### 1.3.6 Viscosidad ( $\mu$ )

Por su naturaleza física, la viscosidad es una medida de la resistencia a la deformación del fluido.

Dentro del análisis de la reometría para el estudio de la viscosidad, es conveniente diferenciar los tres tipos de descripción que se emplean comúnmente:

### Viscosidad dinámica o absoluta

Referida a la viscosidad instantánea obtenida al trazar la tangente o pendiente a la curva de fluidez en cada punto de dicha curva.

### Viscosidad aparente

Se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, siendo este término que se usa al hablar de viscosidad para fluidos no newtonianos.

### Viscosidad cinemática

Es la relación de la viscosidad dinámica con la densidad del fluido analizado, siendo la unidad más utilizada de esta viscosidad los centi stoke (cst).

Para la interpretación y el análisis del comportamiento de un fluido, es que se hace uso de la **Curva de Fluidez**, también conocido como **Reograma**, que es la representación grafica entre  $\tau_{yx}$  versus  $(dv_x/dy)$ , es decir entre esfuerzos de corte y la gradiente de velocidad. Esta representación gráfica se muestra en la Figura 1.6. También se extiende para la representación gráfica entre  $\mu$  versus  $(dv_x/dy)$ , llamada también **Curva de viscosidad**.

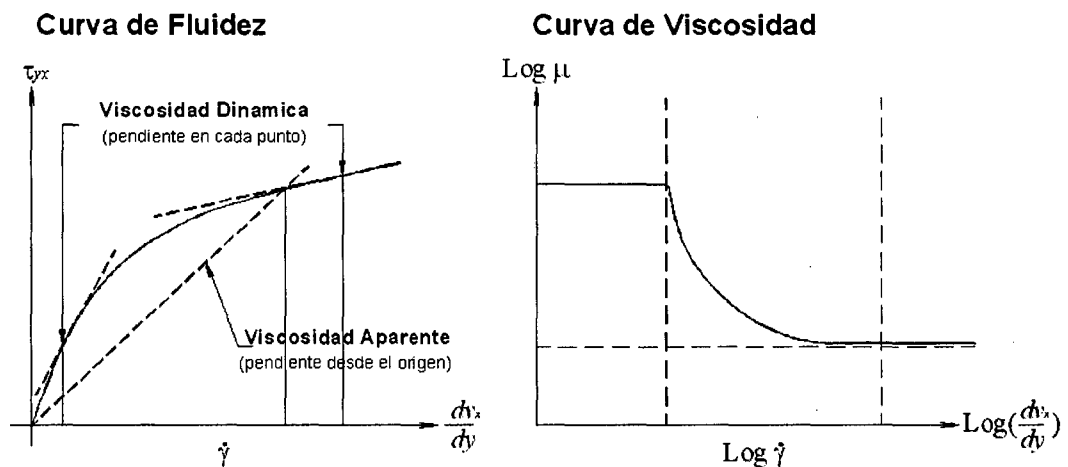


FIGURA 1.6 Interpretación grafica de la curva de fluidez y curva de viscosidad para la caracterización reológica  
Fuente: Referencia bibliográfica [9]

### 1.3.7 Ley de Newton de la viscosidad

Consideremos un fluido contenido entre dos grandes láminas planas y paralelas, de área  $A$ , separadas entre sí por una distancia muy pequeña  $Y$  (Ver Figura 1.7). Supongamos que el sistema está inicialmente en reposo, pero al cabo del tiempo  $t = 0$ , la lámina superior se pone en movimiento en la dirección del eje  $x$ , con una velocidad constante  $V$ . A medida que transcurre el tiempo el fluido gana cantidad de movimiento, y, finalmente se establece el perfil de velocidad en régimen estacionario, que se indica en la Figura 1.7. Una vez alcanzado dicho estado estacionario de movimiento, es preciso aplicar una fuerza constante  $F$  para conservar el movimiento de la lámina superior. Esta fuerza viene dada por la siguiente expresión (suponiendo que el flujo es laminar):

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{Y} \quad (1.33)$$

Es decir, que la fuerza por unidad de área es proporcional a la disminución de la velocidad con la distancia  $Y$ . La constante de proporcionalidad  $\mu$  se denomina viscosidad del fluido.

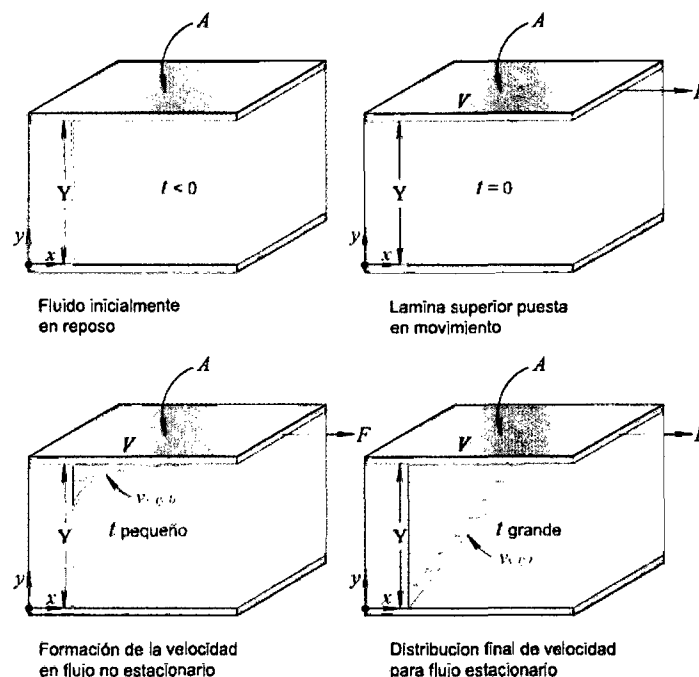


FIGURA 1.7 Formación del perfil de velocidad en estado estacionario para un fluido contenido entre dos láminas  
 Fuente: Referencia bibliográfica [3]

Es conveniente expresar la Ec. 1.33 en una forma más explícita, quedando de la siguiente forma:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (1.34)$$

Es decir, que la fuerza de corte por unidad de área es proporcional al gradiente de la velocidad local. Esta es la ley de Newton de la viscosidad, y los fluidos que la cumplen con este planteamiento se denominan fluidos newtonianos. Todos los gases y la mayor parte de los líquidos sencillos, se comportan de acuerdo con la Ec. 1.34.

CUADRO 1.2  
VISCOSIDADES DEL AGUA Y EL AIRE A 1 ATM DE PRESION

Temperatura	Agua (liquido)		Aire	
	Viscosidad	Viscosidad cinemática	Viscosidad	Viscosidad cinemática
° C	$\mu$ (cp)	$\nu$ (cm <sup>2</sup> /s)	$\mu$ (cp)	$\nu$ (cm <sup>2</sup> /s)
0	1.7870	0.017870	0.01716	0.1327
20	1.0019	0.010037	0.01813	0.1505
40	0.6530	0.006581	0.01908	0.1692
60	0.4665	0.004744	0.01999	0.1886
80	0.3548	0.003651	0.02087	0.2088
100	0.2821	0.002944	0.02173	0.2298

Fuente: Referencia bibliográfica [3]

CUADRO 1.3  
VISCOSIDADES DE ALGUNOS GASES Y LIQUIDOS A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Gases			Líquidos		
Sustancia	Temp.	Viscos.	Sustancia	Temp.	Viscos.
	° C	$\mu$ (cp)		° C	$\mu$ (cp)
n-Butano (i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	23	0.0076	Éter ((C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O)	20	0.245
Metano (CH <sub>4</sub> )	20	0.0109	Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	20	0.647
Agua (H <sub>2</sub> O)	100	0.0127	Bromo (Br <sub>2</sub> )	26	0.946
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	20	0.0146	Etanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	20	1.194
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	20	0.0175	Mercurio (Hg)	20	1.547
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20	0.0203	Acido Sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	25	19.150
Mercurio (Hg)	380	0.0654	Glicerina	20	1069

Fuente: Referencia bibliográfica [3]

CUADRO 1.4  
VISCOSIDAD DE ALGUNOS METALES LIQUIDOS

Metal	Temp.	Viscosidad	Metal	Temp.	Viscosidad
	° C	$\mu$ (cp)		° C	$\mu$ (cp)
Li	183.4	0.5918	Aleación Na-K 56% de Na y 44% de K en peso	103.7	0.546
	216.0	0.5406		250.0	0.316
	285.5	0.4548		700.0	0.161
Na			Hg	-20.0	1.850
				20.0	1.550
				100.0	1.210
				200.0	1.010
K	69.6	0.5150	Pb	441.0	2.116
	250.0	0.2580		551.0	1.700
	700.0	0.1360		844.0	1.185

Fuente: Referencia bibliográfica [3]

### Fluidos no-Newtonianos

De acuerdo con la ley de la viscosidad de Newton (Ec. 1.34), al representar gráficamente  $\tau_{yx}$  versus  $(dv_x/dy)$  para un fluido determinado, debe obtenerse una línea recta que pasa por el origen de coordenadas, y cuya pendiente es la viscosidad del fluido a una cierta temperatura y presión. En efecto, la experiencia demuestra que para todos los gases y los líquidos homogéneos no polimerizados  $\tau_{yx}$  es directamente proporcional a  $(dv_x/dy)$ . Sin embargo, existen algunos materiales industrialmente importantes que no se comporta de acuerdo a la Ec. 1.34 por lo que se les conocen a estas sustancias con el nombre de fluidos no-newtonianos.

### 1.3.8 Tipos de Fluido

Los conceptos básicos sobre reología vertidos anteriormente, conllevan a que hagamos diferenciaciones entre los fluidos, pero esta diferenciación hace a su vez, que tengamos muchos criterios para diferenciar a los fluidos. Para los casos que se analizan, solo clasificaremos los tipos de fluido de acuerdo a su propiedad física fundamental, la viscosidad, es decir enfocaremos nuestra clasificación, de acuerdo a la variabilidad de su viscosidad al ser sometida el fluido a esfuerzos de corte. Teniendo en cuenta esta particularidad señalada, podemos indicar a los fluidos puramente viscosos y fluidos viscoelásticos.



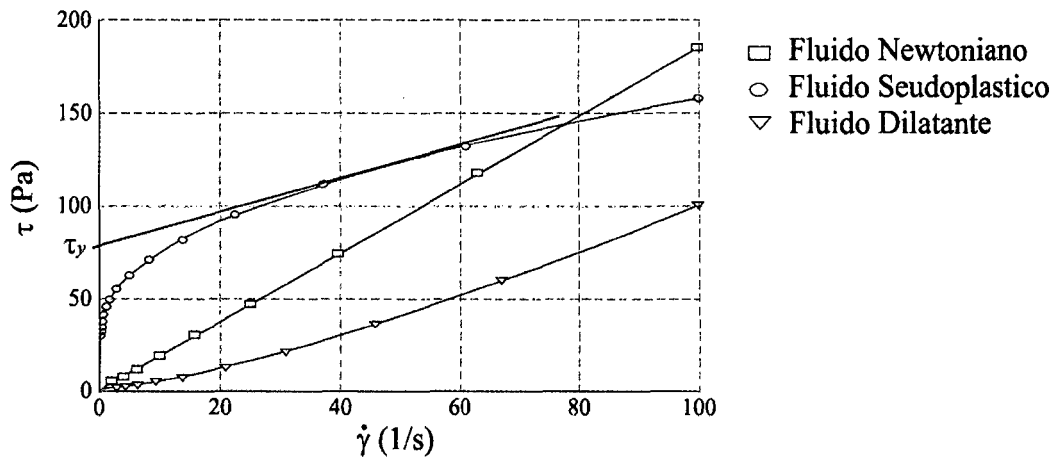


FIGURA 1.8 Reograma de fluido Newtoniano y no Newtoniano

Fuente: Elaboración Propia

### Fluidos puramente viscosos

#### Newtonianos

Este tipo de fluido se caracteriza por cumplir la ley de Newton para la viscosidad de acuerdo a la Ec. 1.34, es decir que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Hay que tener en cuenta que la viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo de corte, pero si dependen de la temperatura y de la presión a la que esté sometido el fluido.

#### No Newtonianos

Este de tipo de fluido es el más común y su comportamiento no está regido por la Ec. 1.34. Los fluidos no newtonianos son aquellos en la que la relación del esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. Estos fluidos a su vez se diferencian en dependientes e independientes del tiempo de aplicación del esfuerzo de corte:

##### Independientes del tiempo de aplicación

Se caracterizan principalmente si tienen o no esfuerzo de cedencia, es decir, si necesitan un mínimo de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento.

Dentro de los fluidos que no presentan esfuerzo de cedencia están los pseudoplásticos y los dilatantes:

**Pseudoplásticos**, este tipo de fluido se caracteriza por una disminución de su viscosidad a medida que aumenta el esfuerzo de corte.

**Dilatante**, estos fluidos a diferencia de los pseudoplasticos, se caracterizan por un aumento de su viscosidad a medida que aumenta el esfuerzo de corte.

**Plásticos (Viscoplásticos)**, este tipo de fluido se comporta como un sólido hasta que sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo (esfuerzo de cedencia) y a partir de dicho valor se comporta como un líquido.

### **Dependientes del tiempo de aplicación**

Este tipo de fluidos se clasifican en dos tipos:

**Tixotrópicos**, en los que la viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo de corte, recuperando su estado inicial después de un reposo prolongado.

Los fluidos tixotrópicos se caracterizan por el cambio en su estructura interna al aplicarle un esfuerzo de corte, produciendo en ella la rotura de las largas cadenas que conforman sus moléculas. Al manifestarse estos cambios, aparece el fenómeno de la Histéresis.

Histéresis, proceso por el cual el material (fluido) tiende a conservar su propiedad (viscosidad, deformación) inicial, en ausencia del estímulo que la generó (en nuestro caso el esfuerzo de corte es el estímulo que genera la deformación y cambios en la viscosidad).

**Reopécticos**, en los cuales su viscosidad aumenta al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo de corte y vuelve a su estado anterior después de un tiempo de reposo.

Los fluidos reopécticos se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir, que al aplicar un esfuerzo de corte se producen formaciones de enlaces intermoleculares conllevando a un aumento de la viscosidad, mientras que si cesa la aplicación del esfuerzo cortante se produce una destrucción de los enlaces dando lugar a la

disminución de la viscosidad. Estos tipos de fluidos presenta una histéresis inversa a los tixotrópicos.

### **Fluidos viscoelásticos**

Los fluidos viscoelásticos por tener un comportamiento no Newtoniano, se caracterizan por presentar a la vez tanto propiedades viscosas como elásticas. Esta mezcla de propiedades se debe a la existencia en el fluido de moléculas muy largas y flexibles, es decir a su estructura molecular. También se presenta este comportamiento dual viscoelástico, a la presencia en el fluido de partículas sólidas en suspensión.

#### **1.3.9 Flujos hiperconcentrados**

Para los flujos hiperconcentrados, no hay un criterio común que permita tener una definición clara de estos flujos, cada investigador adopta su propio concepto basados en la experimentación y en la experiencia. Aunque no haya una uniformidad en la definición, lo que sí se ha observado es que para la "identificación" de estos flujos, la mayoría de los investigadores basan su clasificación en caracterizarlos en términos de su esfuerzo de corte y de la concentración (volumétrica o en peso) de partículas sólidas en suspensión. Esta clasificación adoptada, establece rango de valores tanto de los esfuerzos de corte y de la concentración de partículas sólidas, que en su mayoría son propias de cada investigador de acuerdo a su observación.

Del resultado de los estudios de flujos de corrientes concentrados, Beverage y Culbertson [2] (1964) definieron **Hiperconcentración** a concentraciones de sedimentos en peso, en el rango comprendida entre 40% a 80%.

Costa [6] (1988) al igual que otros investigadores 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 Cuadro 1.5, Costa es muy práctico para identificar a estos tipos de flujo.

CUADRO 1.5  
CLASIFICACIÓN SEGÚN COSTA (1988)

Flujo	Concentración de partículas sólidas en:		Densidad de Sólidos (g/cm <sup>3</sup> )	$\tau_y$ (dn/cm <sup>2</sup> )	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	Viscoplastico

Fuente: Referencia bibliográfica [6]

### 1.3.10 Modelos Reológicos

El comportamiento reológico, en estado estacionario, de la mayor parte de los fluidos que se indican en la Figura 1.9 puede establecerse mediante una forma generalizada de la Ec. 1.34 como se muestra a continuación:

$$\tau_{yx} = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (1.35)$$

Donde  $\eta$  puede expresarse a su vez en función de  $dv_x/dy$  o de  $\tau_{yx}$  indistintamente.

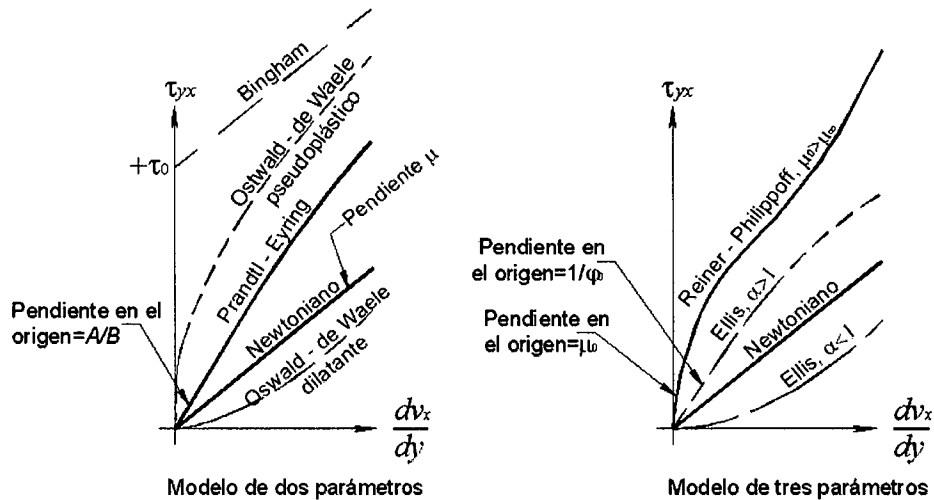


FIGURA 1.9 Modelos reológicos no-newtonianos en estado estacionario

Fuente: Referencia bibliográfica [3]

Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas o “modelos” para expresar la relación entre  $\tau_{yx}$  (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  $\tau_{yx}$  frente a  $dv_x/dy$  a temperatura y presión constante. A continuación se presentan algunos modelos más representativos:

**Modelo de Bingham**

$$\tau_{yx} = \mu_0 \frac{dv_x}{dy} \pm \tau_0 \quad \text{Si } |\tau_{yx}| > \tau_0 \quad (1.36a)$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0 \quad \text{Si } |\tau_{yx}| < \tau_0 \quad (1.36b)$$

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  $\tau_0$ , 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 1.6 se indican los parámetros de Bingham para suspensiones de partículas de combustibles nucleares en agua pesada.

CUADRO 1.6  
PARAMETROS DEL PLASTICO DE BINGHAM PARA PRESIONES DE  
COMBUSTIBLES NUCLEARES

Material Suspendido	Tamaño de Partícula		$k_1 = \frac{\tau_0}{\phi^4}$ (dina cm <sup>-2</sup> )	$k_2 = \frac{\ln \mu_0 / \mu_\omega}{\phi}$ (adimensional)
	D (micrones)	$\sigma$ (adimensional)		
UO <sub>2</sub>	1.4	1.7	7.2 x 10 <sup>4</sup>	18
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.3	2.0	11.0 x 10 <sup>4</sup>	22
UO <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O	1.2	1.9	20.6 x 10 <sup>4</sup>	22
Material Suspendido	D	$\sigma$	$k_3 = \frac{\tau_0}{\phi^3}$ (dina cm <sup>-2</sup> )	$k_4 = \frac{\ln \mu_0 / \mu_\omega}{\phi}$ (adimensional)
	(micrones)	(adimensional)		
ThO <sub>2</sub>	0.03	2.7	52.7 x 10 <sup>4</sup>	24
	0.75	2.8	26.3 x 10 <sup>4</sup>	14
	1.60	1.5	4.8 x 10 <sup>4</sup>	12
	2.40	1.7	1.6 x 10 <sup>4</sup>	12

Fuente: Referencia bibliográfica [3]

Donde:

$D$ : Diámetro de la partícula de masa medida

$\sigma$ : Desviación estándar del  $\ln$  (diámetro de la partícula) respecto de  $\ln(D)$

$\phi$ : Fracción del volumen de sólidos en suspensión

$\mu_0, \tau_0$ : Parámetros de Bingham para la suspensión

$\mu_w$ : Viscosidad del agua a la misma presión y temperatura

**Modelo de Ostwald – de Waele**

$$\tau_{yx} = m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy} \tag{1.37}$$

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 pseudoplástico, mientras que para valores superiores a la unidad es dilatante. En el Cuadro 1.7 se dan algunos valores aproximados de  $m$  y  $n$  para distintos fluidos.

**CUADRO 1.7**  
**PARÁMETROS DEL MODELO DE LA POTENCIA PARA VARIOS FLUIDOS A**  
**TEMPERATURA AMBIENTE**

Composición del fluido (% en peso)	$m$ (dina seg <sup>n</sup> cm <sup>-2</sup> )	$n$ (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	92.90	0.566
33.0% de cal en agua	71.80	0.171
10.0% de napalm en kerosene	42.80	0.520
4.0% de pasta de papel en agua	200.00	0.575
54.3% de cemento en agua	25.10	0.153

Fuente: Referencia bibliográfica [3]

CMC : Carboximetilcelulosa

### **Modelo de Eyring**

$$\tau_{yx} = A \cdot \operatorname{arcsenh} \left( \frac{1}{B} \frac{dv_x}{dy} \right) \quad (1.38)$$

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

### **Modelo de Ellis**

$$\frac{dv_x}{dy} = \left( \varphi_0 + \varphi_1 |\tau_{yx}|^{\alpha-1} \right) \tau_{yx} \quad (1.39)$$

Este modelo consta de tres parámetros positivos ajustables:  $\varphi_0$ ,  $\varphi_1$  y  $\alpha$ . Si se toma para  $\alpha$  un valor mayor que la unidad, el modelo tiende hacia la ley de Newton para valores bajos de  $\tau_{yx}$ . El modelo presenta una gran flexibilidad, y en el están comprendidas, como casos particulares, tanto la ley de Newton (para  $\varphi_1 = 0$ ), como la ley de la potencia ( $\varphi_0 = 0$ ). En el Cuadro 1.8 se presentan los parámetros de Ellis para diversos fluidos.

CUADRO 1.8  
PARAMETROS DE ELLIS PARA SOLUCIONES DE CARBOXIMETIL  
CELULOSA EN AGUA

Concentración de la solución (% en peso)	Temperatura °C	$\alpha$ (adimens.)	$\varphi_0$ (cm <sup>2</sup> seg <sup>-1</sup> dina <sup>-1</sup> )	$\varphi_1$ (cm <sup>2<math>\alpha</math></sup> seg <sup>-1</sup> dina <sup>-<math>\alpha</math></sup> )	Intervalo experimental del esfuerzo cortante (dina cm <sup>-2</sup> )
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	0.0000	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

Fuente: Referencia bibliográfica [3]

CMC bajo, medio y alto; son preparados comerciales de carboximetilcelulosa de bajo, medio y elevado peso molecular.

### Modelo de Reiner – Philippoff

$$\frac{dv_x}{dy} = \left( \frac{1}{\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\tau_{yx} / \tau_s)^2}} \right) \tau_{yx} \quad (1.40)$$

Este modelo contiene también tres parámetros positivos ajustables:  $\mu_0$ ,  $\mu_\infty$  y  $\tau_s$ . 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. 1.40 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 1.9 se dan valores de  $\mu_0$ ,  $\mu_\infty$  y  $\tau_s$ , para diversos fluidos.

CUADRO 1.9

PARAMETROS DE REINER – PHILIPPOFF PARA DIVERSOS FLUIDOS

Sustancia	Temperatura °C	$\mu_0$ (poise)	$\mu_\infty$ (poise)	$\tau_s$ (dina cm <sup>-2</sup> )	Intervalo experimental del esfuerzo cortante (dina cm <sup>-2</sup> )
Azufre fundido	120	0.215	0.0105	0.073	0.2 a 10
Butirato de colesteroína	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

Fuente: Referencia bibliográfica [3]

La Figura 1.9 es una descripción gráfica del comportamiento reológico de los modelos que hemos presentado. Debemos tener presente que estas ecuaciones no son más que fórmulas empíricas de ajuste de curvas, y por consiguiente, sería muy 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.



### **Modelo de O'Brien y Julien**

El modelo reológico cuadrático presentado por O'Brien y Julien (1985) plantea, es aplicable para flujos hiperconcentrados:

$$\tau = \tau_y + \mu \frac{dv}{dy} + C_I \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (1.41)$$

Donde:

$\tau_y$ : Esfuerzo de cedencia

$\mu$ : Viscosidad dinámica

$C_I$ : Parámetro turbulento dispersivo

### **Modelo de Bagnold**

El modelo de Bagnold, aplicado a flujos de escombros desarrolla los conceptos de esfuerzo dispersivo. Bagnold realizó experimentos con partículas cizallándose (deformándolas) en un cilindro giratorio, determinando que los esfuerzos de soporte de la partícula eran generados por el resultado de las colisiones entre las partículas. Los esfuerzos generados por este proceso fueron un esfuerzo normal ( $P$ ) llamado esfuerzo dispersivo y un esfuerzo al corte ( $\tau$ ). El modelo de Bagnold es escrito como:

$$\tau = a_i \rho_s \lambda^2 D^2 \left( \frac{dv}{dz} \right)^2 \text{sen} \phi_d \quad (1.42a)$$

$$P = a_i \rho_s \lambda^2 D^2 \left( \frac{dv}{dz} \right)^2 \text{cos} \phi_d \quad (1.42b)$$

Donde:

$\tau$  : Esfuerzo al corte

$P$  : Esfuerzo normal del grano

$\rho_s$ : Densidad del grano

$D$  : Diámetro del grano

$a_i$  : Constante numérica

$\phi_d$  : Ángulo (dinámico) de fricción interna

$\lambda$  : Concentración lineal

## CAPITULO 2

### DETERMINACION DE LOS PARAMETROS FÍSICOS Y REOLÓGICOS DEL SISTEMA SÓLIDO – LÍQUIDO

Determinar los parámetros reológicos de flujos hiperconcentrados, implica tener en consideración metodologías de análisis e interpretación, disponibilidad de equipo instrumental que permita cuantificar de forma directa o indirecta los parámetros reológicos. En tal sentido, en este capítulo se da a conocer los principios básicos con los que son diseñados los equipos instrumentales comerciales que se encuentran en el mercado, es decir, la variedad de reómetros más comunes.

La no disponibilidad de un equipo instrumental de medición reológica, y siendo como objetivo principal de la investigación determinar los parámetros reológicos, es que se plantea la elaboración del prototipo instrumental que permita obtener en forma directa (planteando ecuaciones matemáticas) los parámetros en estudio. También se describe la metodología de calibración del equipo instrumental y las ecuaciones matemáticas para determinar los parámetros reológicos.

#### 2.1 TIPOS DE REOMETROS – VISCOSIMETROS

Existe una variedad de equipos de medición para la caracterización reológica de los fluidos, la elección del tipo de reómetro – viscosímetro está condicionado al tipo de fluido que uno ensaya o experimenta.

Los reómetros se diferencian básicamente en el principio físico que emplean para determinar los parámetros que se registran durante el ensayo, que a su vez está asociado al tipo de fluido a ensayar.

Para la obtención de los parámetros reológicos, los reómetros emplean dos métodos diferentes: El primer método es el de la **velocidad de deformación controlada (CR)**, en la que para cada valor de la velocidad de deformación controlada se miden los esfuerzos resultantes, a este tipo de instrumento también se le denomina “instrumentos de deformación controlada”. El segundo método empleado, es el de **esfuerzos de corte controlados (CS)**, que consiste

en aplicar esfuerzos de cortes controlados a la muestra y medir la deformación resultante, el diseño de estos instrumentos es más moderno y de uso especial para mediciones a muy bajas velocidades de corte.

Dependiendo el tipo de información que pueden registrar estos equipos y el tipo de investigación que uno quiera desarrollar, es que, existen instrumentos de medición absoluta e instrumentos de medición relativa.

Los equipos de **medición absoluta** presentan las siguientes características:

- Las condiciones de ensayo son controlados (esfuerzos de corte controlados o velocidad de deformación controlada).
- Se miden magnitudes físicas.
- Los esfuerzos de corte y la velocidad de deformación se obtiene mediante fórmula matemática sin correlaciones y/o calibraciones.

Por lo tanto: son exactos y se pueden efectuar las curvas (reograma o curva de fluidez, curva de viscosidad).

Los equipos de **medición relativa** presentan las siguientes características:

- Las condiciones de ensayo no son tan controlados.
- Se miden magnitudes físicas.
- Los esfuerzos de corte y la velocidad de deformación se obtiene mediante correlaciones y/o calibraciones.

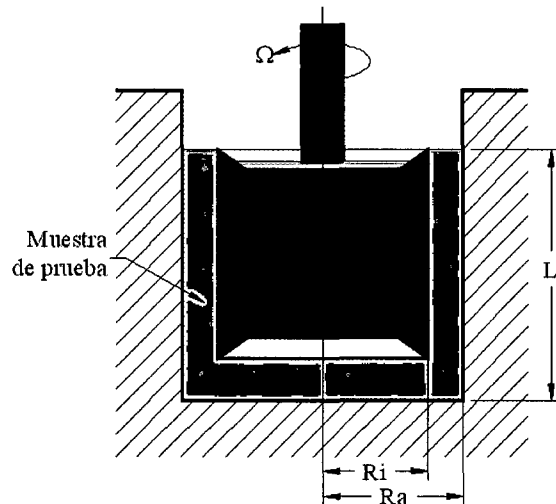
Por lo tanto, no son útiles para obtener curvas (reograma o curva de fluidez, curva de viscosidad).

Dentro de esta variedad de condiciones y características que presentan los reómetros, podemos clasificarlos:

### 2.1.1 Rotatorios

Dentro de los reómetros rotatorios más comunes, se tienen los de tipo: cilindros coaxiales, cono – plato y platos paralelos.

#### Cilindros Coaxiales



Donde:

$\Omega$  : Velocidad angular

$R_a$  : Radio de la copa

$R_i$  : Radio del rotor

FIGURA 2.1 Reómetro de cilindros coaxiales

Fuente: Referencia bibliográfica [9]

El principio en la que se fundamenta el funcionamiento de este tipo de reómetro para la determinación de la velocidad de deformación y esfuerzos de corte, están dadas por las siguientes ecuaciones:

**Velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), se tiene:**

$$\dot{\gamma}_r = \frac{2\Omega R_i^2}{r^2} \left( \frac{R_a^2}{R_a^2 - R_i^2} \right) \quad (2.1)$$

Si:  $r = R_i$ , en la ecuación 2.1, se tiene:

$$\dot{\gamma}_i = 2\Omega \left( \frac{R_a^2}{R_a^2 - R_i^2} \right) \quad (2.2)$$

Donde:

$\dot{\gamma}_i$  = Velocidad de deformación para un radio  $R_i$  del rotor

$\dot{\gamma}_r$  = Velocidad de deformación para un radio  $r$  dentro del espacio  
( $R_a - R_i$ )

$\Omega$  = Velocidad angular en el rotor

$R_a$  = Radio de la copa

$R_i$  = Radio del rotor

**Esfuerzo de Corte ( $\tau_r$ ), se tiene**

$$\tau_r = \frac{M_d}{2\pi.L.r^2.CI} \quad (2.3)$$

Si:  $r = R_i$ ,  $r = R_a$  en la ecuación 2.3, se tiene:

$$\tau_i = \frac{M_d}{2\pi.L.R_i^2.CI} \quad y \quad (2.4a)$$

$$\tau_a = \frac{M_d}{2\pi.L.R_a^2.CI} \quad (2.4b)$$

Donde:

$\tau_i$  = Esfuerzo de corte para un radio  $R_i$

$\tau_a$  = Esfuerzo de corte para un radio  $R_a$

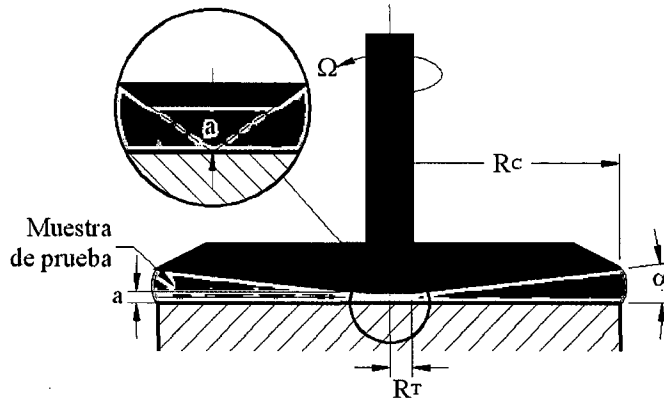
$\tau_r$  = Esfuerzo de corte radial para la coordenada  $r$

$M_d$  = Torsión medida

$L$  = Altura del rotor

$CI$  = Factor de corrección de la torsión, que incorpora los efectos de la superficie del rotor. La evaluación requiere conocer  $\tau_i$  y  $\tau_r$ , mientras que  $\tau_a$  es de menor importancia para la mayoría de las pruebas.

### Cono – Plato



Donde:

$\Omega$  : Velocidad angular

$R_c$  : Radio exterior del cono

$R_\tau$  : Radio truncado

$\alpha$  : Angulo cono

$a$  : Altura de la punta quitada

FIGURA 2.2 Reómetro tipo cono – plato

Fuente: Referencia bibliográfica [9]

Así también, este tipo de reómetro hace los siguientes planteamientos para la determinación de la velocidad de deformación y esfuerzo de corte:

**Velocidad de deformación** ( $\dot{\gamma}_c$ ), se tiene:

$$\dot{\gamma}_c = \frac{1}{\tan \alpha} \cdot \Omega, \text{ haciendo } \frac{1}{\tan \alpha} \approx \frac{1}{\alpha} \text{ tenemos:} \quad (2.5)$$

$$\dot{\gamma}_c = \frac{1}{\alpha} \cdot \Omega$$

Donde:

$\Omega$  = Velocidad angular

$\alpha$  = Angulo de cono

**Esfuerzo de corte** ( $\tau_c$ ), tenemos:

$$\tau_c = \frac{3 \cdot M_d}{2\pi \cdot R_c^3} \quad (2.6)$$

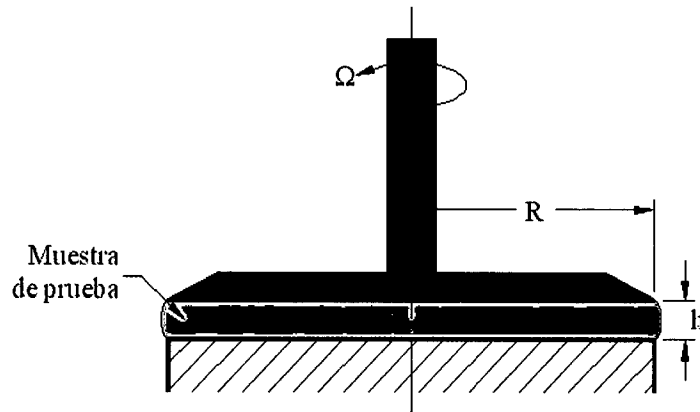
Donde:

$\tau_c$  = Esfuerzo de corte en el cono

$R_c$  = Radio externo del cono

$M_d$  = Torsión medida

## Platos paralelos



Donde:

$\Omega$ : Velocidad angular

R: Radio del plato

h: Distancia entre platos

FIGURA 2.3 Reómetro tipo platos paralelos

Fuente: Referencia bibliográfica [9]

De forma similar, se tiene las siguientes ecuaciones para determinar la velocidad de deformación y el esfuerzo de corte:

**Velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ):**

$$\dot{\gamma}_{\max} = M \cdot \Omega \quad \text{donde: } M = \frac{R}{h} \quad (2.7)$$

Donde:  $M$  es un factor que relaciona el radio ( $R$ ) del plato y la distancia entre los platos ( $h$ ), y  $\Omega$  la velocidad angular.

**Deformación ( $\gamma$ ):**

La deformación  $\gamma$ , está relacionada con el factor de geometría ( $M$ ) y la desviación angular ( $\varphi$ ):

$$\gamma = M \cdot \varphi \quad (2.8)$$

### Esfuerzo de corte ( $\tau$ ):

El esfuerzo de corte en el borde externo de la placa, es proporcional a la torsión ( $M_d$ ) y al factor geométrico ( $A$ ):

$$\tau = M_d \cdot A; \quad A = \frac{2}{\pi \cdot R^3} \Rightarrow \tau = M_d \frac{2}{\pi \cdot R^3} \quad (2.9)$$

Para fluidos de comportamiento no newtoniano, el esfuerzo de corte debe ser corregida (ley de potencia para  $n < 1$ ). Según Weissenberg:

$$\tau = M_d \cdot A \cdot \left(\frac{3+n}{4}\right) \quad (2.10)$$

### 2.1.2 Capilares

Dentro de este grupo, existe un número de instrumentos simples y sofisticados que están diseñadas para medir la viscosidad.

Los viscosímetros capilares bien diseñados, permiten que un líquido fluya bajo un régimen laminar. El flujo laminar en capilares o tubo capilar, se puede entender como un movimiento de capas uno sobre el otro, dentro del tubo.

Con respecto a los viscosímetros capilares, se distinguen básicamente los viscosímetros de tubo capilar de presión variable y los viscosímetros capilares gravitacionales.

Las ecuaciones que permiten obtener la velocidad deformación y esfuerzo de corte en este tipo de viscosímetro, son:

### Velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ):

$$\dot{\gamma}_r = \frac{4 \cdot r \cdot Q}{\pi \cdot R^4} \quad (2.11)$$

Para  $r = R$ , la Ec. 2.11, queda expresada:

$$\dot{\gamma}_R = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3} \quad (2.12)$$



Donde:

$\dot{\gamma}_r$  = Velocidad de deformación para la coordenada  $r$

$\dot{\gamma}_R$  = Velocidad de deformación para un radio  $R$

$R$  = Radio del tubo capilar

$r$  = Coordenada  $r$  en dirección radial

$Q$  = Caudal del flujo

**Esfuerzo de corte ( $\tau$ ):**

El esfuerzo de corte en un tubo capilar, está dada por la siguiente ecuación:

$$\tau_r = \frac{r}{2.\Delta L} \Delta P \quad \text{para } r = R \Rightarrow \tau_R = \left(\frac{R}{2.\Delta L}\right) \Delta P \quad (2.13)$$

Donde:

$\tau_R$  = Esfuerzo de corte para un radio  $R$

$\tau_r$  = Esfuerzo de corte radial para la coordenada  $r$

$\Delta L$  = Longitud capilar entre los puntos  $I$  y  $II$  (Ver Figura 2.4)

$\Delta P$  = Caída de presión (entre los puntos  $I$  y  $II$ ) a lo largo de la longitud capilar  $\Delta L$  (Ver Figura 2.4)

### Viscosímetros de tubo capilar de presión variable

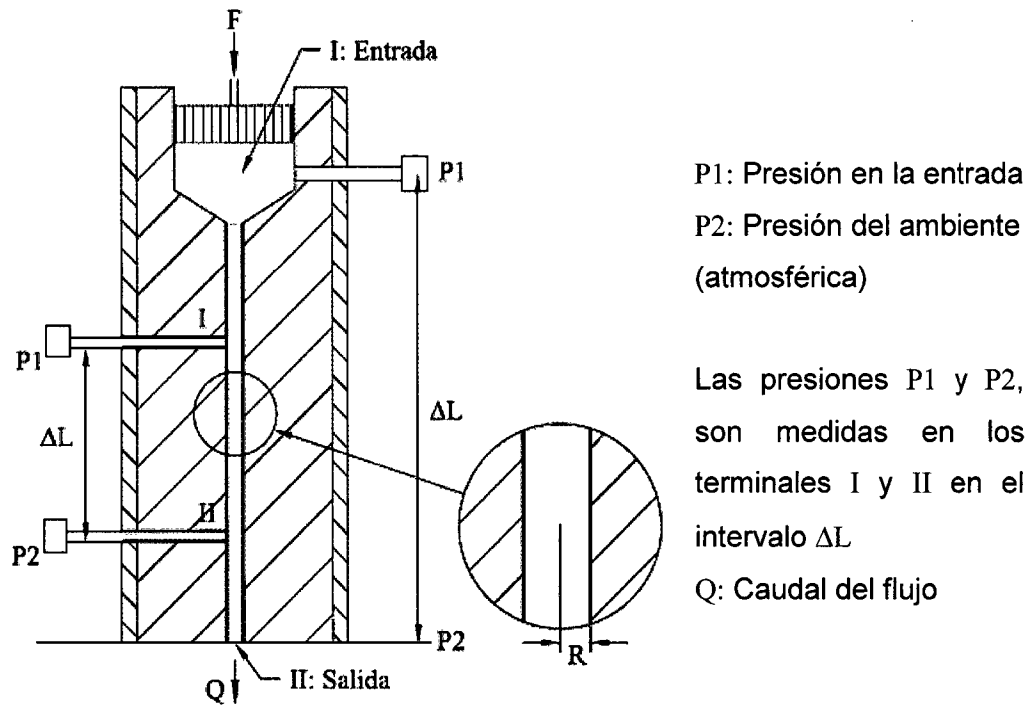


FIGURA 2.4 Reómetro – viscosímetro de tubo capilar de presión variable

Fuente: Referencia bibliográfica [9]

### Viscosímetros capilares gravitacionales

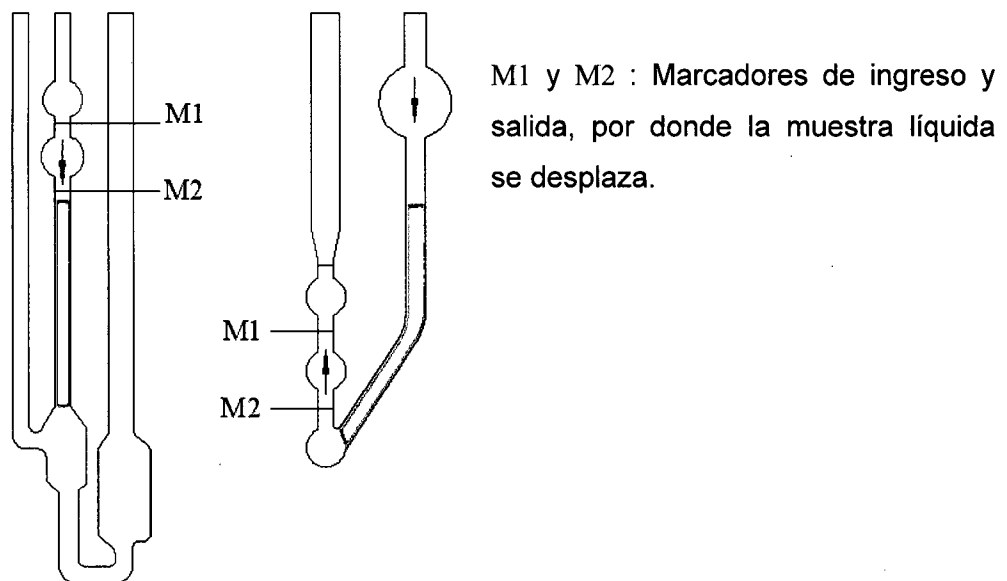


FIGURA 2.5 Viscosímetro capilar gravitacional

Fuente: Referencia bibliográfica [9]

Este tipo de viscosímetro que se muestra en la Figura 2.5, se caracteriza por el hecho de que la muestra líquida no está sujeta a altas presiones variables, es decir su movimiento a través del tubo capilar es accionado por su propio peso. La muestra se llena por un depósito ancho superior, que conduce a la entrada del tubo capilar. El peso de la columna líquida sobre el orificio de la salida, iguala la energía potencial de la muestra que fuerza el líquido a atravesar el tubo capilar. Por lo que, para el cálculo de la viscosidad cinemática, se realiza por:

$$\nu = C \cdot \Delta t \quad (2.14)$$

Donde:

$\nu$  = Viscosidad cinemática

$\Delta t$  = Tiempo que le toma al líquido en pasar los marcadores M1 y M2, (ver Figura 2.5)

$C$  = Constante del instrumento relacionada a las dimensiones del tubo capilar.

### Viscosímetros de orificio

Los viscosímetros de orificio, por ser un equipo de medición relativa, también parten del principio planteado en la Ec. 2.14 para el cálculo de la viscosidad cinemática.

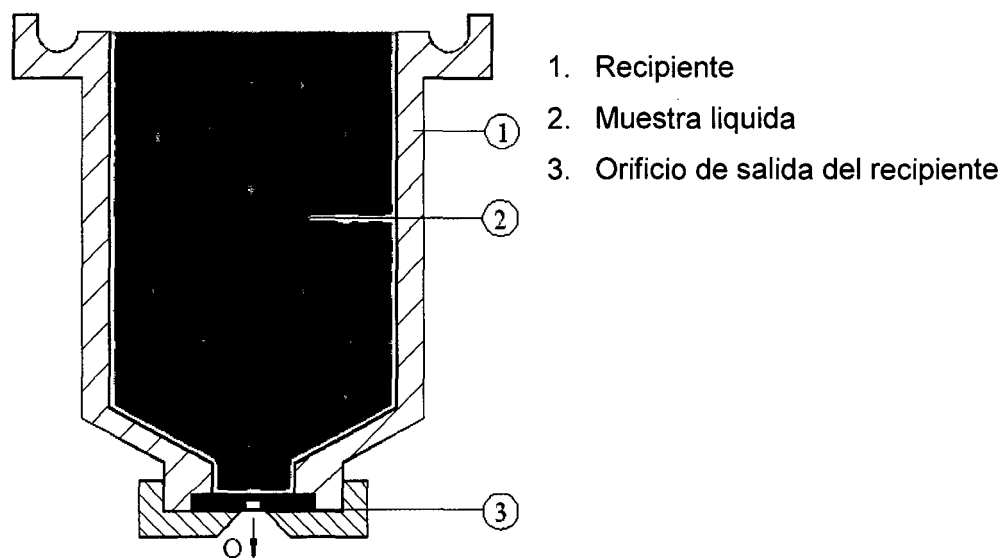


FIGURA 2.6 Viscosímetro capilar de orificio  
Fuente: Referencia bibliográfica [9]

### 2.1.3 Caída de esfera

Este tipo de equipo es el más común de los viscosímetros bajo el principio de caída de una esfera, que fue inventada en los años 30 por el químico Haake, de uso especialmente para fluidos newtonianos de baja viscosidad. El rango de medición para la obtención de la viscosidad, está relacionada con el rango de variaciones del diámetro y la densidad de las esferas a utilizar para el ensayo de una muestra de fluido. En el mercado también existen modelos de viscosímetro bajo este principio, que permiten ensayar fluidos no newtonianos, claro que esto dependerá de las características geométricas del equipo y para ciertos tipos de fluidos.

En la Figura 2.7 se muestra el viscosímetro de caída de esfera

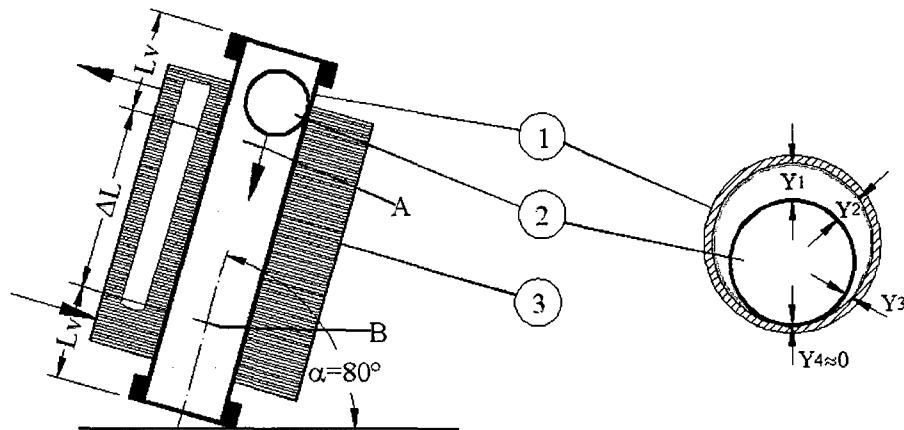


FIGURA 2.7 Viscosímetro de caída de una esfera

Fuente: Referencia bibliográfica [9]

En casi todos los casos la muestra fluida es líquida, esta muestra es contenida en un tubo de cristal (1) la misma que está rodeado por una cámara (3) que permite el control de la temperatura por medio de un agente circulante que mantiene la temperatura constante. El tubo se coloca en una inclinación de  $10^\circ$  con respecto a la vertical, a lo largo del tubo existen dos marcas A y B espaciadas  $\Delta L = 100\text{mm}$ . Se permite caer la esfera (2) a través de la muestra fluida desde la posición de partida (velocidad  $v = 0$ ), la esfera en su trayecto primero acelera a lo largo de la distancia  $L_v$ , permitiendo que la esfera alcance una velocidad (velocidad límite constante) en estado estacionario que proporcione un flujo uniforme dentro del tubo de cristal (1). El tiempo requerido  $\Delta t$  para que la esfera haga su trayecto se mide entre las marcas comprendidas

entre  $A$  y  $B$ . Estos tipos de instrumentos, por lo general, se encuentran calibrados por fluidos newtonianos de viscosidad conocida.

Para el cálculo de la viscosidad  $\mu$ , se utiliza la siguiente ecuación:

$$\mu = k(\rho_1 - \rho_2)\Delta t \quad (2.15)$$

Donde:

$k$  = Factor de calibración del instrumento

$\rho_1$  = Densidad de la esfera

$\rho_2$  = Densidad de la muestra líquida (fluido)

$\Delta t$  = Tiempo que recorre la esfera la distancia  $\Delta L$

#### 2.1.4 Caída de cilindro

El equipo consta de un cilindro tubular (1) que se encuentra fija, dentro de ella se deposita la muestra (3), mientras que el cilindro (2) es la que desplaza dentro del cilindro tubular (1), ambos tanto el cilindro desplazante (2) como el cilindro tubular (1) contienen su eje en su centro y es común para los dos. El cilindro (2) parte de la posición inicial  $A$  (velocidad  $v=0$ ) haciendo un recorrido hasta la posición  $B$ . El tramo  $A$  a  $B$ , desarrollado por el cilindro (2), es registrado su posición y desplazamiento con la que se determina su velocidad para intervalos pequeños.

El sistema en movimiento, vale decir el cilindro (2), desarrolla un movimiento vertical, para lo cual la muestra a ensayar se encuentra en el cilindro tubular (1) como también en los exteriores de ella de tal forma que la muestra no es confinada o cerrada dentro del cilindro tubular.

**Esfuerzo de corte ( $\tau$ ):**

Para la obtención del esfuerzo de corte ( $\tau$ ), se plantea la siguiente ecuación:

$$\tau_R = \frac{\rho \cdot R(1 - k^2)}{2} \cdot (g - a_z) \quad (2.16a)$$

También:

$$\tau_R = \frac{F_r}{2\pi R \Delta L} \quad (2.16b)$$

Donde:

$a_z$ : Aceleración instantánea (aceleración de caída)

$\rho$ : Densidad de muestra líquida (fluido)

$F_r$ : Fuerza de fricción obtenida del experimento para el intervalo  $\Delta L$

$\Delta L$ : Intervalo de caída analizada

$v$ : Velocidad de caída del cilindro móvil ( $v$ ) (ver Figura 2.8)

$R$ : Radio del cilindro fijo

$kR$ : Radio del cilindro móvil.

**Velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ):**

La razón de corte, velocidad de deformación o gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ), esta dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{\gamma}_R = \frac{v}{R(1-k)} \quad (2.17)$$

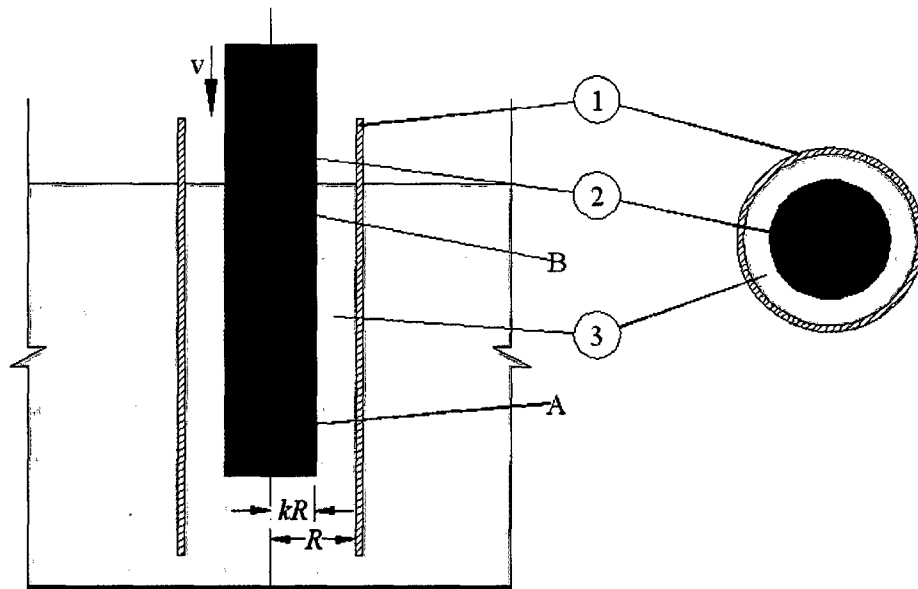


FIGURA 2.8 Reómetro de caída de cilindro

Fuente: Referencia bibliográfica [9]

## 2.2 PROTOTIPO DE EQUIPO DE MEDICION REOLOGICA – MAQUINA DE ATWOOD

Con la finalidad de poder caracterizar reológicamente el flujo hiperconcentrado, es que se propone la utilización del instrumental de medición reológica – Máquina de Atwood. Esto no implica que puedan ser usados otros tipos de equipos. Solo por consideraciones presupuestales en su elaboración, se ha optado por efectuar los trabajos experimentales con el equipo propuesto.

El prototipo, utiliza los conceptos de la máquina de Atwood, siendo ésta un dispositivo mecánico que fue inventada en 1784 por George Atwood como un experimento de laboratorio para verificar las leyes mecánicas del movimiento uniformemente acelerado. El dispositivo consiste en una polea que tenga muy poco rozamiento y un momento de inercia muy pequeño. En la polea se suspenden, en ambos extremos de la cuerda, dos masas diferentes haciendo que el sistema realice un movimiento acelerado.

Para nuestros fines, usaremos este mismo concepto de Atwood, solo que el movimiento de las masas se efectuarán dentro de un fluido, este movimiento se fundamenta principalmente en la aplicación de conceptos básicos de mecánica de fluidos, descrita en el capítulo 1, siendo ésta, el estudio del **flujo alrededor de una esfera sólida y flujo de una película descendente en una superficie cilíndrica**, aplicable al fenómeno de caída de esfera y caída de cilindro respectivamente. El análisis considera que el flujo en estudio, tiene un comportamiento: laminar, permanente y uniforme, el fluido es homogéneo e incompresible, además que sólo se estudiará a flujos hiperconcentrados.

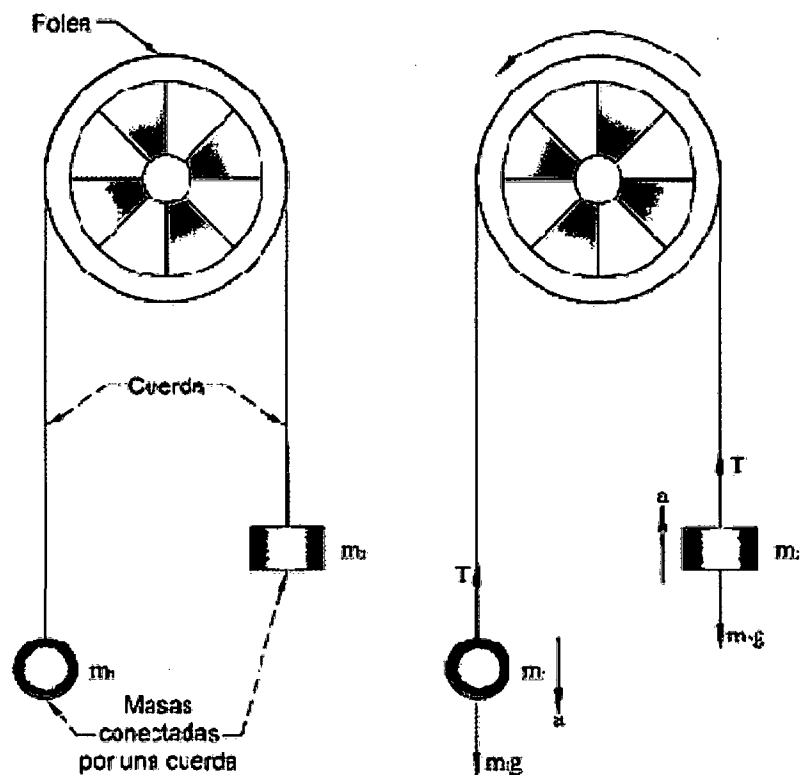
### 2.2.1 Fundamentos básicos

Dentro del desarrollo del prototipo, indicaremos los principios y conceptos en la que se apoya o se fundamenta la funcionalidad del equipo, éstas están dirigida principalmente al concepto de la máquina de Atwood, ley de Stokes – caída de una esfera y caída de un cilindro. Esto no es limitante de poder ampliar otros conceptos o fundamentos aplicables a estos principios.

### Concepto de Atwood

La máquina de Atwood consiste en dos masas,  $m_1$  y  $m_2$ , conectadas por una cuerda inelástica de masa despreciable con una polea ideal de masa también despreciable, tal como se muestra en la Figura 2.9.

Cuando  $m_1 = m_2$ , la máquina está en equilibrio neutral a pesar de la posición de las masas. Cuando  $m_1 > m_2$ , ambas masas experimentan una aceleración uniforme.



Cuando  $m_1 = m_2$ :  
Está en equilibrio

Cuando  $m_1 > m_2$ :  
Movimiento acelerado

FIGURA 2.9 Concepto esquemático de la Máquina de Atwood para el movimiento uniformemente acelerado  
Fuente: Elaboración Propia

Del análisis de fuerzas obtenemos la ecuación para la aceleración, puesto que estamos usando una cuerda inelástica de masa despreciable y una polea ideal de masa despreciable, siendo las únicas fuerzas que tenemos que considerar: la



fuerza de tensión ( $T$ ) y el peso de las dos masas.. Para encontrar la  $\sum F$  tenemos que considerar las fuerzas que afectan a cada masa por separado.

Fuerzas que afectan a  $m_1$ :  $m_1 g - T$

Fuerzas que afectan a  $m_2$ :  $T - m_2 g$

$$\sum F = (m_1 g - T) + (T - m_2 g) = g(m_1 - m_2)$$

Usando la segunda ley de Newton del movimiento podemos obtener una ecuación para la aceleración del sistema.

$$\sum F = ma \Rightarrow a = \frac{\sum F}{m}$$

$$\sum F = g(m_1 - m_2) \quad m = (m_1 + m_2) \Rightarrow a = g \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)}$$

Reemplazando, la tensión resulta:

$$T = 2g \frac{m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)}$$

### Ley de Stokes – caída de una esfera

Partiendo del concepto de la máquina de Atwood, en uno de los extremos de la cuerda se suspende una esfera de radio ( $R$ ) y masa ( $m_1$ ) definida que se encuentra sumergida en un fluido de densidad ( $\rho_m$ ) **cuya viscosidad ( $\mu$ ) se desea conocer**, en el otro extremo, se suspende una masa ( $m_2$ ) que será controlada de acuerdo a los requerimientos del ensayo a efectuar. En la Figura 2.10 se indica la disposición del sistema.

El análisis se centra en caracterizar el movimiento de la esfera dentro de un fluido, por lo que la esfera se desplaza por acción de la fuerza resultante producto de la interacción que en ella se generan. Las fuerzas que interactúan en la esfera son: el peso ( $m_1 g$ ), el empuje ( $E$ , determinado por el principio de Arquímedes y que actúa en oposición al movimiento), la tensión ( $T$ ) generada en la cuerda y la fuerza de rozamiento ( $F_r$ ).

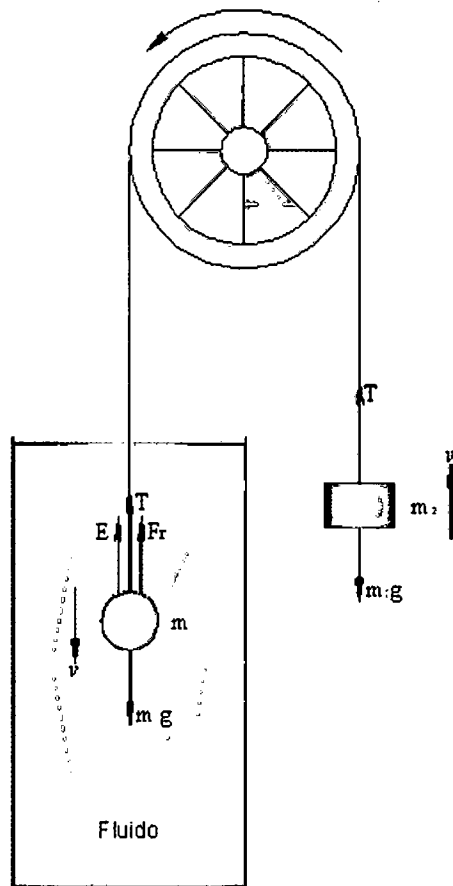


FIGURA 2.10 : Diagrama de Cuerpo libre de la caída de esfera en un medio fluido  
Fuente: Elaboración Propia

La fuerza  $E$ , se determina por el principio de Arquímedes:  $E = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho_m \cdot g \cdot R^3$

La fuerza de rozamiento  $F_r$ , según la ley de Stokes resulta  $F_r = 6 \cdot \pi \cdot R \cdot \mu \cdot v_1$ , siempre que el número de Reynolds sea menor que la unidad ( $Re < 1$ ).

Cuando la masa  $m_1$  cae en el seno de un fluido, alcanza rápidamente una velocidad límite constante ( $v_l$ ) la que se obtiene conociendo su desplazamiento y el tiempo que le toma en efectuar dicho desplazamiento.

Las fuerzas actuantes en el sistema, está compuesta por la interacción de cada uno de sus componentes, vale decir, la esfera de masa  $m_1$ , masa de contrapeso  $m_2$  y la polea de masa  $m_D$ .

Fuerzas actuantes en  $m_1$ :  $m_1 g - T - E - F_r = m_1 \cdot \frac{dv}{dt}$

Fuerzas actuantes en  $m_2$ :  $T - m_2 g = m_2 \cdot \frac{dv}{dt}$

Fuerza actuante en  $m_D$ :  $-F_p = \frac{I}{r^2} \cdot \frac{dv}{dt}$ ; pero  $I = 0.5 \cdot m_D \cdot r^2 \Rightarrow -F_p = 0.5 \cdot m_D \cdot \frac{dv}{dt}$

Sumando las expresiones para el sistema, tenemos:

$$(m_1 - m_2) \cdot g - E - F_p - F_r = (m_1 + m_2 + 0.5 \cdot m_D) \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.18)$$

Haciendo  $M = m_1 + m_2 + 0.5 \cdot m_D$ , reemplazando en la Ec. 2.18

$$(m_1 - m_2) \cdot g - E - F_p - F_r = M \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.19)$$

Haciendo  $F = (m_1 - m_2) \cdot g - E - F_p$ , reemplazando en la Ec. 2.19

$$F - F_r = M \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.20)$$

Cuando la esfera alcance la velocidad límite  $v_l$ , el movimiento se hace uniforme de velocidad constante, es decir la aceleración es cero. Por lo que de la Ec. 2.20, se tendrá:

$$F_r = F = (m_1 - m_2) \cdot g - E - F_p \quad (2.21)$$

De la ecuación del movimiento Ec. 2.20, hacemos  $F_r = K \cdot v$  (condición de flujo reptante para el movimiento de la esfera), donde  $K = 6 \cdot \pi \cdot R \cdot \mu$ . (Ley de Stoke), se tiene:

$$M \frac{dv}{dt} = F - F_r \Rightarrow M \frac{dv}{dt} = F - K \cdot v$$

La ecuación diferencial a resolver, será:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{M} - \frac{K}{M} \cdot v \quad (2.22)$$

$$\int_0^v \frac{dv}{\frac{F}{M} - \frac{K}{M} \cdot v} = \int_0^t dt$$

De la integración, se obtiene la velocidad en función del tiempo:

$$v = v_l \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{K \cdot t}{M}\right)} \right) \quad (2.23)$$

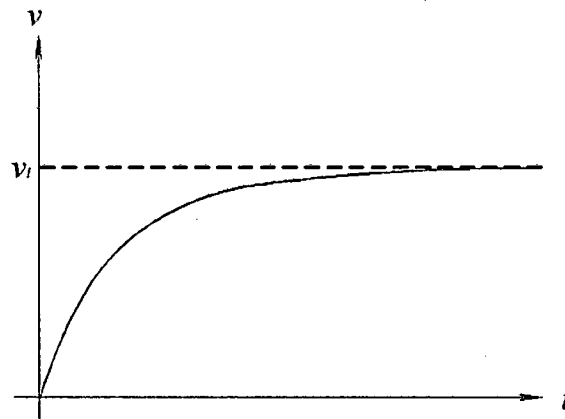


FIGURA 2.11 : Variación de la velocidad

Fuente: Elaboración Propia

También, el desplazamiento respecto al tiempo, será:

$$x = v_l \left( t - \frac{M}{K} \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{K \cdot t}{M}\right)} \right) \right) \quad (2.24)$$

### Caída de varilla dentro de un cilindro

En este caso, continuando con el concepto de Atwood, en uno de los extremos de la cuerda suspendemos una varilla de sección circular de radio ( $kR$ ) y masa ( $m_1$ ) definida, la que se encuentra parcialmente sumergida en un fluido de densidad ( $\rho_m$ ) dentro del cilindro de mayor radio ( $R$ ) que se encuentra fijo. En el extremo inferior de la varilla, se la ha rebajado, dándole forma cónica con la finalidad de que, iniciado el movimiento dentro del fluido las perturbaciones generadas en la transición de la sección sean mínimas y siga manteniendo el régimen laminar. En la Figura 2.12 se presenta un esquema de la disposición del sistema.

Cabe señalar, que para la funcionalidad del sistema por este principio, se debe conseguir que el depósito donde se colocará el fluido debe ser de suficiente volumen capaz de no alterar el nivel inicial del fluido, desde el momento en que se desplaza la varilla de radio ( $kR$ ) dentro del cilindro de mayor radio ( $R$ ), hasta culminar el ensayo, Para esto, el cilindro de mayor radio ( $R$ ) es abierta por ambos lados, es decir trabaja como un tubo abierto por ambos extremos.

Para la obtención de los valores de esfuerzos de corte ( $\tau$ ) y velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), procedemos a calcularlo en función de los criterios ya establecidos, es decir:

$$\tau_R = \frac{\Delta F_f}{2\pi k R \Delta L} \text{ y} \quad (2.25a)$$

$$\dot{\gamma}_R = \frac{v}{R(1-k)} \quad (2.25b)$$

Donde  $\Delta F_f$ , es la fuerza de fricción generada en un intervalo  $\Delta L$  desplazado y  $v$  la velocidad de caída de la varilla de sección circular de radio ( $kR$ ).

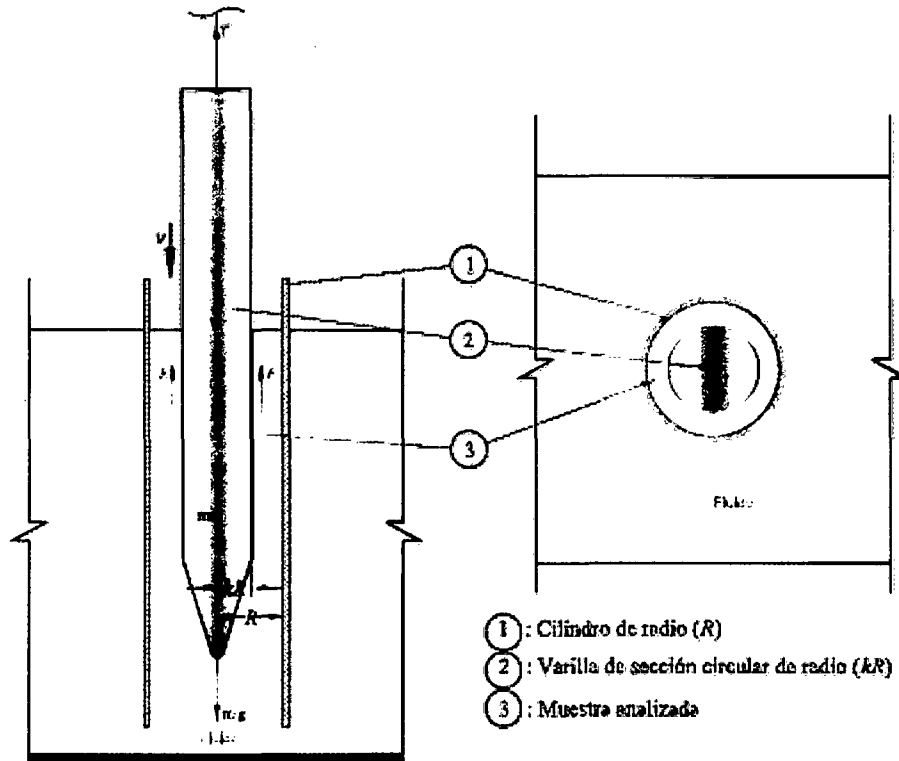


FIGURA 2.12 : Disposición del reómetro de caída de varilla  
Fuente: Elaboración Propia

El planteamiento de la segunda ley de Newton del movimiento, nos permite plantear ecuaciones para la obtención de los valores de la fuerza de fricción  $F_r$ .

De forma similar al caso de la esfera, la ecuación del movimiento para la varilla (cilindro (2)) para cualquier instante  $t$ , será:

$$(m_1 - m_2) \cdot g - E_{(t)} - F_p - F_{r(t)} = (m_1 + m_2 + 0.5m_D) \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.26)$$

De donde:

$$F_{r(t)} = (m_1 - m_2) \cdot g - E_{(t)} - F_p - (m_1 + m_2 + 0.5m_D) \cdot a_{(t)} \quad (2.27)$$

Para el inicio del movimiento, en el instante  $t = 0 \Rightarrow \frac{dv}{dt} = a_{(t=0)} = a_{(0)}$ , reemplazando en la Ec. 2.27 tenemos:

$$F_{r(0)} = (m_1 - m_2) \cdot g - E_{(0)} - F_p - (m_1 + m_2 + 0.5m_D) \cdot a_{(0)} \quad (2.28)$$

En un instante  $t$ , la varilla (2) se ha desplazado  $x_{(t)}$  respecto a su posición inicial y la  $\frac{dv}{dt} = a_{(t)}$ . Para el sector  $x_{(t)}$  desplazado, solo actuarán las fuerzas que resultan de la resta entre las (Ec. 2.27) – (Ec. 2.28):

$$\begin{aligned}(F_{r(t)} - F_{r(0)}) &= -(E_{(t)} - E_{(0)}) - (m_1 + m_2 + 0.5m_D).(a_{(t)} - a_{(0)}) \\ \Delta F_{r(t)} &= -\Delta E_{(t)} - (m_1 + m_2 + 0.5m_D).\Delta a_{(t)}\end{aligned}\quad (2.29)$$

Donde:

$(F_{r(t)} - F_{r(0)}) = \Delta F_{r(t)}$ : Es la fuerza de fricción producida sólo en el intervalo  $x_{(t)}$

$(E_{(t)} - E_{(0)}) = \Delta E_{(t)}$ : Es la fuerza de empuje producida sólo en el intervalo  $x_{(t)}$

$(a_{(t)} - a_{(0)}) = \Delta a_{(t)}$ : Es la aceleración relativa en el instante  $t$ , para la posición  $x_{(t)}$

Para nuestro caso, resulta:  $(E_{(t)} - E_{(0)}) = \Delta E_{(t)} = \rho_m g \cdot Area \cdot x_{(t)} = \rho_m g \cdot \pi \cdot k^2 R^2 \cdot x_{(t)}$ .

Reemplazando en la Ec. 2.29:

$$\Delta F_{r(t)} = -(\rho_m g \cdot \pi \cdot k^2 R^2 \cdot x_{(t)}) - (m_1 + m_2 + 0.5m_D).\Delta a_{(t)}\quad (2.30)$$

Con lo desarrollado  $\Delta F_r$ , en la Ec. 2.30, reemplazamos en la Ec. 2.25 para obtener los valores de  $\tau_R$ , donde el intervalo  $\Delta L = x_{(t)}$  es el desplazamiento.

## 2.2.2 Planteamiento del prototipo

El planteamiento del prototipo, se desarrolla en función de los principios ya establecidos y analizados en el capítulo anterior. Para la construcción del equipo de medición reológica, se plantea estructurarlo de acuerdo a los componentes: cuerpo – estructura, sensor de luz – pulsos, interface – adquisición de datos y procesamiento de datos – PC. Describiremos cada componente:

### Cuerpo – estructura

Es la parte estructural, que actúa como soporte del mecanismo de movimiento que en ella se genera. El mecanismo de movimiento, se basa en el concepto de la máquina de Atwood, la que ha sido adaptada y desarrollada para nuestras necesidades experimentales, en la Figura 2.13 se esquematiza la composición de la estructura.

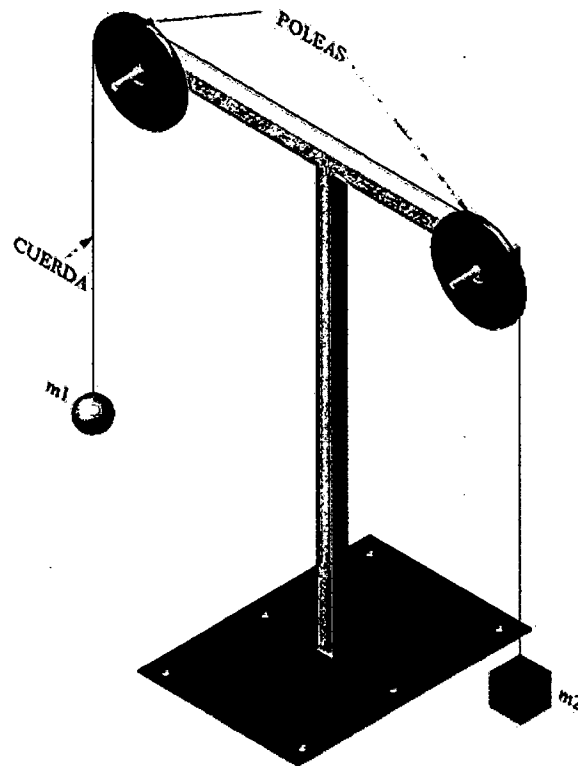


FIGURA 2.13 Esquema de la composición Cuerpo – estructura. Máquina de Atwood  
Fuente: Elaboración Propia



## Sensor de luz – pulsos

Un **sensor o captador**, es un dispositivo (eléctrico – mecánico – químico) diseñado, capaz de recibir información del entorno para convertirla en una medida cuantitativa. En el mercado existe una variedad de sensores que para su elección, dependerá del tipo de información que uno desea obtener y de la funcionalidad del mismo sensor.

El dispositivo diseñado a utilizar, es un **sensor de posición** cuya función es medir el desplazamiento o posición del objeto analizado. Para nuestro caso nos basaremos en el funcionamiento de un **codificador óptico o encoders**. El **codificador óptico o encoders**, es un dispositivo compuesto básicamente por un disco transparente, el cual tiene una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí; además cuenta con un elemento emisor de luz (como un diodo LED) y de un elemento fotosensible (fotorreceptor) que actúa como receptor. El eje cuya posición angular se va a medir va acoplado al disco. En la Figura 2.14 se muestra la composición del codificador óptico o encoders.

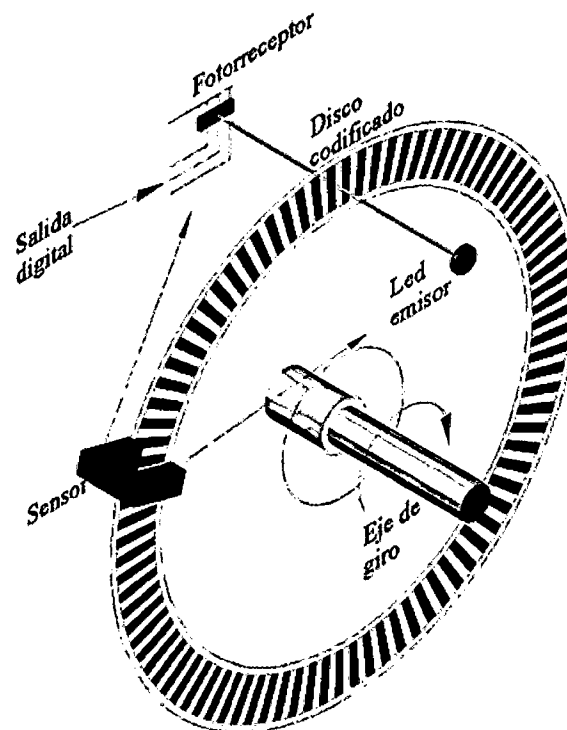


FIGURA 2.14 Esquema de la composición del codificador óptico o encoder

Fuente: Elaboración Propia

Cuando el dispositivo comienza a funcionar, el emisor de luz empieza a emitir continuamente; a medida que el eje vaya girando, se producirán una serie de pulsos de luz en el receptor, que corresponden a la luz que atraviesa los espacios vacíos (translúcidos) entre las marcas del disco. Llevando una cuenta de estos pulsos se determina la rotación del eje, es decir dependiendo del número de marcas que podamos poner físicamente al disco, tendremos una mejor lectura de la velocidad angular.

### **Interface – adquisición de datos**

Generada las pulsaciones de luz que es captada por el receptor del sensor codificador óptico o encoder, se requerirá contabilizar las pulsaciones y el tiempo de duración de las mismas. Para esto se emplea un decodificador, que transforma las pulsaciones de luz a señales analógicas, estas señales analógicas a su vez es almacenada o transmitida a un **microcontrolador PIC**.

El **Microcontrolador PIC**, es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de una computadora. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada, por su reducido tamaño suele ir incorporado en el propio dispositivo al que gobierna, haciendo que por esta característica se le confiere la denominación de "controlador incrustado". Una vez programado y configurado el microcontrolador solamente sirve para gobernar la tarea asignada.

Adquirida la información como señal analógica, esta es almacenada y procesada en el microcontrolador PIC, pero nosotros necesitamos manejar la adquisición de datos a formato digital, es decir a formatos de texto que nos permita visualizar, analizar e interpretar la manifestación física que estamos experimentando. Para esto requerimos realizar la interface entre el microcontrolador y la PC, que nos permita transferir la data del microcontrolador PIC a la computadora (PC), el proceso de transferencia se realiza por transmisión, que para nuestro caso, se efectuará mediante la **comunicación serial** (transmisión de bits uno detrás de otro) y aún más del **modo Half Duplex**, es decir la transmisión de datos es en ambos sentidos, pero no al mismo tiempo.

La **comunicación serial** se establece cuando un dato se transmite bit por bit, para verlo más claro hay que entender primero que las computadoras manejan la

información por bytes, es decir un grupo de bits (8, 16, 32), estos bits son representados con ceros lógicos y unos lógicos. Para lograr la comunicación serial un byte se transmite bit por bit, un cero o un uno, por medio de un canal, que generalmente es un alambre de cobre. Los bits que son transmitidos lo hacen cada determinado tiempo hasta formar un byte. Una comunicación serial pueden ser transmitidos de tres maneras distintas:

**Modo Simple**, la transmisión de datos es de un solo sentido, solo se envía datos del emisor al receptor.

**Modo Half Duplex**, la transmisión de datos se realiza en ambos sentidos, se envían datos del emisor al receptor y viceversa, pero no al mismo tiempo.

**Modo Full Duplex**, donde la transmisión de datos se realiza en ambos sentidos al mismo tiempo, se envían datos tanto como se reciben por dos líneas diferentes.

### Procesamiento de datos – PC

El proceso de la información adquirida se efectúa en la computadora (PC), que para nuestro caso utilizaremos una computadora con procesador Intel Pentium IV.

Para el análisis e interpretación de la información, haremos uso de software que se encuentran disponible y libre, particularmente se utilizarán hoja de cálculo como el Excel, adquisición y procesamiento de datos con LabView.

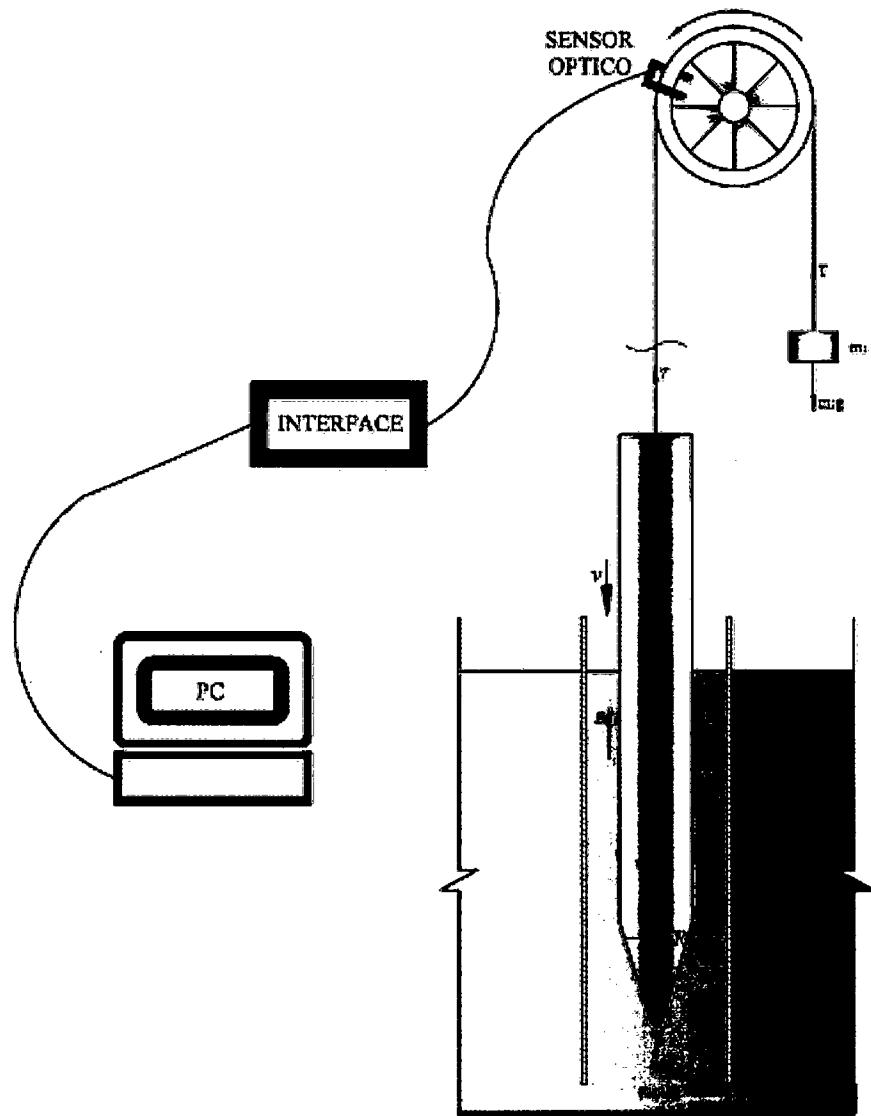


FIGURA 2.15 Esquema del sistema de interface y adquisición de data

Fuente: Elaboración Propia

### 2.2.3 Proceso de construcción del prototipo

El proceso constructivo del prototipo, está enmarcado de acuerdo a los componentes con la que cuenta el equipo de medición reológica.

Los materiales utilizados para la construcción del prototipo, se destacan por ser elementos que han sido adaptados a las necesidades y a la funcionalidad que el equipo debe tener. Se describe el proceso y los materiales utilizados en la etapa de construcción del equipo de acuerdo a sus componentes:

#### Cuerpo – estructura

La estructura en la que se apoyará el mecanismo de movimiento, como ya se ha indicado anteriormente, ha sido adaptada y desarrollada para nuestras necesidades experimentales, por lo que adopta la forma de T con una base de apoyo de sección rectangular. La elaboración, para lo que es la estructura de forma de T, se optó por usar un tubo metálico de sección cuadrada, y para la base de apoyo una plancha metálica.

El mecanismo de movimiento, está compuesta básicamente por: dos poleas, las masas  $m_1$  de forma esférica o varilla de sección circular y  $m_2$ , y una cuerda que conecta las masas  $m_1$  y  $m_2$ .

Las **poleas**, se fabricaron usando como material el acrílico, de 0.80 cm de espesor, la misma que se le ha ranurado en su perímetro. Para el elemento central de giro de la polea, se ha dispuesto de un rodaje que para efectos del movimiento “no presente” fricciones o estas fricciones sean mínimas.

Para la masa  $m_1$  de forma **esférica**, se utilizó esfera de rodaje y esferas de vidrio (canicas), se emplearon estos materiales ya que son de fácil adquisición en el mercado. Para la conectividad de la esfera con la cuerda, se realizó algunos trabajos específicos en la esfera, en especial en la esfera de rodaje, La esfera de rodaje por ser de un material muy duro, es muy dificultoso perforarlo, para ello la esfera pasó un proceso de destemplado con la finalidad de reducir su dureza y poder efectuar la perforación. Efectuada el proceso de destemplado y perforación, se procedió a pulirlo para que la superficie de la esfera mantenga una superficie lisa

Para el caso de la **varilla** de masa  $m_1$ , en uno de sus extremos se le ha rebajado dándole forma cónica, con la finalidad de que la manifestación de turbulencia sea mínima o nula cuando se encuentre en movimiento en el seno de un fluido. Inicialmente la varilla utilizada fue de acero, pero opto por el uso de varilla de aluminio por ser menor peso. Finalmente la varilla es pulida en toda su superficie.

En el otro extremo de la cuerda, se conecta una masa  $m_2$ , que es una canastilla o depósito metálico, que nos permite controlar su masa ya sea incrementándola o reduciéndola.

Para la elección de la **cuerda**, se consideró que este material presente algunas características importantes como: funcionalidad, trabajabilidad, deformación “nula” al ser sometido a cargas de trabajo, diámetro pequeño y que en la interacción cuerda – fluido no se manifiesten reacciones químicas. Por lo que se optó utilizar cuerda de poliamida de 0.25 mm (cordel para pesca)

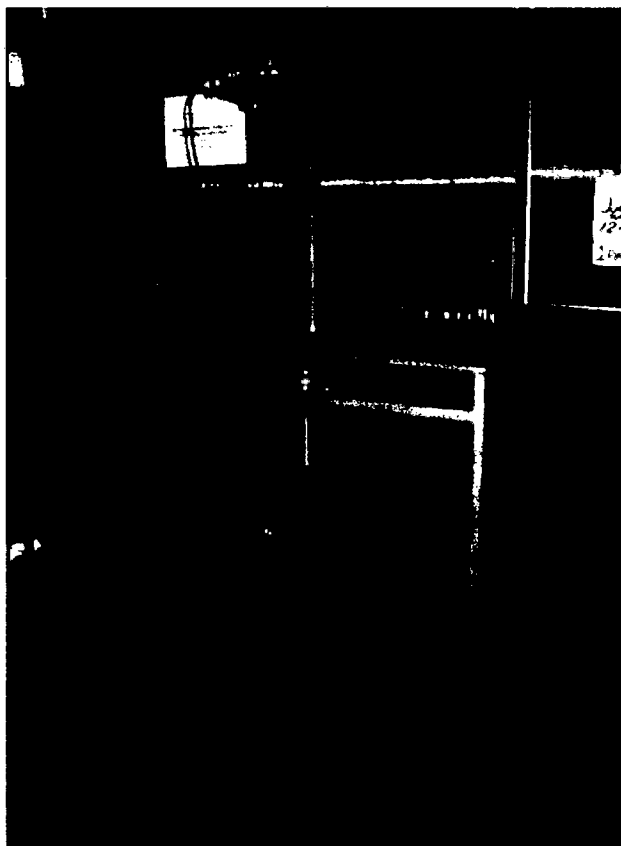


FIGURA 2.16 Prototipo, cuerpo – estructura

Fuente: Elaboración Propia

### Sensor de luz – pulsos

El dispositivo diseñado **codificador óptico o encoders**, cuenta de un disco transparente con marcas colocadas radialmente, un emisor de luz y un elemento fotorreceptor.

Como elemento de **disco**, se utilizó el armazón (policarbonato de plástico) de los CDs, que luego de despintar la capa refractante de aluminio y cobre, su superficie presenta una plataforma transparente. Se efectuaron las marcas radialmente en esta plataforma del CD siguiendo el mismo proceso de serigrafiado. Se probaron para dos tipos de marcas, la primera equidistante cada  $2^\circ$  y la segunda equidistante cada  $4^\circ$ .

Para los elementos **emisor de luz y receptor**, se optó por uno convencional que existe en el mercado, es decir un diodo LED y un fotorreceptor respectivamente.

Este dispositivo del codificador óptico o encoder, va acoplado a la polea para determinar su velocidad angular.

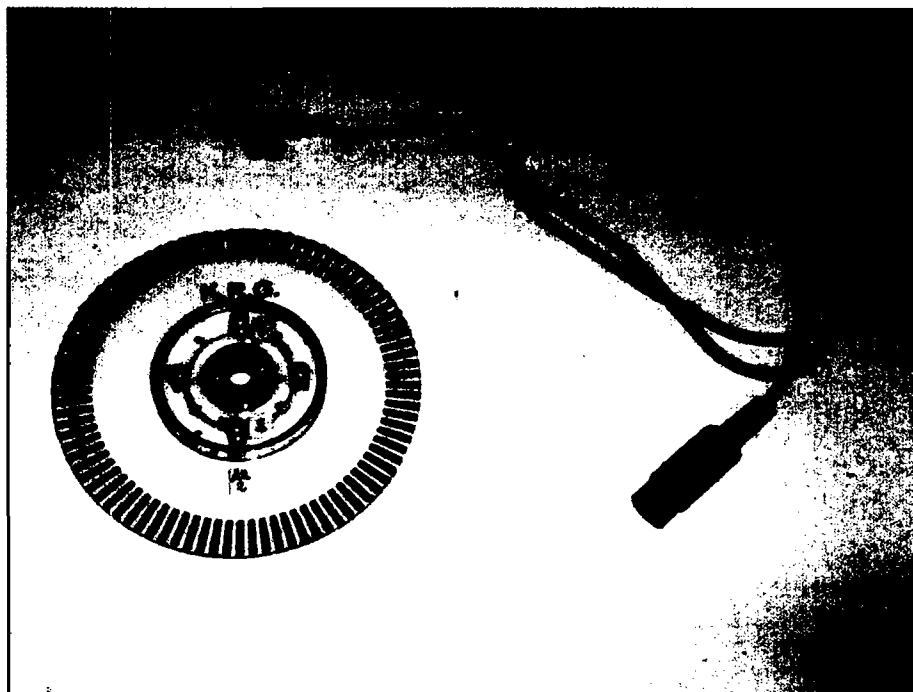


FIGURA 2.17 Composición del acople de la polea y el encoder

Fuente: Elaboración Propia

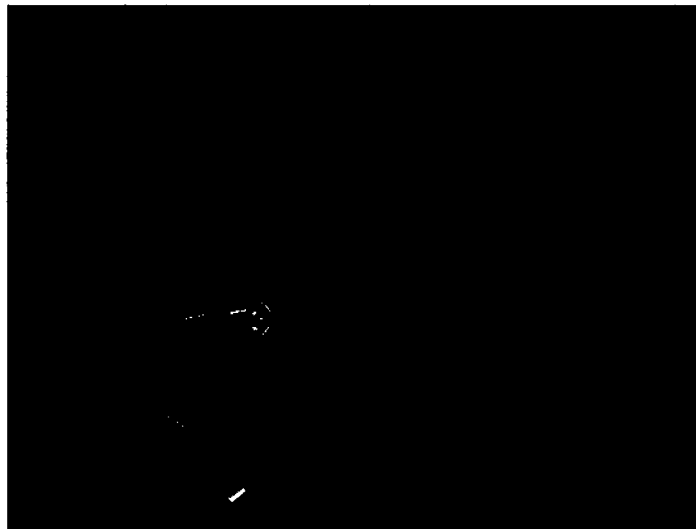
### Interface – adquisición de datos

El equipo de interface, está conformada básicamente por un decodificador y un microcontrolador PIC, cuya comunicación con la PC se efectúa por medio de un puerto serial.

El equipo físico, consta de una tarjeta en la que se encuentran los circuitos de entrada/salidas y los periféricos. Se le ha confeccionado una caja metálica donde en ella se encuentran instalada la tarjeta.



(a)



(b)

FIGURA 2.18 Dispositivo Interface – adquisición de datos  
Fuente: Elaboración Propia



## 2.3 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El proceso de calibración del equipo instrumental, se apoya fundamentalmente en los principios básicos de su diseño, vale decir en los principios de la mecánica clásica. Para ello, recurriremos a determinar el valor de la magnitud analizada con la finalidad de obtener una aproximación, correlación o una relación de las magnitudes fundamentales o las magnitudes derivadas, según sea el caso. Estos valores obtenidos (por medio de un experimento físico) serán comparados con los valores del patrón de medida y con los valores de algunas constantes físicas conocidas.

De acuerdo a las leyes del movimiento, en la que se fundamenta el diseño del equipo, es que usaremos las magnitudes que mejor se adecuen a nuestro análisis para ser comparadas con el patrón de medida, lo que nos permite hacer los ajustes respectivos a los valores de las magnitudes de masa, aceleración y velocidad angular (son las magnitudes asignadas por el investigador), que para esta investigación son las señaladas anteriormente.

### 2.3.1 Patrón de medida

Para este caso en particular, se ha optado trabajar con tres magnitudes de patrón de medida conocida. Estas magnitudes son fundamentalmente la masa, que la obtenemos de forma indirecta haciendo uso de una balanza electrónica, la otra magnitud está dada por la aceleración (se hará uso de la constante física de la gravedad) y la magnitud de la velocidad angular.

### 2.3.2 Ajuste en la masa

La medición de la masa, lo obtendremos de forma indirecta, para la cual recurrimos al uso de una balanza electrónica. Las balanzas electrónicas son instrumentos de pesaje que dependen del valor de la aceleración de la gravedad y este a su vez de la ubicación geográfica del lugar de medición.

Como es sabido, la **masa** es una propiedad física de los cuerpos que está relacionada con el número de partículas que lo conforman. La masa es independiente del lugar en que se encuentre, es decir, mide lo mismo en cualquier parte de la tierra o espacio.

En nuestro caso la balanza utilizada es una Tipo EXCELL BH – 3000, con precisión al +/- 0.1g, esta balanza electrónica esta calibrada en base a la Norma Metrológica Peruana NMP 004 INDECOPI.

CUADRO 2.1  
VALORES DE LA ACELERACION DE LA GRAVEDAD PARA ALGUNAS  
CIUDADES DEL PERU

Lugar	Latitud	Altura	Gravedad local (m/s <sup>2</sup> )
Tumbes	3°07'	7	9.7804
Iquitos	3°44'	106	9.7802
Piura	5°12'	29	9.7807
Tarapoto	6°31'	333	9.7800
Chiclayo	6°46'	27	9.7810
Cajamarca	7°10'	2750	9.7726
Trujillo	8°07'	34	9.7812
Chimbote	9°04'	35	9.7815
Huaraz	9°30'	3052	9.7723
Huanuco	9°55'	1894	9.7760
Cerro de Pasco	10°40'	4338	9.7687
La Oroya	11°31'	3745	9.7708
Indecopi (Lima)	12°05'	158	9.7826
Abancay	12°38'	2378	9.7754
Huancavelica	12°47'	3660	9.7716
Ayacucho	13°09'	2746	9.7723
Cusco	14°02'	3399	9.7729
Ica	14°04'	406	9.7821
Juliaca	15°30'	3824	9.7722
Puno	15°48'	3827	9.7723
Arequipa	16°25'	2335	9.7763
Mollendo	17°02'	26	9.7847
Ilo	17°38'	3	9.7850
Tacna	18°01'	562	9.7835

Fuente: Elaboración Propia

### 2.3.3 Ajuste en la aceleración

Para el ajuste de la aceleración, se realizaron experimentos físicos basados en el movimiento del sistema de poleas en la máquina de Atwood. El planteamiento de la ecuación del movimiento se fundamenta principalmente en la 2da ley de Newton. El diagrama de cuerpo libre con movimiento acelerado del sistema de polea, permite determinar las fuerzas actuantes.

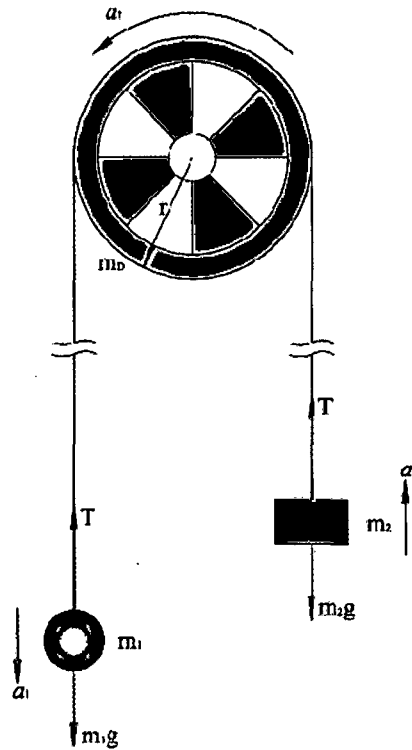


FIGURA 2.19 Diagrama de Cuerpo libre del sistema  
Fuente: Elaboración Propia

Fuerzas actuantes en  $m_1$ :  $m_1 g - T = m_1 \cdot a_1$

Fuerzas actuantes en  $m_2$ :  $T - m_2 g = m_2 \cdot a_1$

Fuerzas actuantes en  $m_D$ :  $-F_p = \frac{I}{r^2} \cdot a_1$ ; pero  $I = 0.5 \cdot m_D \cdot r^2 \Rightarrow -F_p = 0.5 \cdot m_D \cdot a_1$

Sumando las expresiones para el sistema, tenemos:

$$(m_1 - m_2) \cdot g - F_p = (m_1 + m_2 + 0.5 \cdot m_D) \cdot a_1 \quad (2.31)$$

Haciendo  $M = m_1 + m_2 + 0.5 \cdot m_D$ , reemplazando en la Ec. 2.31

$$M \cdot a_1 = (m_1 - m_2) \cdot g - F_p \quad (2.32)$$

En la Ec. 2.32, podemos hacer el cambio de variable  $Y = M \cdot a_1$  y  $X = (m_1 - m_2)$ , donde la expresión quedaría como:

$$Y = X \cdot g - F_p \quad (2.33)$$

Esto nos permite determinar experimentalmente los valores de  $g$  y  $F_p$ , ya que para la expresión (Ec. 2.33)  $g$  viene a ser la pendiente de la curva y  $F_p$  el intercepto.

Cada ensayo físico, cuenta con una data registrada por el equipo instrumental, cuya información es procesada de acuerdo a lo planteado en la Ec.2.3-2. Con esta información procesada, se hace la representación gráfica tal como se indica en la Figura 2.20a y Figura 2.20b. De la Ec 2.3-3, el valor de la aceleración de la gravedad  $g$ , se determina por la pendiente de la curva, por lo que experimentalmente (Figura 2.20a y Figura 2.20b) debe ser cotejado con el valor de la aceleración de la gravedad para la ciudad de Lima como se indica en el Cuadro 2.1. Para la obtención de la aceleración "real", se le afectará a la aceleración experimental por un factor de ajuste al que denominaremos coeficiente de ajuste  $C_{av}$ , cuyo valor se obtiene comparando las pendientes teórico y experimental. Conocido el ajuste, consecuentemente se obtiene el valor de la fricción en la polea ( $F_p$ ). En el Cuadro 2.2 se indica el valor de  $C_{av}$  y  $F_p$  de la polea.

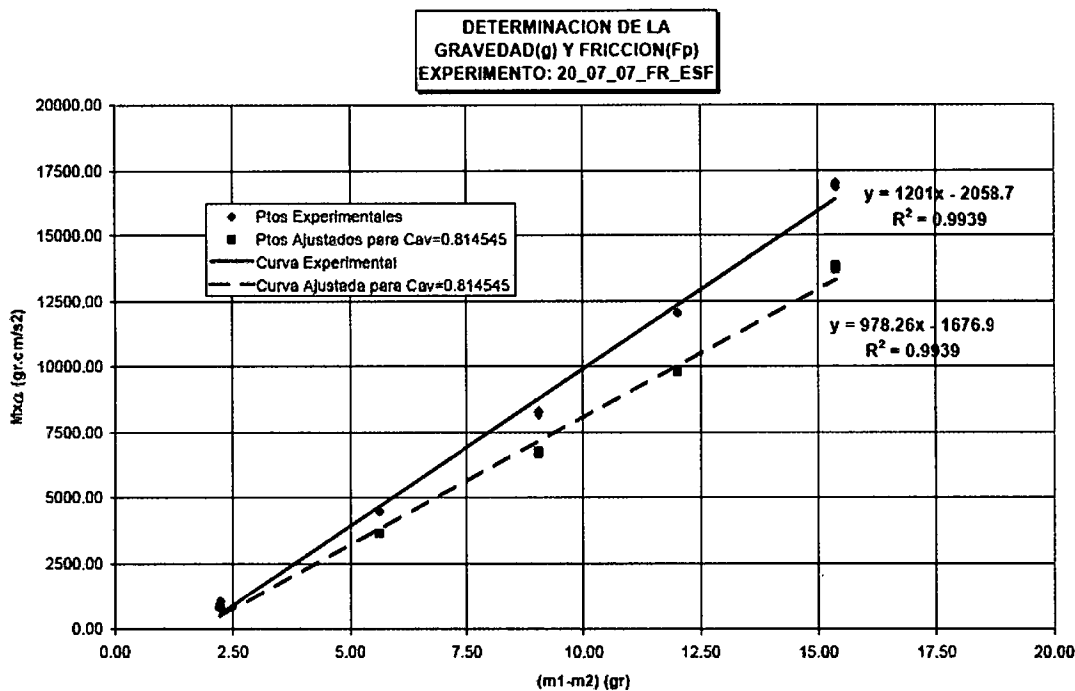


FIGURA 2.20a: Ajuste de la aceleración para el experimento 20\_07\_07\_FR\_ESF  
Fuente: Elaboración Propia

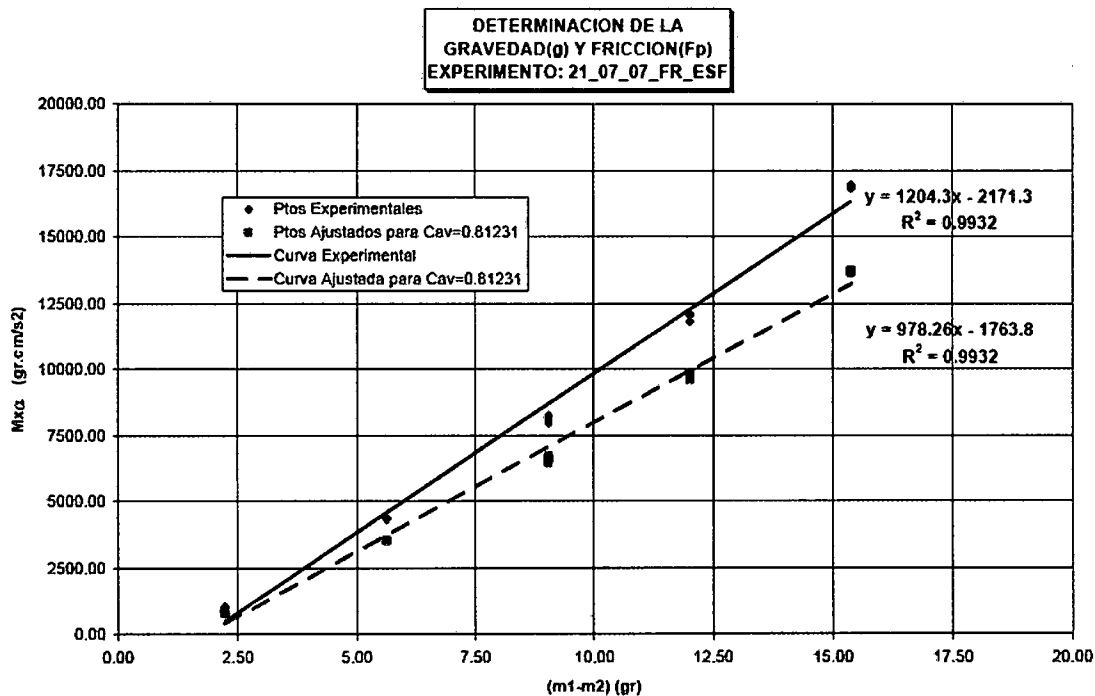


FIGURA 2.20b: Ajuste de la aceleración para el experimento 20\_07\_07\_FR\_ESF  
Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 2.2

COEFICIENTE DE AJUSTE(  $C_{av}$ ) Y FRICCIÓN DE LA POLEA (  $F_p$  )

Nº	EXPERIMENTO	$C_{av}$	$F_p$ (gr-cm/s <sup>2</sup> )
1	20_07_FR_ESF	0.81455	1676.90
2	21_07_FR_ESF	0.81231	1763.80
<b>PROM.</b>		<b>0.81343</b>	<b>1720.35</b>
DESV.		0.00158	61.45
PORCENTAJE (DESV./PROM.)		0.19%	3.57%

Fuente: Elaboración Propia

La calibración del instrumental, se efectúa al inicio de la experimentación. El proceso dependerá del modo de funcionamiento del equipo que interactuará con la muestra (fluido), vale decir, obtener las fuerzas de fricción que se generan en el equipo sin la muestra propiamente dicho y después ensayar con la muestra. Con esto se busca cuantificar la fuerza de rozamiento que se generan en el equipo, para luego en el experimento propiamente dicho (ensayo con la muestra) poder obtener la fricción que se genera en el fluido.

En el funcionamiento del equipo, no solo actúa la fuerza de fricción de la polea, también la fricción que se genera entre la masa  $m_1$  y el anillo perimétrico. Este anillo perimétrico sirve de "apoyo" a la masa  $m_1$  para mantener la verticalidad de dicha masa, por lo que en el contacto entre ellas se manifiestan fuerzas de fricción. Dicho esto, en la Ec.2.32, se debe agregar la fuerza de fricción entre la masa  $m_1$  y el anillo que la denotaremos como  $F_a$ . Tendremos:

$$M.a_t = (m_1 - m_2).g - F_p - F_a$$

Agrupando, podemos hacer  $F_{pa} = F_p + F_a$ , la expresión quedará:

$$M.a_t = (m_1 - m_2).g - F_{pa} \quad (2.34)$$

Donde  $F_{pa}$  es la fuerza de fricción generada en la polea y en el contacto de la masa  $m_1$  y el anillo. De este modo la Ec. 2.34 es similar a la Ec. 2.32, por lo que permite analizarlo de la forma que se ha descrito en párrafos anteriores.

Para los experimentos realizados, en este caso  $m_1$  (varilla de aluminio) que está en contacto con el anillo perimétrico, y siguiendo el procedimiento ya señalado,

se procedió a determinar valores del coeficiente de ajuste para la aceleración  $C_{av}$  y la fuerza de fricción  $F_{pa}$ . Los resultados de los ensayos experimentales, para la obtención de los valores  $C_{av}$  y  $F_{pa}$ , en forma resumida se encuentran representados en la Figura 2.21. En el Cuadro 2.3, se encuentran los valores que se adoptaran para los cálculos respectivos de la investigación.

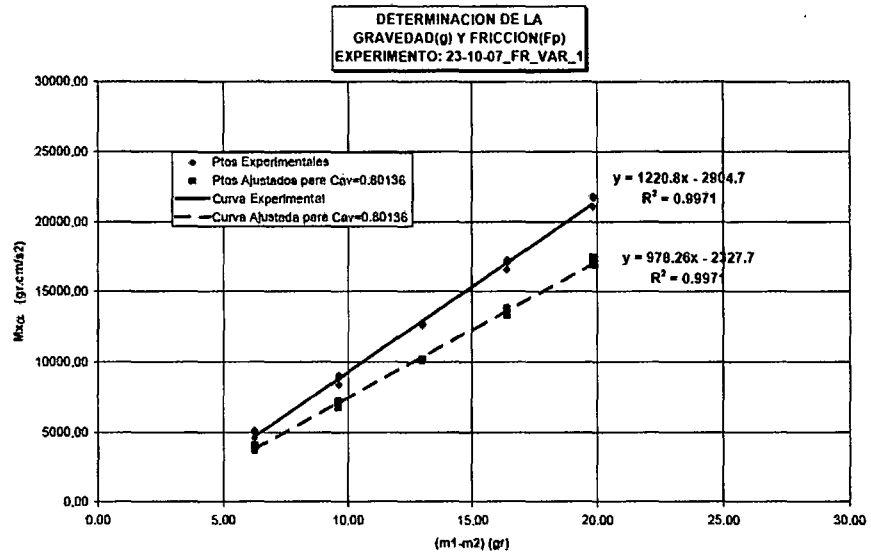


FIGURA 2.21a .Ajuste varilla – anillo, para 23-10-07\_FR\_VAR\_1

Fuente: Elaboración Propia

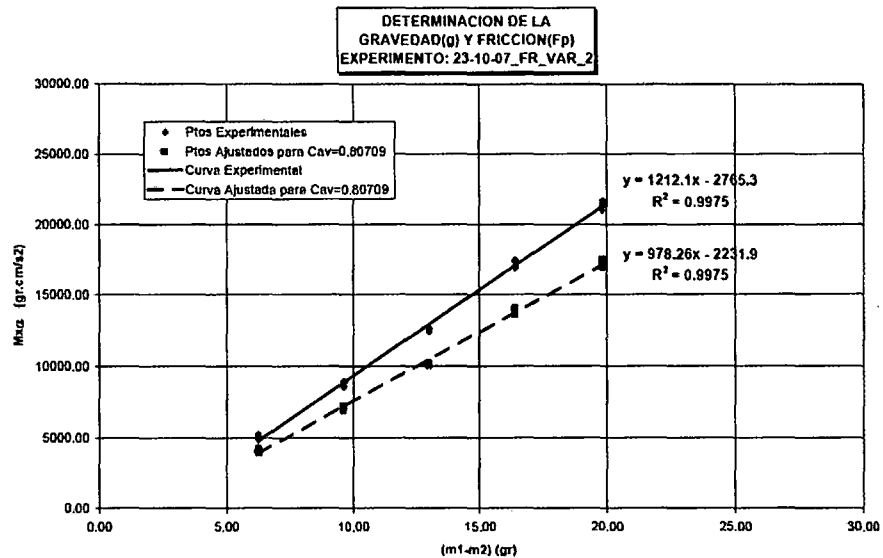


FIGURA 2.21b .Ajuste varilla – anillo, para 23-10-07\_FR\_VAR\_2

Fuente: Elaboración Propia

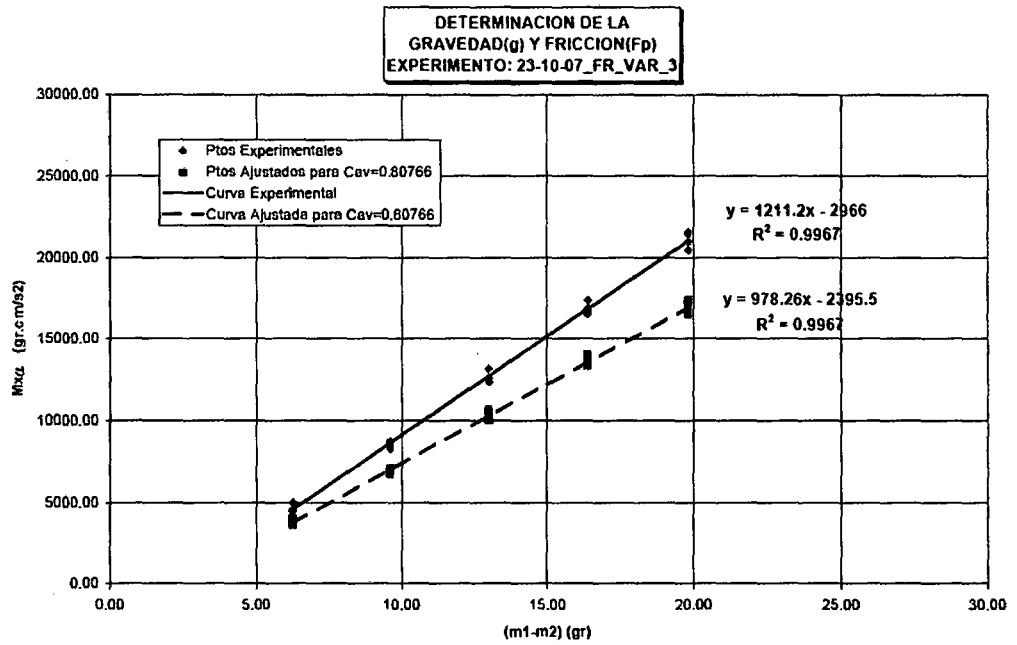


FIGURA 2.21c .Ajuste varilla – anillo, para 23-10-07\_FR\_VAR\_3  
 Fuente: Elaboración Propia

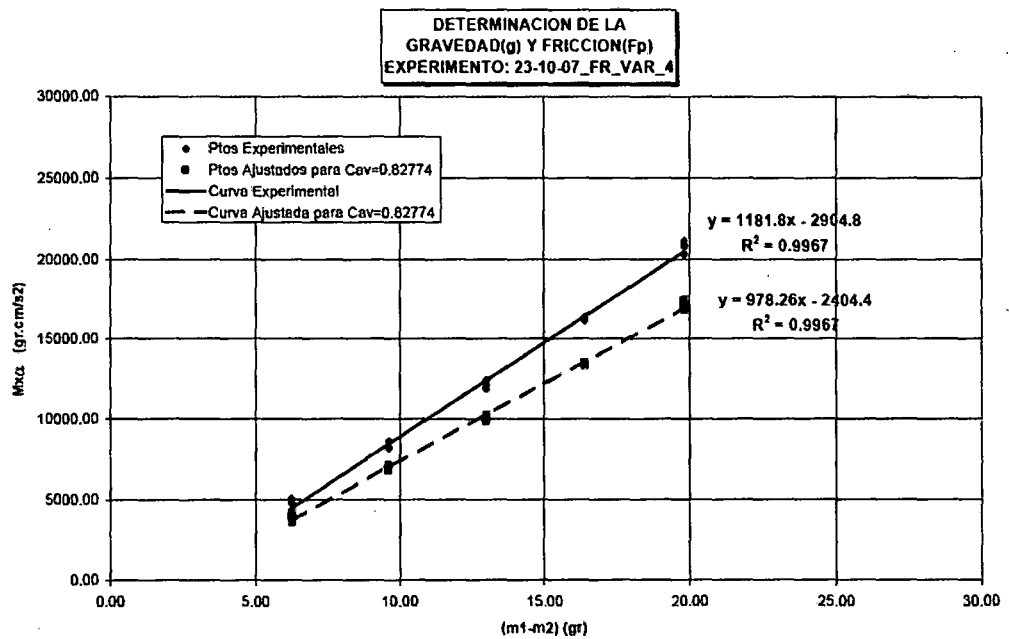


FIGURA 2.21d .Ajuste varilla – anillo, para 23-10-07\_FR\_VAR\_4  
 Fuente: Elaboración Propia



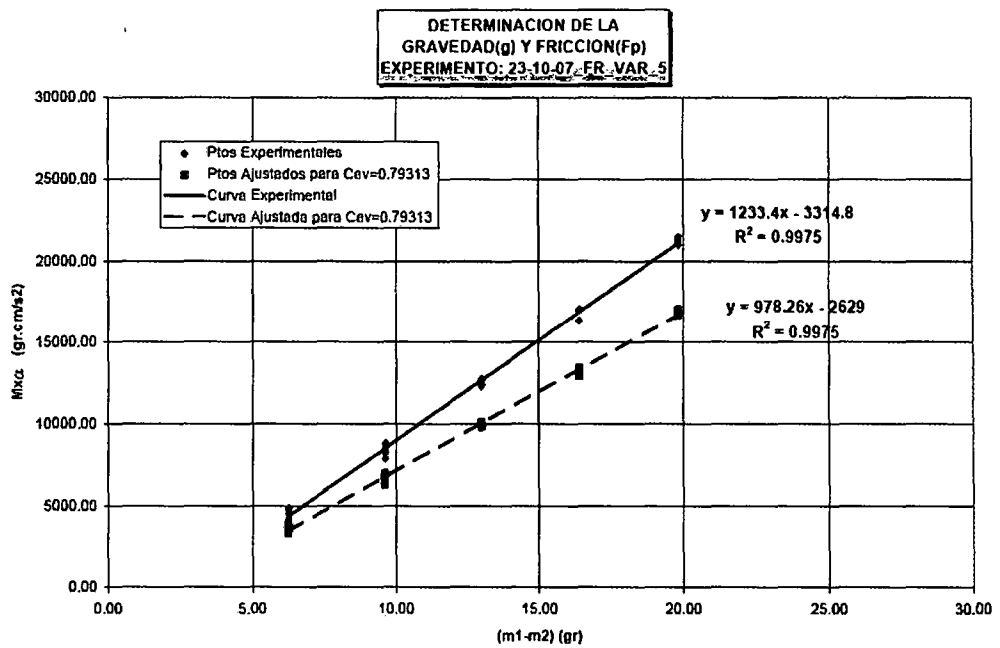


FIGURA 2.21e .Ajuste varilla – anillo, para 23-10-07\_FR\_VAR\_5

Fuente: Elaboración Propia

### CUADRO 2.3

COEFICIENTE DE AJUSTE( $C_{av}$ ) Y FRICCIÓN POLEA-VARILLA-ANILLO( $F_{pa}$ )

Nº	EXPERIMENTO	$C_{av}$	$F_{pa}$ (gr-cm/s <sup>2</sup> )
1	FRICCION23-10-07_FR_VAR_1	0.80136	2327.70
2	FRICCION23-10-07_FR_VAR_2	0.80709	2231.90
3	FRICCION23-10-07_FR_VAR_3	0.80766	2395.50
4	FRICCION23-10-07_FR_VAR_4	0.82774	2404.40
5	FRICCION23-10-07_FR_VAR_5	0.79313	2629.00
<b>PROM.</b>		<b>0.80740</b>	<b>2397.70</b>
<b>DESV.</b>		<b>0.01279</b>	<b>146.58</b>
<b>PORCENTAJE (DESV./PROM.)</b>		<b>1.58%</b>	<b>6.11%</b>

Fuente: Elaboración Propia

Los valores del coeficiente de ajuste de la aceleración  $C_{av}=0.80740$  y la fricción  $F_{pa}=2397.70$  gr-cm/s<sup>2</sup>, serán de utilidad para la determinación de los parámetros reológicos cuando se experimente con la muestra propiamente dicha.

#### 2.3.4 Ajuste en la velocidad angular

Otra de las magnitudes que interviene en el análisis para el cálculo de las propiedades reológicas, es la velocidad angular. El modo de obtención de la data, es encuentra registrada en “pulsos” y su respectivo “periodo”, donde cada

“pulso” corresponde al barrido de 4° en el disco del encoders, y el “periodo” correspondiente al tiempo que le toma en barrer dicho “pulso”.

Con la finalidad de minimizar la distorsión en el barrido de 4°, es que inicialmente los barridos registrados corresponden a 2° las mismas que han sido agrupadas de a dos, con ello se “elimina” la distorsión en el barrido del ángulo.

Para el registro del “periodo” de cada “pulso”, el dispositivo cuenta con un temporizador que capta el “periodo” en el orden de los 0.200 milisegundos como mínimo y un máximo de 180 milisegundos.

Las pulsaciones registradas a través del acople del encoders al eje de un motor eléctrico, fueron comparadas con las revoluciones del mismo motor eléctrico (de acuerdo al fabricante es de 240 rpm) que se contabilizaron con un cronómetro. En el Cuadro 2.4 se indica las revoluciones registradas con el encoders y las revoluciones registradas con un cronómetro.

CUADRO 2.4  
 COEFICIENTE DE AJUSTE PARA LA VELOCIDAD ANGULAR

TIEMPO (seg.)	REVOLUC. (rev.)	MEDIDO CON:	
		CRONÓMETRO (rpm)	ENCODERS (rpm)
4.72	20	254.23729	270.38943
4.84	20	247.93384	270.72080
4.90	20	244.89796	270.15540
4.97	20	241.44869	270.24615
12.28	50	244.29967	270.14723
12.12	50	247.52475	270.11605
<b>PROM.</b>		<b>246.72371</b>	<b>270.29584</b>
<b>DESV.</b>		<b>4.37253</b>	<b>0.23063</b>
<b>COEFICIENTE DE AJUSTE <math>C_{aw}</math></b>		<b>0.91279</b>	

Fuente: Elaboración Propia

El coeficiente de ajuste para la velocidad angular  $C_{aw} = 0.91279$ , fue determinado comparando los valores promedios de las mediciones realizadas con un cronómetro y el encoders del dispositivo, para la cual se hizo uso de un motor eléctrico con rpm “conocido” dado por el fabricante.

## 2.4 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

Siempre que se pretenda caracterizar reológicamente a un fluido, se requiere cuantificar, determinar en base a sus propiedades físicas, los parámetros físicos y reológicos.

En esta parte de la investigación, se describe el proceso de obtención de los parámetros utilizados para la caracterización reológica. En algunos casos el proceso es sencillo y rápido, mientras que en otros casos el proceso es lento, tedioso, laborioso.

Los parámetros que describiremos, son los más representativos para la caracterización de una muestra, que a su vez están condicionadas por el investigador. Esto no inhibe que para otras condiciones diferentes a la estudiada, existan otros parámetros físicos adicionales que modifican la caracterización reológica y en consecuencia los parámetros reológicos.

### 2.4.1 Medida de la densidad ( $\rho_m$ )

Para la determinación de la densidad de la muestra ( $\rho_m$ ), se procedió primeramente tomando las muestras en recipientes de 1 litro de capacidad, las que fueron identificadas con etiquetas impregnadas en el recipiente. Las muestras tomadas, representan una porción de la muestra total que se empleó en el experimento final. Cada toma de muestra difiere en su concentración, ya que el experimento se efectuó para diferentes concentraciones, por lo que las densidades también serán diferentes.

La obtención de la densidad de estas muestras, fueron relativamente sencillas, simplemente se procedió a pesarlas con una balanza electrónica para determinar su masa, luego determinar su volumen haciendo uso de una probeta graduada. Conociendo el volumen y la masa, fácilmente se determina la densidad.

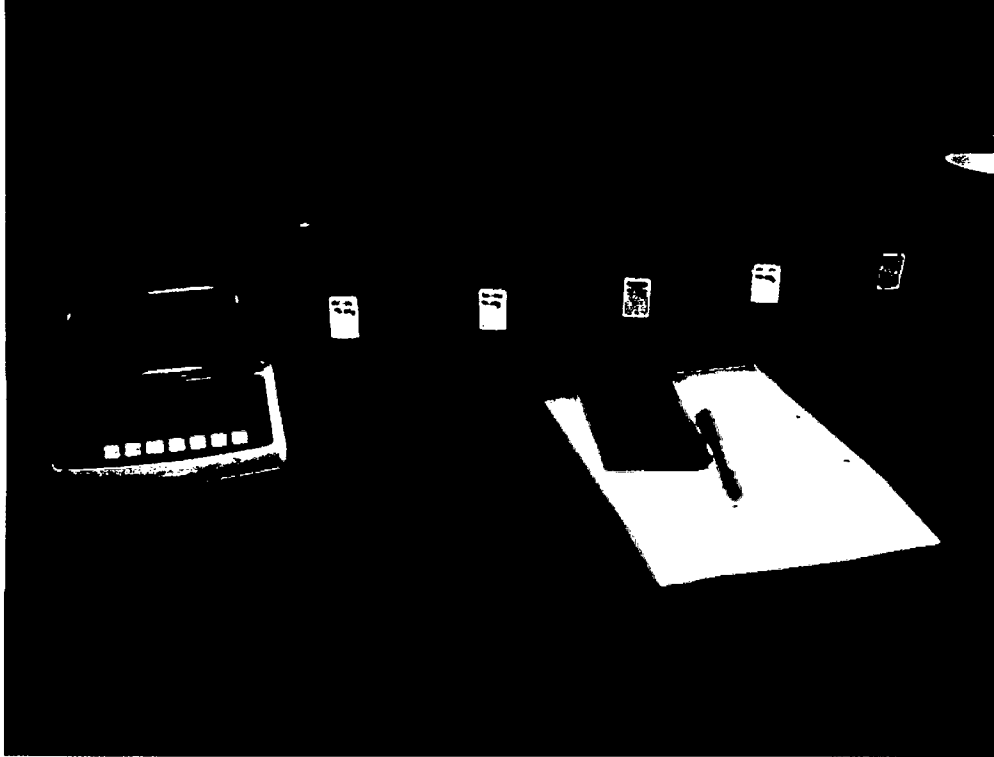


FIGURA 2.22 Toma de muestra para determinar la densidad.

Fuente: Elaboración Propia

Para la obtención de la densidad de sólidos ( $\rho_s$ ), se procedió siguiendo la norma ASTM 854 para la determinación de la gravedad específica, es decir por el método del picnómetro. De los ensayos efectuados (Anexo I), se ha tomado el valor promedio de  $\rho_s = 3.66 \text{ gr/cc}$

#### 2.4.2 Medida de la concentración ( $C_w$ y $C_v$ )

Las relaciones estudiadas en el capítulo anterior para la determinar la concentración, están en términos de la densidad de la muestra ( $\rho_m$ ) y densidad de sólidos ( $\rho_s$ ), especialmente para el cálculo de la concentración volumétrica ( $C_v$ ), tal como se indica en la Ec.1.20. Para la determinación de la concentración en peso ( $C_w$ ), se efectuó tomando 150gr aproximadamente de muestra (fluido) en un recipiente metálico, la misma que fueron pesadas para posteriormente ser secada en el horno para así tener el peso de la masa sólida y compararla con el peso de la muestra (fluido) inicial.

Para los experimentos (abreviado EXP) realizados, se trabajaron con 10 (diez) concentraciones diferentes, las que se muestran a continuación.

CUADRO 2.5a  
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	EXP1	EXP2	EXP3	EXP4	EXP5
Densidad de sólidos $\rho_s$	g/cc	3.66				
Densidad de la muestra $\rho_m$	g/cc	2.31	2.28	2.25	2.15	2.16
Concentración en Peso $C_w$	%	79.01	77.51	76.91	74.50	74.41
Concentración en Vol. $C_v$	%	49.88	48.39	47.37	43.73	43.95

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 2.5b

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	EXP6	EXP7	EXP8	EXP9	EXP10
Densidad de sólidos $\rho_s$	g/cc	3.66				
Densidad de la muestra $\rho_m$	g/cc	2.09	2.01	1.94	1.83	1.80
Concentración en Peso $C_w$	%	73.26	70.87	67.54	65.17	63.37
Concentración en Vol. $C_v$	%	41.93	38.91	35.80	32.65	31.10

Fuente: Elaboración Propia

### 2.4.3 Medida del Esfuerzo de Corte

Para determinar el esfuerzo de corte, se recurrió a utilizar la expresión de la Ec. 2.25 referida a  $\tau_R$ , pero esta expresión requiere del cálculo previo de la  $\Delta F_r$  que es la fuerza de fricción entre la muestra y la superficie de la varilla en el intervalo  $\Delta L$  desplazado en la vertical. Se tiene:

$$\tau_R = \frac{\Delta F_r}{2\pi k R \Delta L}$$

La fuerza  $\Delta F_r$ , se obtendrá partiendo de la Ec. 2.27 que se indica:

$$F_{r(t)} = (m_1 - m_2) \cdot g - E_{(t)} - (m_1 + m_2) \cdot a_{(t)}$$

En la Ec. 2.27, no intervienen la masa de la polea  $m_D$  ni la fuerza de fricción en la polea y la varilla  $F_{pa}$ , por lo que dicha ecuación tendrá que ser ampliada de la siguiente manera:

$$F_{r(t)} = (m_1 - m_2) \cdot g - (m_1 + m_2 + 0.5m_D) \cdot a_{(t)} - E_{(t)} - F_{pa} \quad (2.35)$$

El diagrama de cuerpo libre de la varilla se muestra en la Figura 2.23.

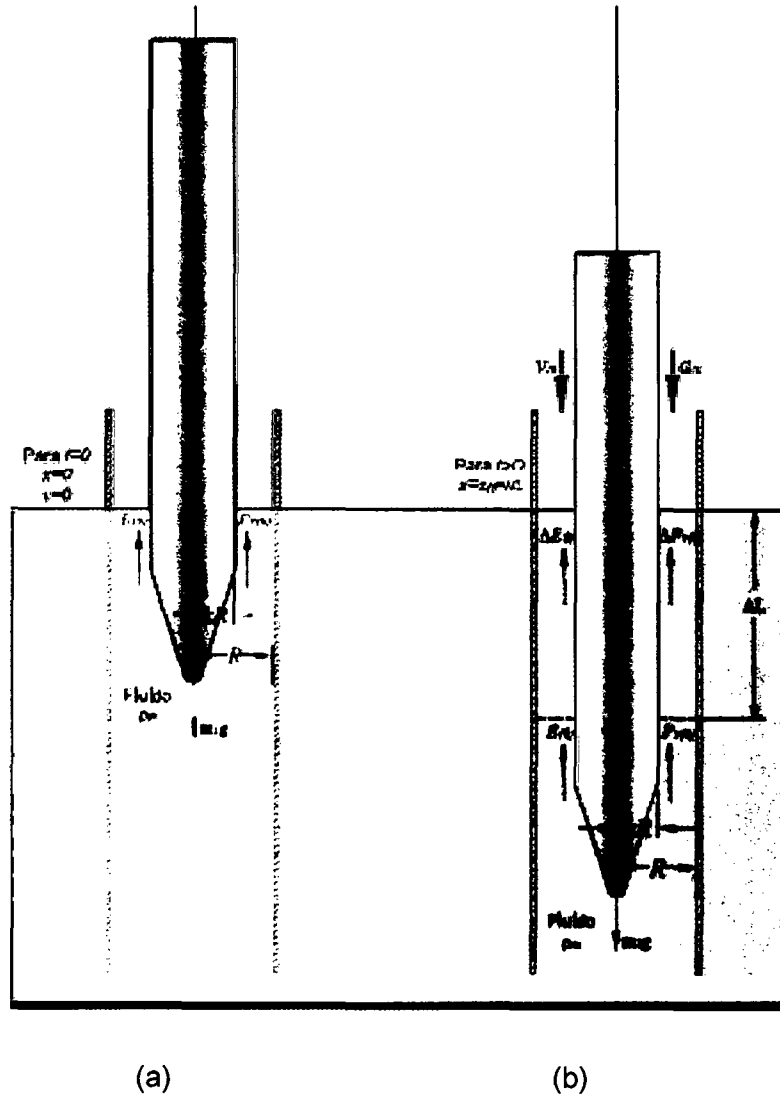


FIGURA 2.23 (a) antes de iniciación del movimiento y (b) en movimiento.

Fuente: Elaboración Propia

Para  $t = 0$ , antes de iniciar el movimiento, existen fuerzas de rozamiento entre la varilla – muestra (fluido)  $F_{r(0)}$  y la fuerza de empuje antes de iniciar el movimiento  $E_{(0)}$ , por lo que  $E_{(0)} = g \cdot \rho_m \cdot \nabla_0$ , siendo  $\nabla_0$  el volumen sumergido.

para  $t > 0$  (iniciación del movimiento), la Ec. 2.35 será:

$$\Delta F_{r(t)} + F_{r(0)} = (m_1 - m_2) \cdot g - (m_1 + m_2 + 0.5m_D) \cdot a_{(t)} - \Delta E_{(t)} - E_{(0)} - F_{pa}$$

Puesto que la mayor incidencia antes de iniciar el movimiento ( $t = 0$ ) es  $E_{(0)}$ ,  $F_{r(0)}$  es despreciable, por lo que la expresión quedara:

$$\Delta F_{r(t)} = (m_1 - m_2) \cdot g - (m_1 + m_2 + 0.5m_D) \cdot a_{(t)} - \Delta E_{(t)} - E_{(0)} - F_{pa} \quad (2.36)$$

Con la Ec.2.36 se obtiene  $\Delta F_r$ , y esto nos permite determinar  $\tau_R$ , ya que  $kR$  es el radio de la varilla y  $\Delta L$  es el desplazamiento vertical.

#### 2.4.4 Medida de la Gradiente de Velocidad, Velocidad de deformación Angular ( $\dot{\gamma}_R$ )

Del mismo modo, en la Ec. 2.25 referida a la velocidad de deformación  $\dot{\gamma}_R$ , se obtiene determinando la velocidad. El sensor (encoders) registra el movimiento de la varilla, teniendo así velocidades instantáneas mientras dure el experimento. Siendo  $R$  el radio del cilindro (tubo de vidrio) concéntrico a la varilla por donde ésta última se desplaza. Para el cálculo, se tiene:

$$\dot{\gamma}_R = \frac{v}{R(1-k)} \quad (2.37)$$

#### 2.4.5 Medida del Esfuerzo de Cedencia ( $\tau_y$ )

Su determinación, es producto del procesamiento de la información representada en un reograma, es decir de la gráfica esfuerzo de corte  $\tau$  vs velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ . Para la experimentación realizada, se obtiene al extender una recta tangente a la curva generada en el reograma que intercepte al eje de esfuerzos de corte, todo esto en las proximidades de iniciación del movimiento. Esta forma de obtención del esfuerzo de cedencia, se debe a que en las proximidades de iniciación del movimiento es complicado determinar cuál es el esfuerzo mínimo que generó el movimiento de la muestra (fluido), pero si se puede estimar dentro de las proximidades de iniciación del movimiento.

#### 2.4.6 Medida de la Viscosidad ( $\mu$ )

Como ya se explicó en el capítulo anterior, la determinación de la viscosidad, está dada por la pendiente de la recta tangente a la curva ( $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$ ) generada en el reograma. Por lo que para cada experimento (a diferentes concentraciones) se tiene diferentes valores.

## CAPITULO 3

### ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS DEL SISTEMA SÓLIDO – LÍQUIDO

El proceso de la investigación, ha pasado por diferentes etapas, con la finalidad de encontrar una adecuada metodología del análisis de los resultados. Con este fin, se ha pasado desde el “aprendizaje” experimentando con sustancias “conocidas”, hasta el manejo adecuado de los resultados con la experimentación de mezcla **Relave - Agua**. En este capítulo se desarrolla, justamente, el proceso de “aprendizaje”, la experimentación con sustancias de mezcla comunes (agua – azúcar), sustancias homogéneas (aceite SAE 40) y finalmente la experimentación con relave minero para flujo hiperconcentrado como etapa final de la investigación.

#### 3.1 METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN

Para los experimentos iniciales, se utilizó el viscosímetro tipo Drage del Laboratorio Nacional de Hidráulica, usando en los ensayos tanto sustancias “homogéneas” o no “homogéneas”. El viscosímetro tipo Drage por ser un instrumento de medición relativa, no permite estudiar la muestra dentro de su proceso de deformación, debido principalmente a que el equipo solo cuenta con una sola velocidad de rotación de 240 RPM. Esta condición del equipo restringe estudiar a los fluidos en rangos de deformación menores y/o mayores a la que el equipo podría generar con otras velocidades de rotación.

Las limitaciones que cuenta el **viscosímetro tipo Drage** para la caracterización reológica, motivó el uso del instrumental de medición reológica (en fase de prototipo) con la finalidad de poder tener una mayor accesibilidad de captar información del proceso de deformación. El prototipo, en etapa de prueba, en su primera fase de experimentación, fue ensayada como instrumento de **caída de esfera**, posteriormente por la necesidad de obtener mayor respuesta al fenómeno de deformación y cumplir con los objetivos de la investigación, es que se plantea el instrumental de **reómetro de caída de varilla**, que es finalmente con el que se han realizado los experimentos para el análisis del flujo hiperconcentrado.



Entonces, en resumen, la metodología en el proceso de la experimentación paso por las siguientes etapas:

- **1ra Etapa:** Experimentación con instrumento **Viscosímetro tipo Drage** (etapa de “aprendizaje”), por ser un equipo de medición relativa, solo permite obtener viscosidades “aparente”, no está diseñada para cuantificar un rango mayor de esfuerzos y/o deformaciones.
- **2da Etapa:** Uso del prototipo como instrumento de **Caída de Esfera**.
- **3ra Etapa:** Prototipo instrumental de medición reológica de **Caída de Varilla**, para deformaciones de flujos hiperconcentrados.

### 3.1.1 Sustancias Comunes

El uso del viscosímetro, en el inicio de la investigación, condicionó la experimentación con sustancias comunes, que posteriormente con el equipo diseñado (reómetro de caída de varilla) se procedió a experimentar con flujos hiperconcentrados cuya parte sólida es el relave minero.

Los primeros experimentos se realizaron con el viscosímetro tipo Drage, ensayándose con sustancias homogéneas como agua, aceite SAE 40 y mezclas de azúcar – agua, relave – agua.

#### Viscosímetro tipo Drage

El viscosímetro tipo Drage de la marca PROLABO, es un viscosímetro rotacional de medición relativa. Por ser un instrumento de medición relativa, para determinar la magnitud de la propiedad física (viscosidad), requieren de curvas de calibración proporcionadas por el fabricante. Las características del viscosímetro tipo Drage se encuentran detalladas en el Anexo II – A. En la Figura 3.1 se presenta el viscosímetro tipo Drage y sus diferentes componentes.

El viscosímetro tipo Drage, en el inicio, permitió relacionar la viscosidad relativa de la mezcla con respecto al medio acuoso ( $\mu_m/\mu_0$ ) y las concentraciones ( $C_w$  y/o  $C_v$ ).

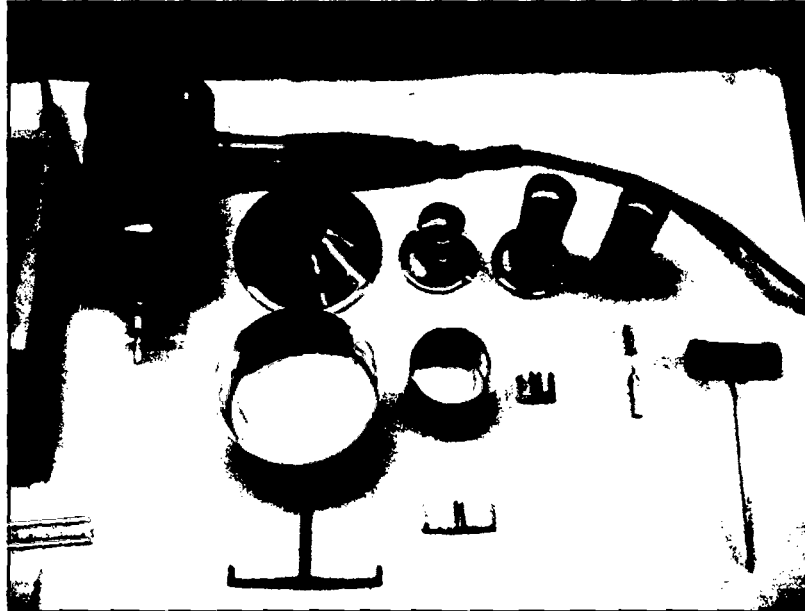


FIGURA 3.1 Viscosímetro tipo Drage y sus accesorios.

Fuente: Elaboración Propia

**Aceite SAE 40:** tomado como muestra patrón de calibración, se utilizó con la finalidad de calibrar el viscosímetro tipo Drage. El proceso de calibración se efectuó sometiendo al aceite SAE 40 a temperaturas que oscilaron entre los 7.5°C y 91.2°C, que progresivamente fueron medidos con el viscosímetro tipo Drage, cuyos valores fueron comparados con las viscosidades del aceite SAE 40 proporcionadas por el fabricante.

Producto de la comparación se elaboró una curva de calibración. En el Anexo II – A se presenta la curva de calibración propuesta, solo se pudo utilizar las paletas N° 1, 2 y 3 del viscosímetro tipo Drage, debido al rango de temperatura (7.5°C – 91.2°C) a la que fue sometido el aceite SAE 40. Cabe señalar que la curva de calibración propuesta utilizó aceite SAE 40 como muestra o patrón de calibración, por lo que se sugiere ensayar, también, con sustancias acuosas de viscosidad conocida que sirvan de patrón para su comparación.

Se utilizó la curva de calibración propuesta, para los ensayos experimentales con sustancias acuosas de mezclas azúcar – agua y relave – agua.

En la Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4, se indican las curvas de ajuste que se realizaron al ensayar con el aceite SAE 40, las mismas que sirvieron para la elaboración de la curva de calibración.

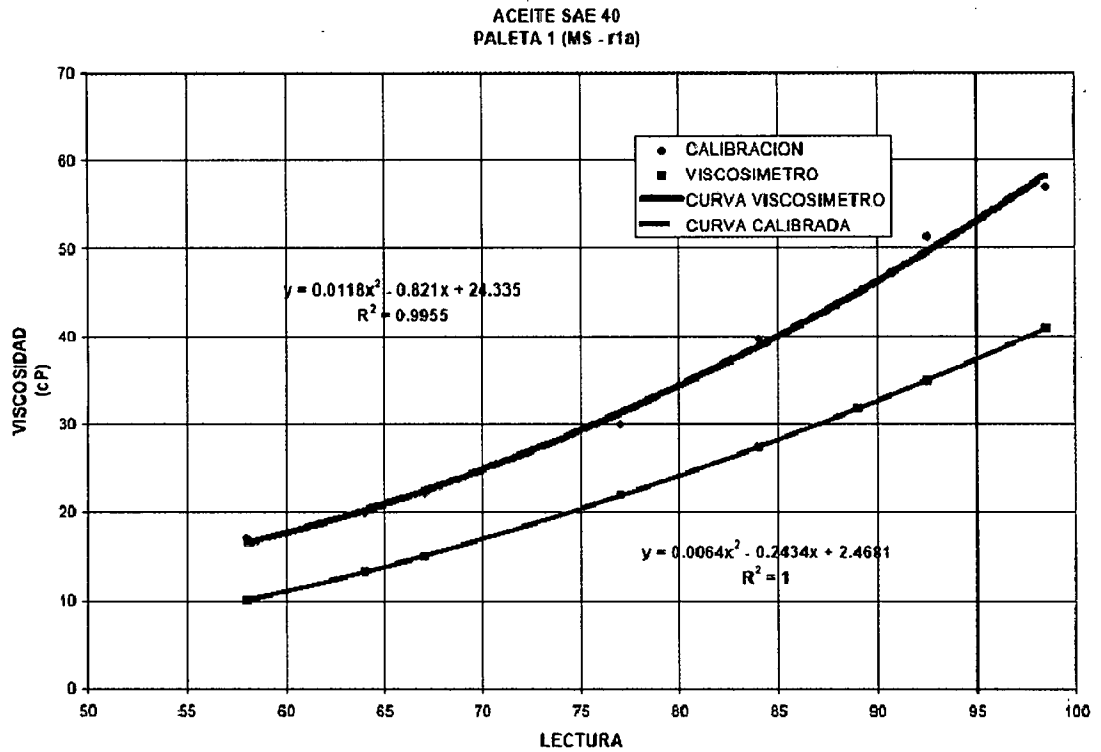


FIGURA 3.2 Ajuste de la curva de calibración, usando la paleta N° 1.

Fuente: Elaboración Propia

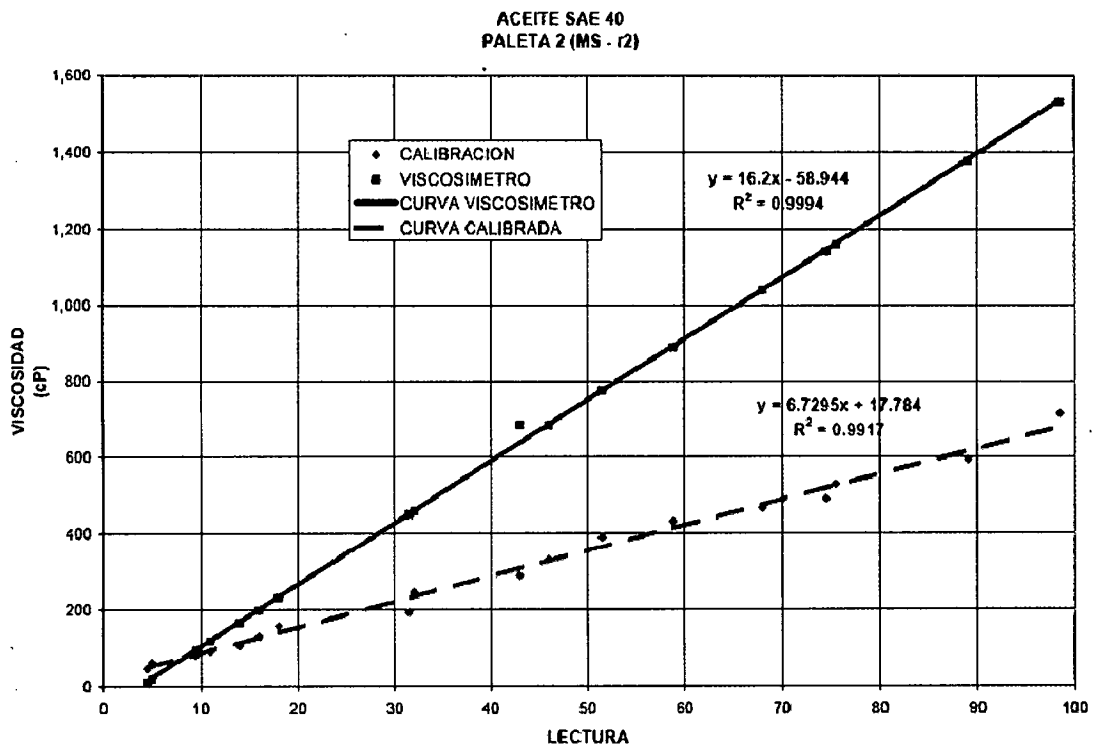


FIGURA 3.3 Ajuste de la curva de calibración, usando la paleta N° 2.

Fuente: Elaboración Propia

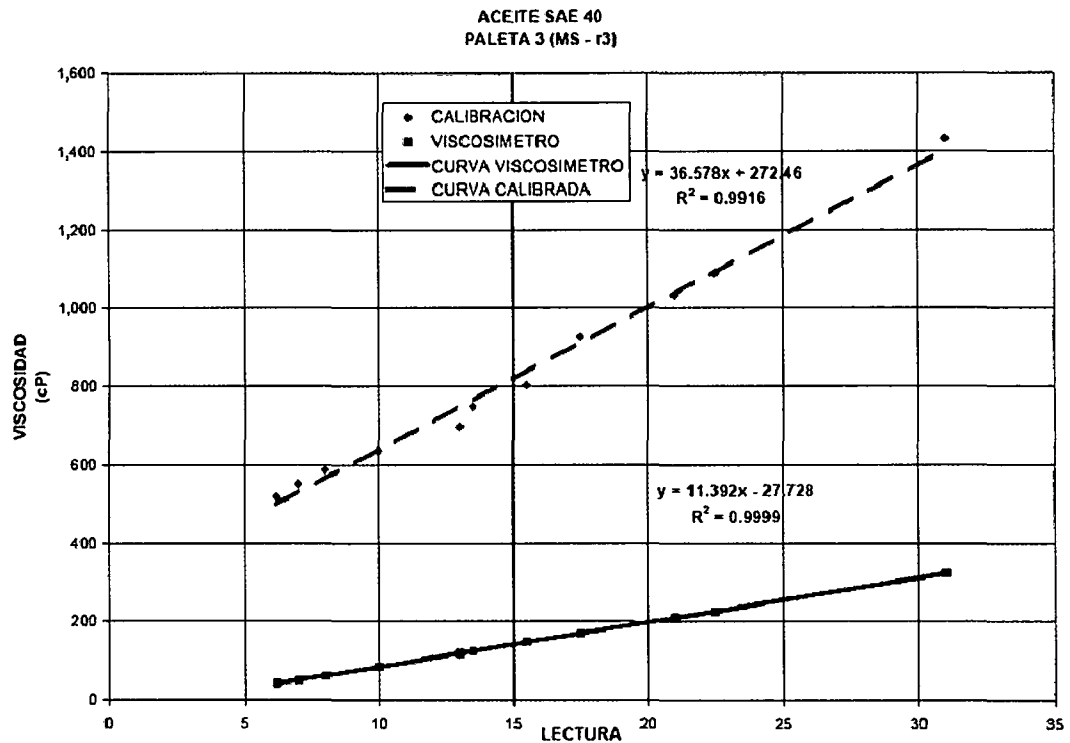


FIGURA 3.4 Ajuste de la curva de calibración, usando la paleta N° 3.

Fuente: Elaboración Propia

El **Agua**, por su disponibilidad y abundancia, fue utilizada como componente líquida de las sustancias comunes, vale decir, cuando fueron ensayadas como mezclas de azúcar – agua y mezcla de relave – agua.

**Mezcla Azúcar – Agua:** se utilizó azúcar rubia comestible como componente sólida y agua como componente líquida. La mezcla se ensayó para el rango de concentración en peso ( $C_w$ ) comprendida entre 28.57% - 50.00%.

La mezcla azúcar – agua es preparada en proporciones que permita mezclar homogéneamente sus componentes, en la Figura 3.5a se muestra el proceso realizado para la mezcla entre el azúcar – agua y en la Figura 3.5b se está efectuando la experimentación con el viscosímetro tipo Drage.

Con los ensayos efectuados, lo que se busca es relacionar ( $\mu_m/\mu_0$ ) con la concentración en peso ( $C_w$ ), la gráfica de la Figura 3.6 es la representación de dicha relación, la misma que muestra una relación directa entre ambas magnitudes adimensionales, además existe una alta correlación de la curva planteada para este caso particular.

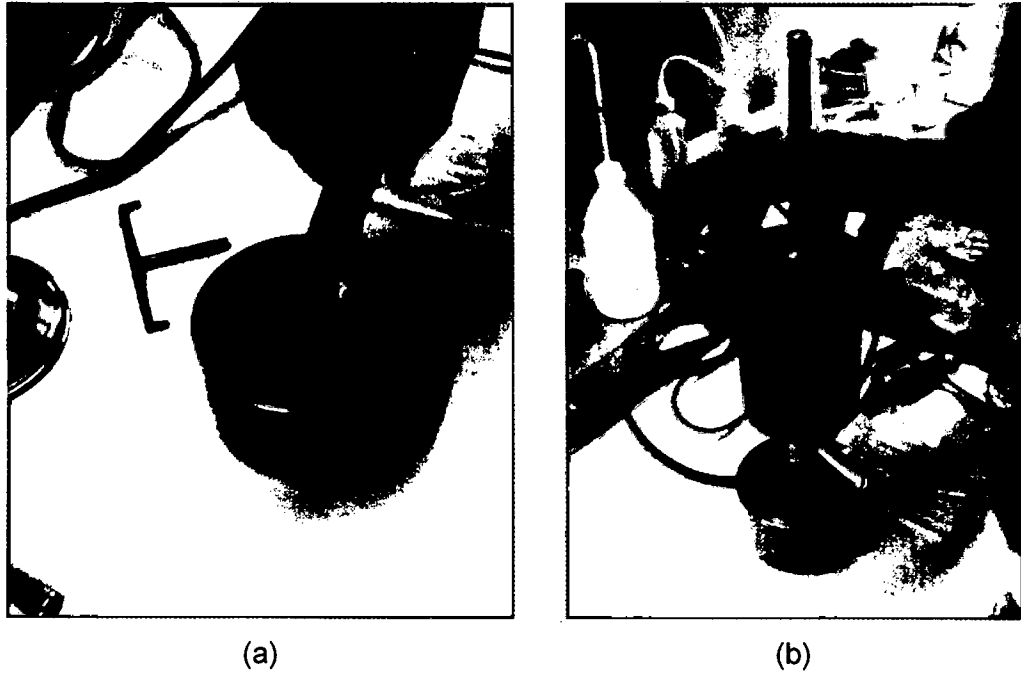


FIGURA 3.5 (a) Preparado y (b) experimentación de la mezcla azúcar – agua.

Fuente: Elaboración Propia

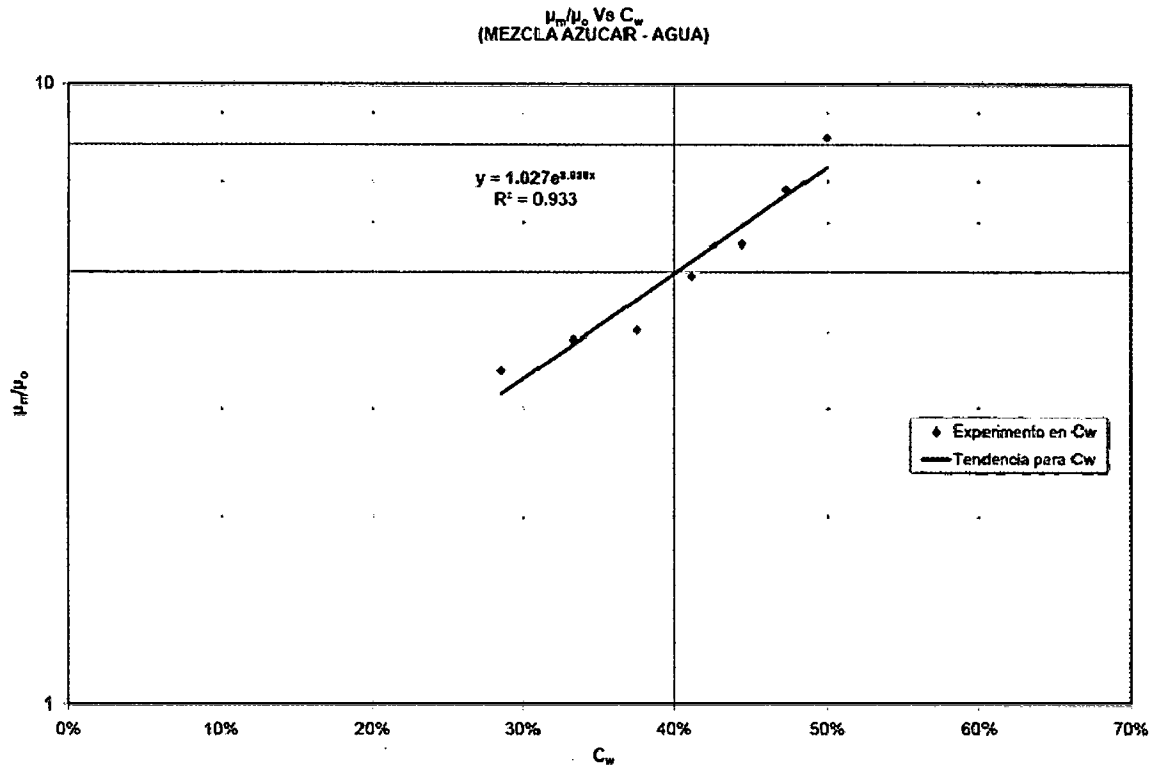


FIGURA 3.6: Viscosidad relativa y concentración.

Fuente: Elaboración Propia

**Mezcla Relave – Agua:** del mismo modo, se utilizó al relave como componente sólido y al agua como la componente líquida. La muestra de relave utilizada procede del depósito de relaves de la mina Bateas, Caylloma – Arequipa, la misma que se extrajo a una profundidad comprendida entre 0.00m – 0.40m para la muestra denominada M-1 y entre 0.40m – 0.60m para las muestras denominadas M-2 y M-3.

La preparación de la mezcla relave – agua, la máxima concentración en peso que se pudo obtener, fue de 70% en peso de partículas sólidas, esto debido a que a mayores concentraciones no se logra tener una relativa homogeneidad en el mezclado de los componentes sólido – líquido, tal como se muestra en la Figura 3.7. En el otro extremo, concentraciones menores al 25% en peso, la mezcla relave – agua no permanece homogénea por mucho tiempo (tiempo de experimentación aproximadamente 2 minutos), puesto que la componente sólida tiende a decantarse rápidamente, por lo que este tipo de relave solo permitió trabajar en el rango indicado.

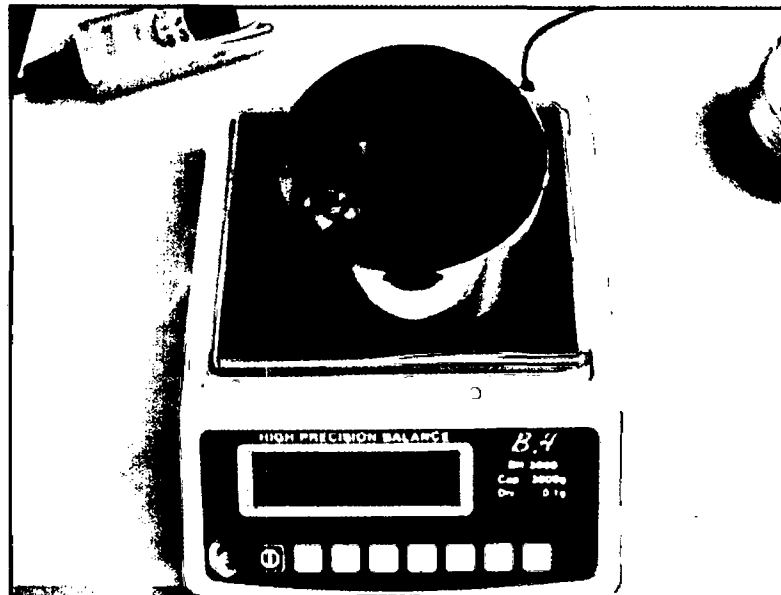


FIGURA 3.7 Mezcla relave – agua, concentración mayor al 70%, no hay homogeneidad en la mezcla.

Fuente: Elaboración Propia

Se experimentó para el rango comprendido entre 24.3% al 70% de concentración en peso ( $C_w$ ) que correspondientemente equivale entre 8.2% al 39.1% de concentración en volumen ( $C_v$ )

En la Figura 3.8, la curva presenta una relación directa entre la viscosidad relativa y la concentración en peso y/o volumen.

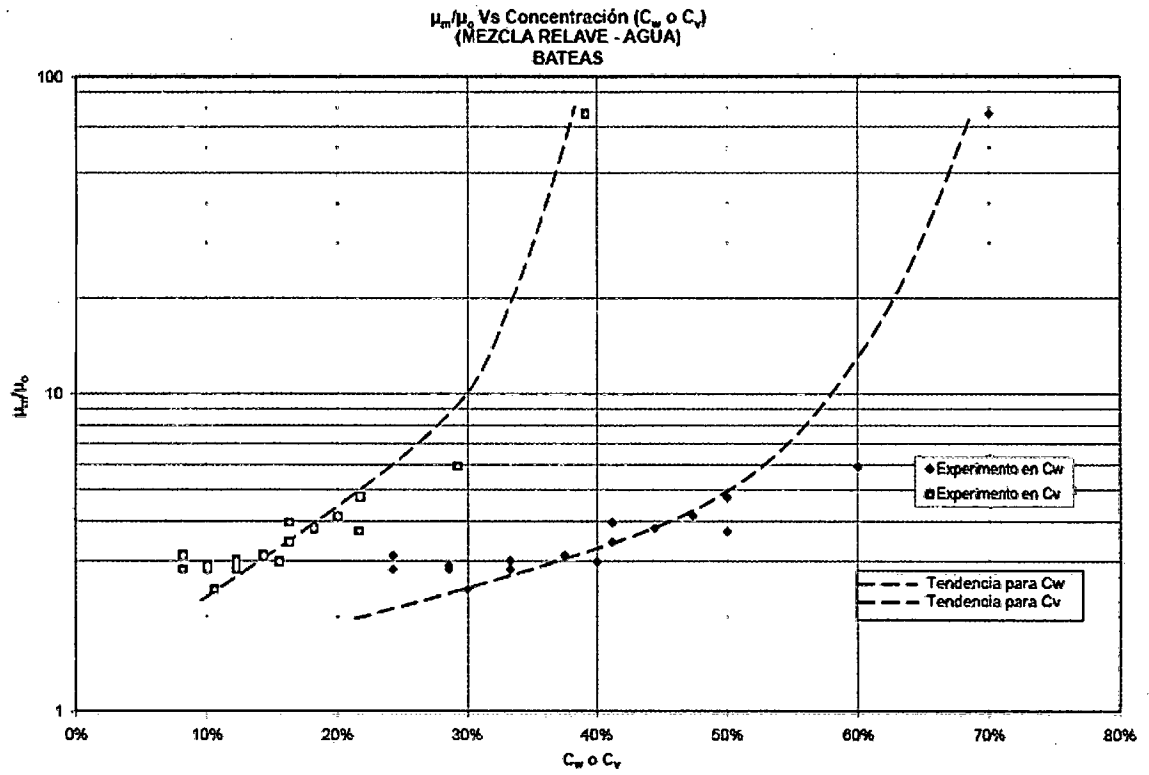


FIGURA 3.8 Viscosidad relativa y concentración para la mezcla relave – agua.

Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.2 Sustancias Heterogéneas

Continuando con el proceso de la investigación, la experimentación con sustancias heterogéneas conllevó a usar otro tipo de instrumental que capte las interacciones que ocurren en un fluido en movimiento, puesto que el instrumental usado (viscosímetro tipo Drage) de medición relativa no proporciona mayor información que la comparativa, por ello, en esta etapa, se empleó el reómetro de caída de esfera, intentando captar las interacciones del fluido – esfera.

Con este propósito, antes de ensayar con sustancia heterogéneas, se procedió a ensayar con sustancias conocidas como agua y aceite SAE 40 que permita establecer, de alguna forma, las bondades del equipo. Posteriormente se procedió a experimentar con una mezcla de harina – agua (mazamorra).

## **Caída de Esfera**

El reómetro de Caída de Esfera, se establece en esta etapa, por la necesidad de encontrar en forma directa la respuesta dinámica que manifieste la propiedad física del fluido de resistencia al movimiento, es decir su viscosidad.

El planteamiento físico, se encuentra desarrollada en el capítulo 2, referida a la **Ley de Stokes – Caída de una esfera**. El objetivo de la experimentación, es determinar la fuerza de rozamiento  $F_r$ , y la velocidad límite  $v_1$ .

El instrumental utilizado, se basa en el principio de la máquina de Atwood, la misma que en uno de sus extremos sostiene una masa de esfera ( $m_1$ ) y en el otro extremo sostiene una masa ( $m_2$ ) que es controlada de acuerdo a la interacción que ocurre entre el fluido – esfera. Las dimensiones de las esferas y las masas utilizadas, se encuentran indicadas en el Cuadro 3.2

Para la experimentación, se empleó sustancias conocidas como agua y aceite SAE 40, además que también se experimentó con la mezcla harina – agua (mazamorra). A continuación se hace una breve descripción de los experimentos realizados con dichas sustancias.

**Agua**, por ser un elemento de propiedades físicas conocidas, permite tener un referente comparativo.

La experimentación con el agua, intenta determinar la velocidad límite  $v_1$  cuando la esfera se desplaza dentro del fluido. Esta condición fue ensayada para diferentes masas  $m_1$  y  $m_2$ . La esfera de masa  $m_1$  se desplaza dentro de la sustancia (agua) la misma que se encuentra en un recipiente (probeta) de 2 litros de capacidad, tal como se muestra en la Figura 3.9(b).

El movimiento de la esfera dentro del fluido, es captado constantemente por el dispositivo electrónico diseñado, permitiendo de esta forma conocer experimentalmente la relación que gobierna el movimiento de la esfera dentro del agua.



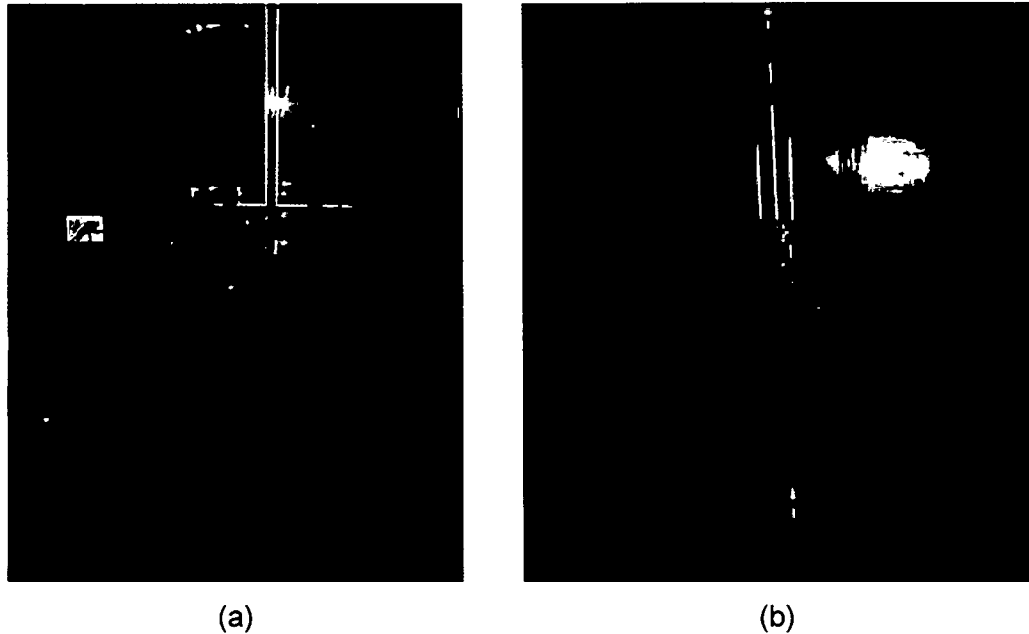


FIGURA 3.9 (a) Caída de Esfera y (b) Esfera sumergida dentro de agua.

Fuente: Elaboración Propia

Para cada muestra estudiada, se realizaron entre 3 a 4 experimentos denominados como EXP (EXP1, EXP2,...EXP4), la diferenciación entre grupo experimental se debe a la variación en la masa  $m_2$ , realizándose por cada experimento entre 3 a 4 ensayos, que básicamente son repetitivas (mismas condiciones de ensayo), los ensayos están denominados como ENS (ENS1, ENS2, ENS3,...). En la Cuadro 3.1 se indica la estructuración de los experimentos con el instrumental de Caída de esfera.

CUADRO 3.1

ESTRUCTURACION DE LOS EXPERIMENTOS

MUESTRA	EXPERIMENTO	ENSAYOS
Agua	EXP1	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4
	EXP2	ENS5,ENS6,ENS7,ENS8
	EXP3	ENS9,ENS10,ENS11,ENS12
Aceite SAE 40	EXP1	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4
	EXP2	ENS5,ENS6,ENS7,ENS8
	EXP3	ENS9,ENS10,ENS11,ENS12
	EXP4	ENS13,ENS14,ENS15,ENS16
	EXP5	ENS17,ENS18,ENS19,ENS20
Harina - agua	EXP1	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4
	EXP2	ENS5,ENS6,ENS7,ENS8
	EXP3	ENS9,ENS10,ENS11,ENS12
	EXP4	ENS13,ENS14,ENS15,ENS16
	EXP5	ENS17,ENS18,ENS19,ENS20

Fuente: Elaboración Propia

En los ensayos realizados, para las muestras estudiadas: agua, Aceite SAE 40 y Harina – agua, se hizo alternar la masa de esfera  $m_1$  denominadas como ES1.1, ES1.2 y EV1.1 (ver Cuadro 3.2), por lo que para cada experimento se hizo variar la masa  $m_2$ . En el Anexo II - B, se encuentra la data de cada experimento realizado con las muestras estudiadas.

En base a la experimentación, con el agua, se pretende determinar la velocidad límite  $v_1$  recurriendo a gráficas de **Velocidad Vs Tiempo**, tal como se muestra en la Figura 3.10 que representa el EXP1 (experimento 1). En la mayoría de los experimentos realizados, la esfera en toda su trayectoria no logra alcanzar la velocidad límite, por lo que la determinación de  $v_1$  es estimada de acuerdo a la tendencia que manifiestan las curvas (ver Figura 3.10). Este proceder para la estimación de  $v_1$ , se debe principalmente por condiciones propias del equipo, que por su diseño, no permite que la esfera recorra más de 31.00 cm aproximadamente; y también por las propiedades físicas propias de la muestra.

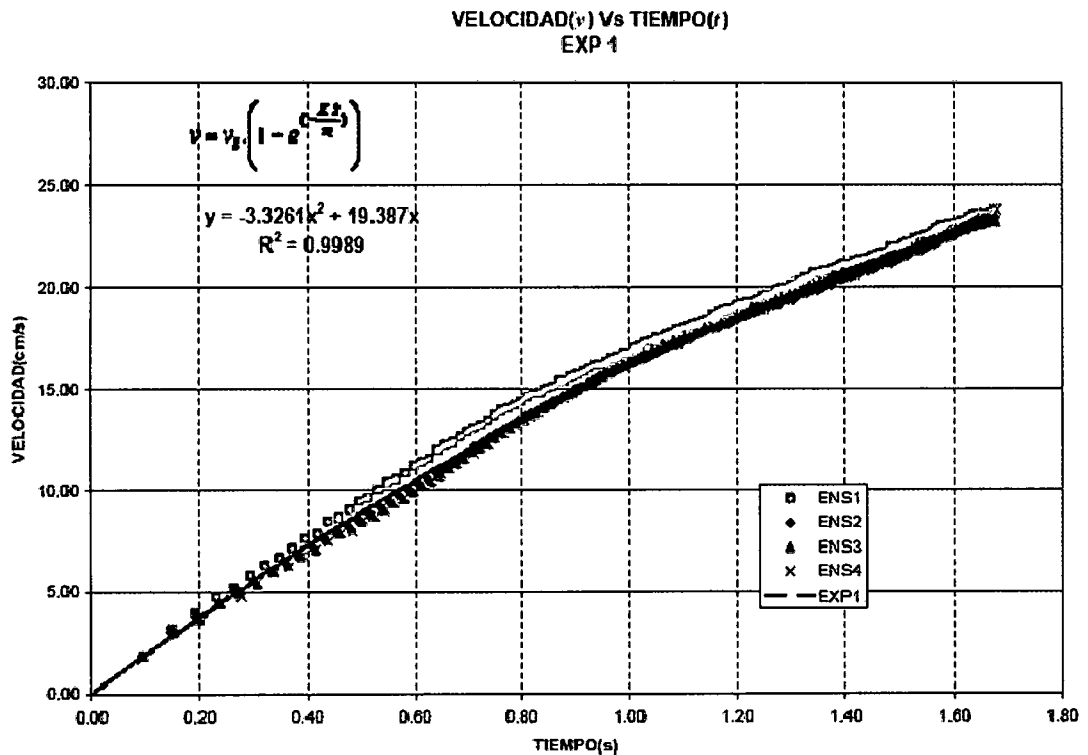


FIGURA 3.10 Tendencia de la curva Velocidad Vs Tiempo.

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 3.2  
REÓMETRO DE CAIDA  
CARACTERISTICAS DE LOS ACCESORIOS

Masa	Código	Descripción	Diámetro (cm)	Peso (gr)
<b>m<sub>1</sub></b>	ES 1.1	Esfera de Acero	2.52	65.66
	ES 1.2	Esfera de Acero	2.22	44.07
	EV 1.1	Esfera de Vidrio	2.51	20.61
<b>m<sub>2</sub></b>	AL 1.1	Aluminio	-	102.55
	AL 1.2	Aluminio	-	101.57
	AL 2.1	Aluminio	-	51.63
	AL 2.2	Aluminio	-	50.64
	AL 2.3	Aluminio	-	50.26
	AL 3.1	Aluminio	-	9.34
	AL 3.2	Aluminio	-	9.33
	AL 4.1	Aluminio	-	5.26
	AL 4.2	Aluminio	-	5.12
	BR 1.1	Bronce	-	195.70
	BR 1.2	Bronce	-	98.89
	PL 1.1	Plexiglás	-	9.77
	PL 1.2	Plexiglás	-	9.76
	PL 1.3	Plexiglás	-	9.53
	PL 2.1	Plexiglás	-	4.78
	PL 2.2	Plexiglás	-	4.75
	PL 2.3	Plexiglás	-	4.68
	SP 1.1	Soporte	-	6.35
	SP 1.2	Soporte	-	5.90
	SP 1.3	Soporte	-	5.89
	SV 1.1	Soporte	-	2.07
	SV 1.2	Soporte	-	1.82
	MO 1.1	Moneda	-	3.43
	MO 1.2	Moneda	-	3.39
MO 1.3	Moneda	-	3.37	
MO 1.4	Moneda	-	3.37	
MO 1.5	Moneda	-	3.35	
<b>m<sub>D</sub></b>	D1	Polea 1	5.00	45.54
	D2	Polea 2	5.00	25.79

Fuente: Elaboración Propia

A partir de la Ec. 2.23, se puede linealizar:

$$v = v_f \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{K_f}{M}\right)} \right)$$

Linealizando la Ec. 2.23, se obtiene la Ec. 3.1, y siendo conocido el valor de la velocidad límite  $v_1$ , se puede graficar esta expresión y estimar el valor  $K$ .

Ordenando conveniente, se obtiene:

$$\ln\left(\frac{1}{1-v/v_1}\right) = \frac{K}{M} t \quad (3.1)$$

Dando la forma lineal:  $Y = \left(\frac{K}{M}\right)X$

Del mismo modo, para la estimación de  $K$ , se emplearon curvas que se basan en la Ec. 3.1, siendo esta una ecuación lineal, donde  $K/M$  es la pendiente de la recta. Para cada experimento (EXP) se obtienen los valores de  $M$ , siendo  $M = m_1 + m_2 + 0.5m_D$ , donde  $m_1, m_2, m_D$  se encuentran indicadas en el Cuadro 3.2, entonces  $K/M$  se obtiene de la expresión de regresión generada por la curva experimental. El análisis para las demás muestras estudiadas, se desarrolló de este mismo modo, la data de la experimentación, se encuentran en el Anexo II - B,

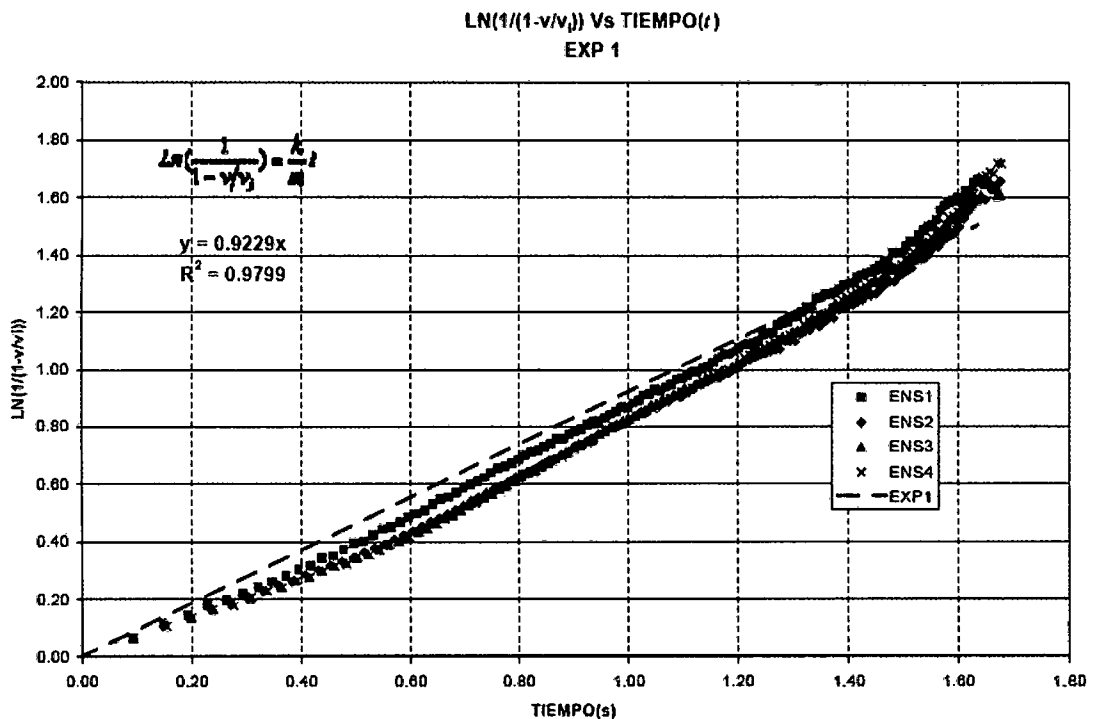


FIGURA 3.11 Tendencia de la curva para la estimación de  $K$

Fuente: Elaboración Propia

En los experimentos realizados con el agua, un total de 3, se utilizaron para cada caso, esferas de diferente diámetro, siendo estas ES 1.1, ES 1.2 y EV 1.1.

En el Cuadro 3.3, se presenta en forma resumida los resultados de los experimentos realizados con el agua. El análisis detallado de los resultados se encuentra en el Anexo II – B. Es evidente que los resultados obtenidos de la viscosidad, no corresponden a los valores reales que comúnmente tiene el agua, esto se debe, en parte, a que el tipo de equipo utilizado (caída de esfera), no es adecuado para sustancias con baja viscosidad, además, el régimen laminar asumido para la obtención de la viscosidad del agua no se da en este experimento. Es necesario indicar, que para el caso del agua, se requiere que el equipo tenga una esfera de menor diámetro a lo utilizado, que permita a la esfera desplazarse a velocidades menores a las obtenidas, por lo que, para conseguir ese efecto, la esfera deberá ser de un material diferente cuya densidad sea menor a la utilizada.

CUADRO 3.3  
ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD  $\mu$  DEL AGUA

MUESTRA	EXP	$v_{l\text{prom}}$	K/M	M	$K=6\pi\mu R$	$D=2R$	$\mu(P)$
1.- Agua	EXP1	29.02	0.8951	154.98	138.7181	2.52	5.84
	EXP2	74.32	0.6138	151.61	93.0476	2.52	3.92
	EXP3	125.43	0.5689	148.24	84.3272	2.52	3.55
2.- Agua	EXP1	s/corr	s/corr	116.76	s/corr	2.22	s/corr
	EXP2	51.19	0.8795	113.41	99.7369	2.22	4.77
	EXP3	115.60	0.6375	110.04	70.1418	2.22	3.35
3.- Agua	EXP1	s/corr	s/corr	67.43	s/corr	2.51	s/corr
	EXP2	31.25	1.5354	65.60	100.7129	2.51	4.26
	EXP3	56.24	2.1914	62.17	136.2299	2.51	5.76
	EXP4	20.57	1.0978	66.85	73.3798	2.51	3.10

Fuente: Elaboración Propia

Donde:

$$M = m_1 + m_2 + 0.5m_D$$

$m_1$  : Masa de la esfera (gr)

$v_{l\text{prom}}$  : Velocidad límite estimado (cm/s)

$m_2$  : Masa de contrapeso (gr)

D: Diámetro de la esfera (cm)

$m_D$  : Masa Disco – Polea (gr)

$\mu$ : Viscosidad dinámica ( $\text{gr}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**Aceite SAE 40**, la experimentación realizada con el Aceite SAE 40, siguió el mismo procedimiento y secuencia experimental que se realizó con el agua. En la Figura 3.12 se muestra la experimentación efectuada.

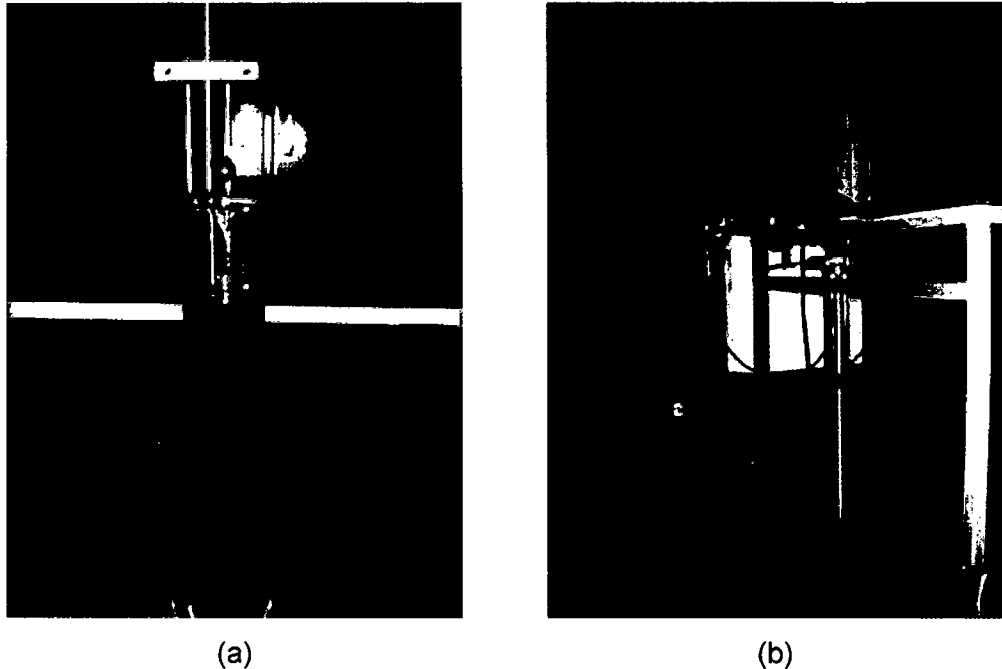


FIGURA 3.12 (a) Aceite SAE 40 y (b) Caída de Esfera en Aceite SAE 40.

Fuente: Elaboración Propia

Del mismo modo a lo realizado con el agua, para el Aceite SAE 40, solo se efectuaron 5 experimentos, empleándose para cada caso esferas de diferentes diámetros, siendo estas de 2.22 cm (ES 1.2) y 2.52 cm (ES 1.1) respectivamente, ambas esferas de acero.

Para la obtención de la velocidad límite  $v_l$ , se recurrió a las gráficas experimentales de **Velocidad Vs Tiempo** tomando como referencia a la velocidad máxima alcanzada por la esfera. A diferencia con el agua, los experimentos realizados con el Aceite SAE 40, nos permite obtener gráficas con mayor información del desplazamiento realizado por la esfera dentro de este fluido, pudiendo de esta manera estimar la velocidad límite  $v_l$ . La elección de la  $v_l$  se hizo en forma visual (elección arbitraria en un rango de valores cercanos entre si), este proceder se efectuó para cada experimento. En la Figura 3.13a y Figura 3.13b se indica la elección de la  $v_l$  pudiendo ser un rango de valores de velocidad próximos entre ellas.

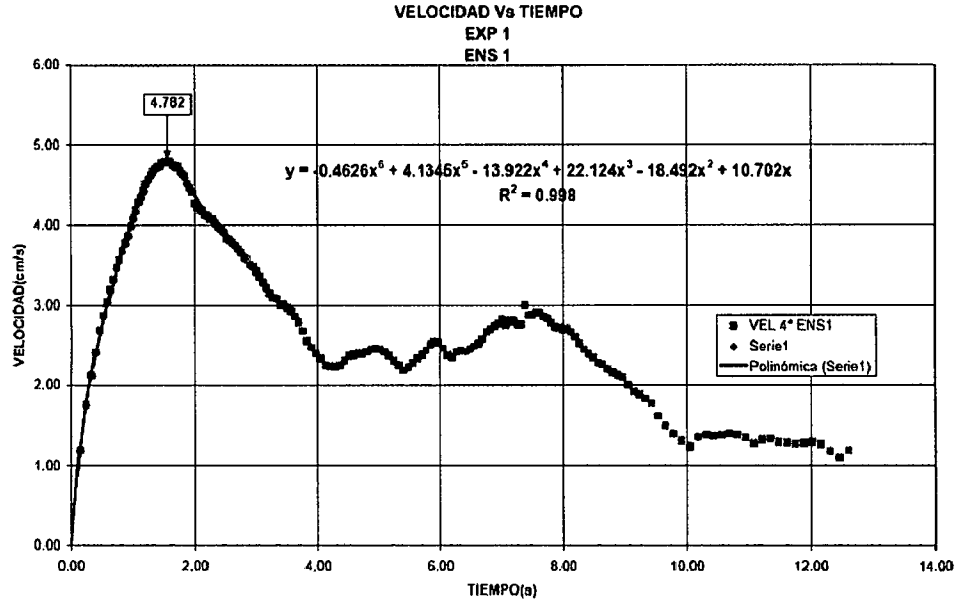


FIGURA 3.13a 1.- Aceite SAE 40 para la estimación  $v_l$ , EXP1, ENS1.  
Fuente: Elaboración Propia

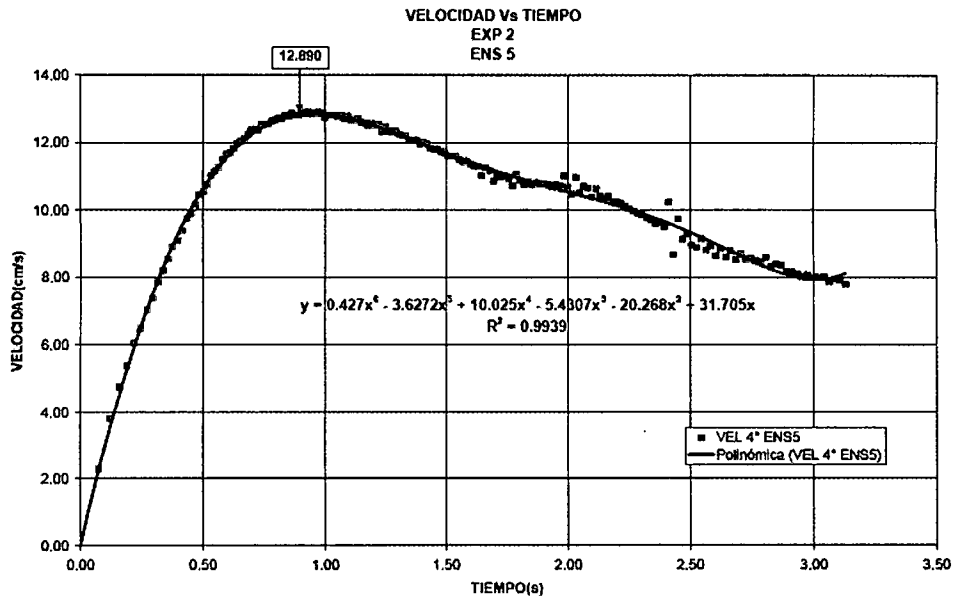


FIGURA 3.13b 1.- Aceite SAE 40 para la estimación  $v_l$ , EXP2, ENS5.  
Fuente: Elaboración Propia

Para los EXP 1 y EXP 2, se efectuaron los ensayos (ENS1,...ENS8), para cada uno de ellas se estimó, como ya se indicó, el valor de la velocidad límite  $v_l$ . Se efectuaron 5 EXP para la muestra (1.- Aceite SAE 40). En la Figura 3.14a y Figura 3.14b se muestra el agrupamiento de los ensayos (ENS1,...ENS4 y ENS5,...ENS8) para los EXP1 y EXP2.respectivamente.

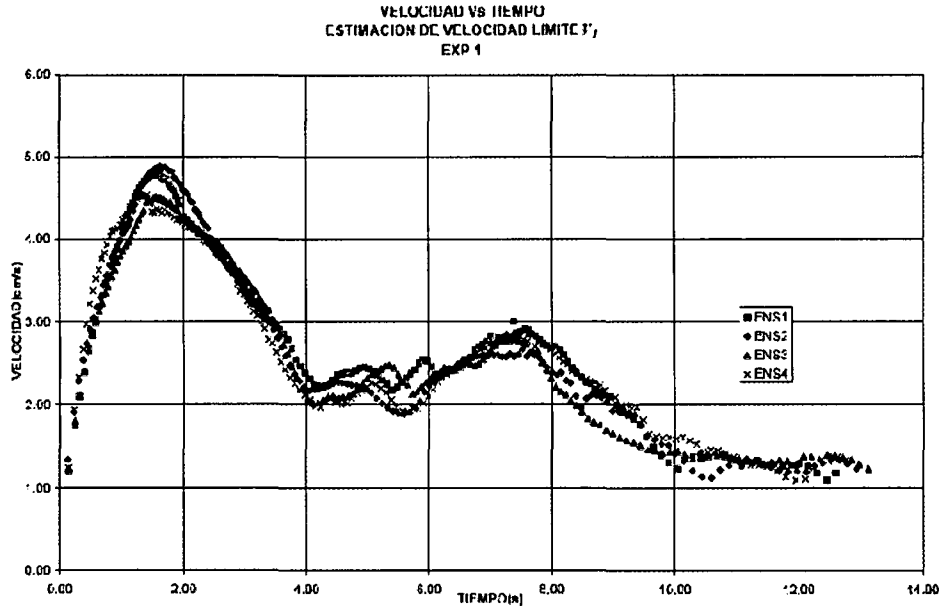


FIGURA 3.14a 1.- Aceite SAE 40 agrupamiento para el EXP1.

Fuente: Elaboración Propia

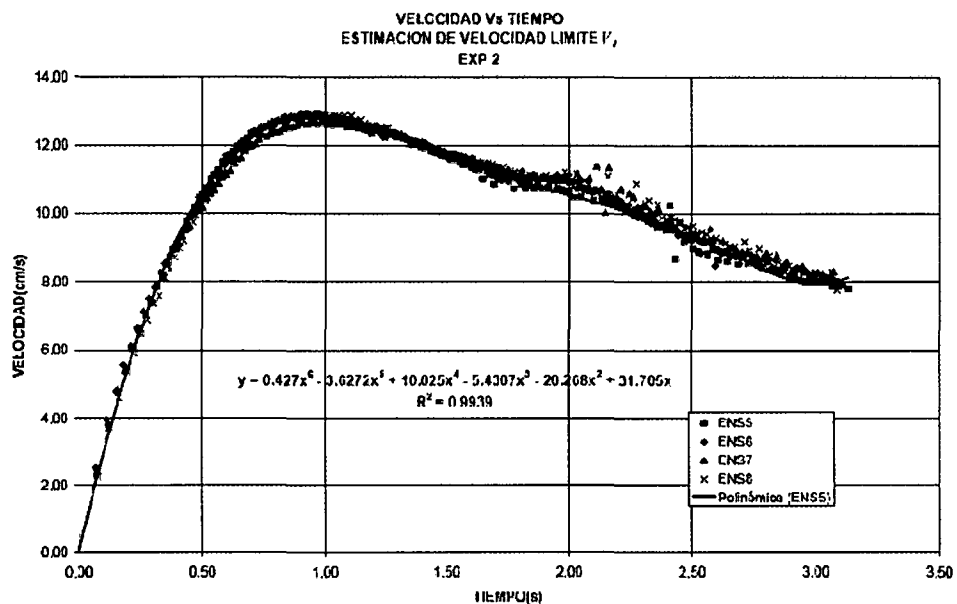


FIGURA 3.14b 1.- Aceite SAE 40 agrupamiento para el EXP2.

Fuente: Elaboración Propia

Haciendo uso de la Ec. 3.1 para la muestra (1.- Aceite SAE 40), se obtuvieron las gráficas que permite obtener el valor  $K/M$ , con lo que se obtuvo los valores de  $K$  para cada ensayo y por consiguiente para cada EXP. En la Figura 3.15a y Figura 3.15b se muestra las tendencias de las curvas para los EXP 1 y EXP 2 respectivamente.



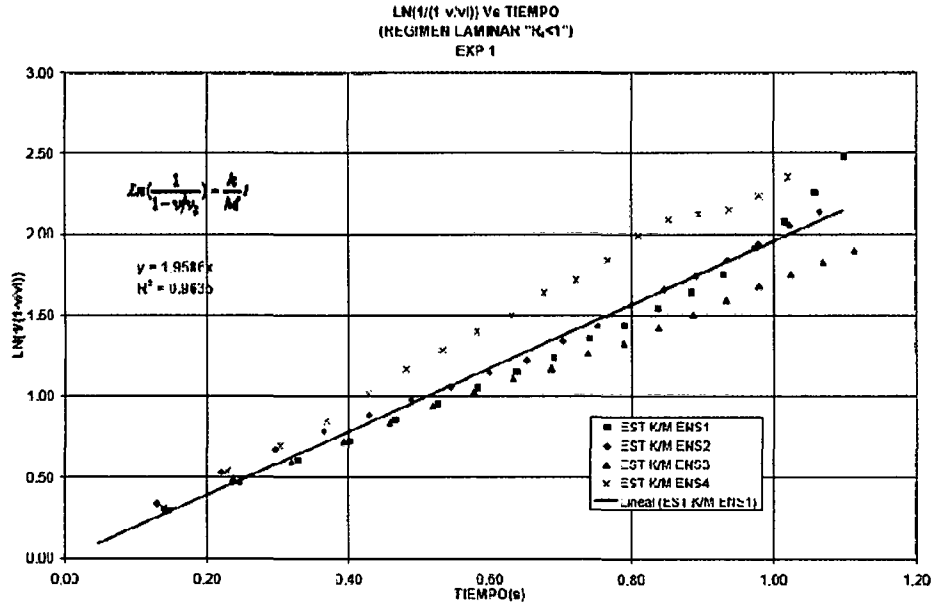


FIGURA 3.15a 1.- Aceite SAE 40 estimación  $K/M$  para el EXP1.

Fuente: Elaboración Propia

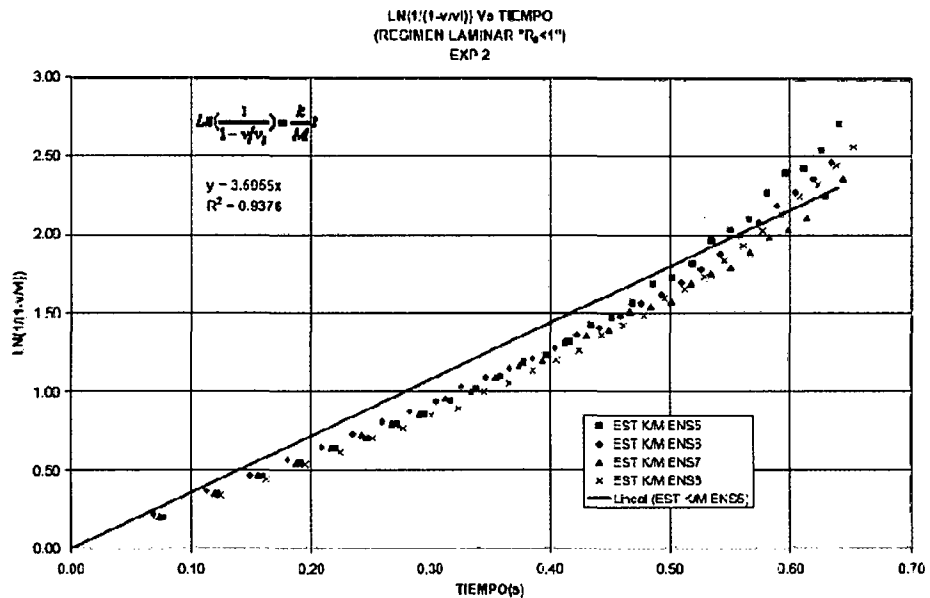


FIGURA 3.15b 1.- Aceite SAE 40 estimación  $K/M$  para el EXP2.

Fuente: Elaboración Propia

Este análisis se hizo para cada uno de los ensayos (ENS1,.....ENS20) que corresponden a los EXP1 al EXP5. La muestra (2.- Aceite SAE 40), también siguió el mismo proceso de análisis. De acuerdo al procedimiento seguido, en función de los conceptos propuestos, en el Cuadro 3.4, se encuentra en forma resumida, los resultados para la obtención de la "viscosidad" del Aceite SAE 40

CUADRO 3.4

ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD  $\mu$  DEL ACEITE SAE 40

MUESTRA	EXP	$v_{i \text{ prom}}$	K/M	M	$K=6\pi\mu R$	D=2R	$\mu(P)$	T °C
1.- Aceite SAE 40	EXP1	4.67	2.0777	116.76	242.5789	2.22	11.59	18.8
	EXP2	12.83	3.4260	113.41	388.5199	2.22	18.57	19.1
	EXP3	20.70	4.1519	110.04	456.8543	2.22	21.84	19.1
	EXP4	28.50	4.8508	106.67	517.4106	2.22	24.73	19.2
	EXP5	36.57	4.8876	103.28	504.7643	2.22	24.12	19.4
2.- Aceite SAE 40	EXP1	8.84	2.7082	154.98	419.7072	2.52	17.67	18.4
	EXP2	15.14	4.3556	151.61	660.3232	2.52	27.80	18.6
	EXP3	21.36	4.1941	148.24	621.7161	2.52	26.18	18.6
	EXP4	28.49	4.5164	144.85	654.1780	2.52	27.54	18.4
	EXP5	36.75	4.5759	141.42	647.0938	2.52	27.25	18.6

Fuente: Elaboración Propia

Los valores de la viscosidad  $\mu$  (Poise) para el Aceite SAE 40 que se muestra en el Cuadro 3.4, como en el caso anterior con respecto al agua (ver Cuadro 3.3), los valores de la viscosidad obtenidos, superan ampliamente al rango de valores de viscosidad que tiene el Aceite SAE 40, cuyo valor está comprendido aproximadamente entre 5.15P y 5.53P para las temperaturas comprendidas entre 19.1°C y 18.4°C respectivamente.

En las Figura 3.14a y Figura 3.14b, se observa que los puntos obtenidos forman una franja de ancho irregular, notándose más la dispersión en la Figura 3.14a, mientras que en la Figura 3.14b la franja de puntos es más regular, pero en ambos casos, la tendencia de estos puntos no es lineal como se está asumiendo, esto se debe a que la hipótesis que la fuerza de rozamiento  $F_r$ , es proporcional a la velocidad  $v$ , es decir  $F_r = K.v$  siendo  $K = 6\pi.R.\mu$  cuando  $v$  alcanza la velocidad límite  $v_l$ , todo esto para un flujo reptante, no se cumple en la experimentación.

Los experimentos realizados con el Aceite SAE 40, por los resultados mostrados en el Cuadro 3.4, al parecer no se encuentran dentro de esta concepción de flujo reptante (para  $R_e < 1$ ); por lo que el planteamiento utilizado, para este caso, no es el más apropiado.

Por lo mencionado anteriormente, es que se replantea la expresión general que relaciona la fuerza de rozamiento  $F_r$  con la velocidad  $v$ , es decir:

$$F_r = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho_f \cdot A \cdot v^2 \quad (3.2)$$

Donde:

$C_d$  : Coeficiente de Arrastre

$\rho_f$  : Densidad del fluido

$A$  : Área de la sección transversal al movimiento, caso de la esfera es  $A = \pi R^2$

$v$  : Velocidad

El coeficiente de arrastre  $C_d$  es una función del número de Reynolds  $R_e$ , siendo este número importante para definir el comportamiento de un fluido. Para un amplio intervalo de números  $R_e$ , la forma funcional del coeficiente de arrastre  $C_d$  se puede escribir.

$$C_d \approx \frac{24}{R_e} + \frac{6}{1 + \sqrt{R_e}} + 0.4 \quad (3.3)$$

Haciendo  $K_f = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho_f \cdot A$ , entonces en la Ec. 3.2, resulta:  $F_r = K_f \cdot v^2$

De la ecuación de movimiento de la esfera Ec. 2.20, y reemplazando  $F_r = K_f \cdot v^2$  se tiene:

$$F - K_f \cdot v^2 = M \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3.4)$$

También, en la Ec. 3.4, cuando  $v$  alcance la velocidad límite  $v_l$ , en ese instante la aceleración se hace cero.

$$F - K_f \cdot v_l^2 = M \cdot \frac{dv}{dt} = 0 \quad F - K_f \cdot v_l^2 = 0 \quad v_l^2 = \frac{F}{K_f} \quad v_l = \sqrt{\frac{F}{K_f}}$$

De la Ec. 3.4, se tiene:  $\frac{dv}{dt} = \frac{F}{M} - \frac{K_f}{M} \cdot v^2$ , integrando:  $\int_0^{v_l} \frac{dv}{\frac{F}{M} - \frac{K_f}{M} \cdot v^2} = \int_0^t dt$

Haciendo:

$$\frac{F}{M} = a^2, \text{ entonces: } a = \sqrt{\frac{F}{M}}$$

$$\frac{K_f}{M} = b^2, \text{ entonces: } b = \sqrt{\frac{K_f}{M}}$$

$$\text{También: } v_l = \sqrt{\frac{F}{K_f}} = \frac{a}{b}$$

$$a \cdot b = \frac{\sqrt{F \cdot K_f}}{M}$$

Reemplazando en la Ec 3.1-4, se tiene:

$$\int_0^v \frac{dv}{a^2 - b^2 \cdot v^2} = \int_0^t dt, \text{ agrupando: } \frac{1}{2a \cdot b} \int_0^v \left( \frac{1}{a/b + v} + \frac{1}{a/b - v} \right) \cdot dv = \int_0^t dt$$

Resolviendo:

$$\text{Ln} \left( \frac{a/b + v}{a/b - v} \right) = 2a \cdot b \cdot t, \quad \text{Ln} \left( \frac{v_l + v}{v_l - v} \right) = 2a \cdot b \cdot t, \text{ quedaría:}$$

$$\text{Ln} \left( \frac{1 + v/v_l}{1 - v/v_l} \right) = 2a \cdot b \cdot t \quad (3.5)$$

Finalmente:

$$v_{(t)} = v_l \left( \frac{e^{2ab \cdot t} - 1}{e^{2ab \cdot t} + 1} \right) \quad (3.6)$$

El interés del análisis para las muestras estudiadas, se centrará en la Ec. 3.5, puesto que permite, con un conjunto de puntos (data), efectuar la regresión de forma lineal:

$$Y = 2a \cdot b \cdot X$$

Donde  $2a \cdot b$  es la pendiente de la recta, permitiendo de esta forma calcular el valor de  $K_f$  ( $K_f = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho_f \cdot A$ ), por consiguiente se obtiene el valor del coeficiente de arrastre  $C_d$ . El valor de  $C_d$  está en función del número de Reynolds  $R_e$ , de esta forma conocido el  $R_e$  se obtiene el valor de la viscosidad, siendo la expresión del número de Reynolds  $R_e$  para la Caída de Esfera:

$$R_e = \frac{D \cdot v_l \cdot \rho_f}{\mu}, \text{ por lo que: } \mu = \frac{D \cdot v_l \cdot \rho_f}{R_e}$$

Donde:

$D$ : Diámetro de la esfera (cm)                       $v_l$ : Velocidad límite estimado (cm/s)  
 $\rho_f$ : Densidad del fluido (gr/cm<sup>3</sup>)                       $\mu$ : Viscosidad dinámica (gr.cm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>)

En la Figura 3.16a y Figura 3.16b, se muestra la grafica que relaciona la expresión indicada en la Ec. 3.5 para los ensayos del EXP 1 y EXP 2, siendo un total de 5 EXP efectuada para la muestra de Aceite SAE 40. En el Anexo II – B. se encuentra el detalle del análisis.

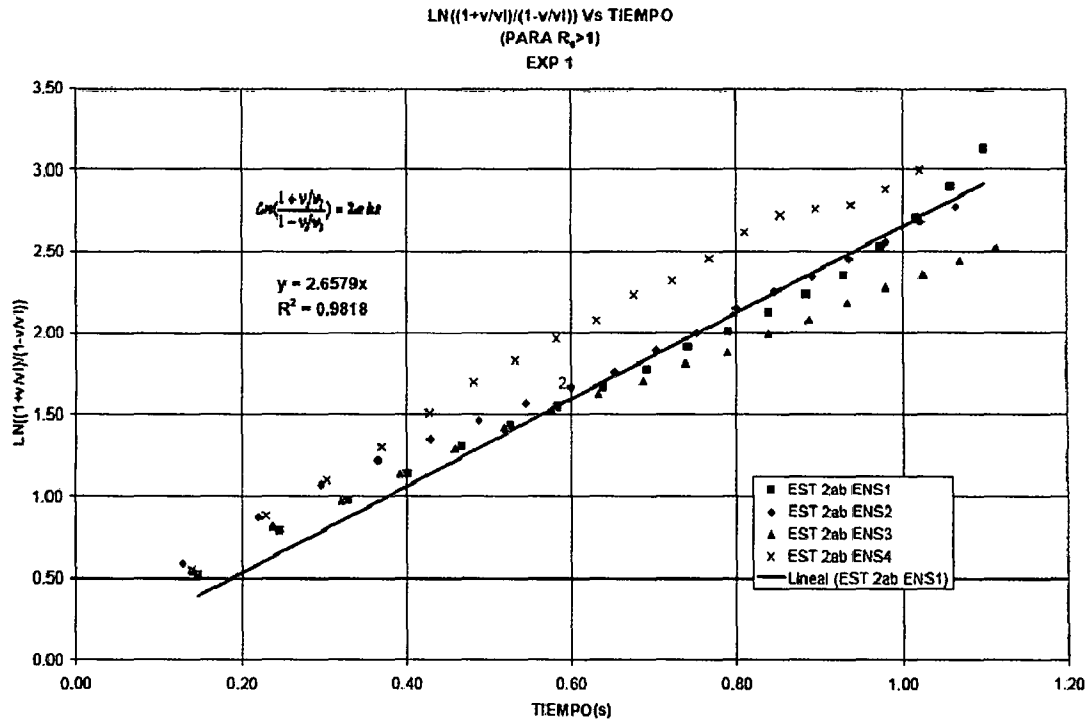


FIGURA 3.16a 1.- Aceite SAE 40 estimación *2ab* para el EXP1.

Fuente: Elaboración Propia

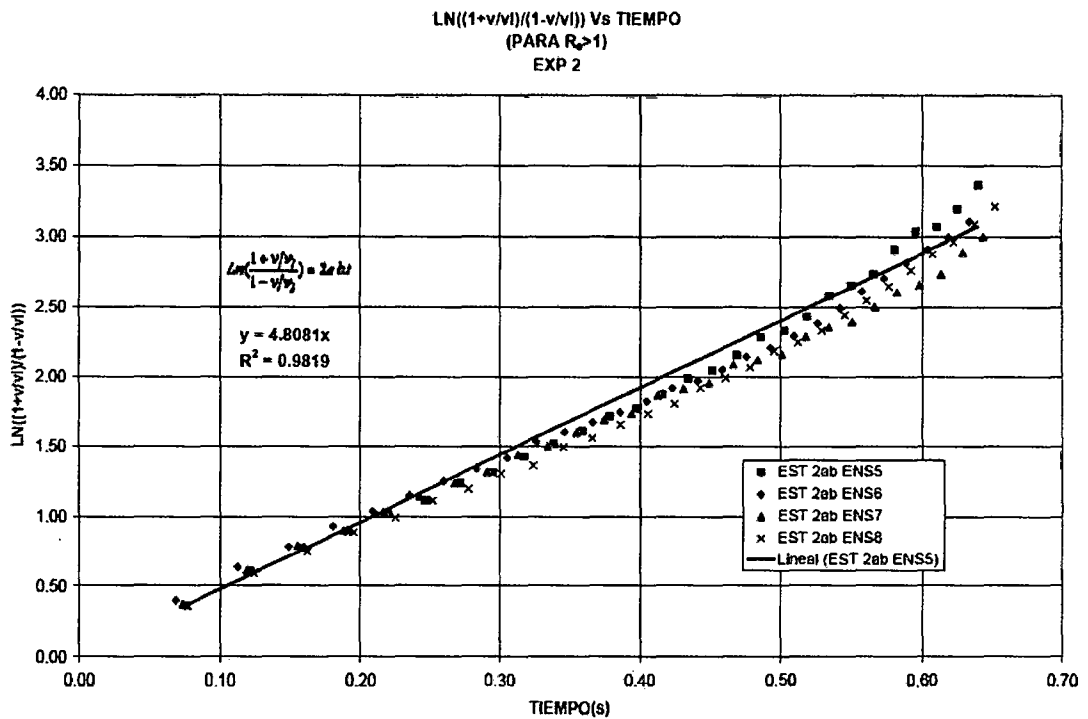


FIGURA 3.16b 1.- Aceite SAE 40 estimación *2ab* para el EXP2.

Fuente: Elaboración Propia

En el Cuadro 3.5a y Cuadro 3.5b se muestra en forma resumida los resultados de los experimentos realizados, para la obtención de la viscosidad del Aceite SAE 40.

CUADRO 3.5a

ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_d$ ) Y VISCOSIDAD ( $\mu$ ):

1.- Aceite SAE 40

EXP	$\ln((1+v/v_i)/(1-v/v_i))=2ab.t$			$K_f=a^2b^2M^2/F$ , Tambien $C_d=2.K_f/(\rho_f.A)$				$C_d=24/R_e+6/(1+R_e^{0.5})+0.4$ , VISCOSIDAD $\mu$			
	2ab	$M^2$	F	$k_f$	D	$\rho_f$	$C_d$	$v_i$	$R_e$	$\mu(P)$	T °C
EXP1											
ENS1	2.658	13631.73	5171.26	4.6556	2.22	0.894	2.69	4.782	<b>20.10</b>	<b>0.47</b>	<b>18.7</b>
ENS2	2.707	13631.73	5171.26	4.8288	2.22	0.894	2.79	4.890	<b>18.90</b>	<b>0.51</b>	<b>18.8</b>
ENS3	2.458	13631.73	5171.26	3.9816	2.22	0.894	2.30	4.522	<b>26.20</b>	<b>0.34</b>	<b>18.9</b>
ENS4	3.095	13631.73	5171.26	6.3123	2.22	0.894	3.65	4.485	<b>12.45</b>	<b>0.71</b>	<b>18.9</b>
PROM.				<b>4.9446</b>			<b>2.86</b>	<b>4.670</b>		<b>0.51</b>	<b>18.8</b>
DESV.				0.9823			0.57	0.198		0.15	0.1
EXP2											
ENS5	4.808	12860.69	8448.43	8.7978	2.22	0.894	5.08	12.890	<b>7.75</b>	<b>3.30</b>	<b>19.0</b>
ENS6	4.677	12860.69	8448.43	8.3228	2.22	0.894	4.81	12.915	<b>8.36</b>	<b>3.07</b>	<b>18.9</b>
ENS7	4.481	12860.69	8448.43	7.6429	2.22	0.894	4.42	12.668	<b>9.44</b>	<b>2.66</b>	<b>19.1</b>
ENS8	4.537	12860.69	8448.43	7.8347	2.22	0.894	4.53	12.834	<b>9.10</b>	<b>2.80</b>	<b>19.2</b>
PROM.				<b>8.1496</b>			<b>4.71</b>	<b>12.827</b>		<b>2.96</b>	<b>19.1</b>
DESV.				0.5184			0.30	0.111		0.28	0.1
EXP3											
ENS9	5.528	12107.70	11745.17	7.8747	2.22	0.894	4.55	20.543	<b>9.05</b>	<b>4.51</b>	<b>19.0</b>
ENS10	5.537	12107.70	11745.17	7.9003	2.22	0.894	4.57	20.682	<b>9.00</b>	<b>4.56</b>	<b>19.0</b>
ENS11	5.614	12107.70	11745.17	8.1225	2.22	0.894	4.69	20.726	<b>8.68</b>	<b>4.74</b>	<b>19.1</b>
ENS12	5.593	12107.70	11745.17	8.0609	2.22	0.894	4.66	20.830	<b>8.74</b>	<b>4.73</b>	<b>19.1</b>
PROM.				<b>7.9896</b>			<b>4.62</b>	<b>20.695</b>		<b>4.63</b>	<b>19.1</b>
DESV.				0.1210			0.07	0.119		0.12	0.1
EXP4											
ENS13	6.431	11377.42	15041.90	7.8203	2.22	0.894	4.52	28.504	<b>9.15</b>	<b>6.18</b>	<b>19.1</b>
ENS14	6.246	11377.42	15041.90	7.3776	2.22	0.894	4.26	28.546	<b>9.95</b>	<b>5.69</b>	<b>19.1</b>
ENS15	6.307	11377.42	15041.90	7.5216	2.22	0.894	4.35	28.477	<b>9.65</b>	<b>5.86</b>	<b>19.3</b>
ENS16	6.140	11377.42	15041.90	7.1286	2.22	0.894	4.12	28.486	<b>10.44</b>	<b>5.42</b>	<b>19.3</b>
PROM.				<b>7.4620</b>			<b>4.31</b>	<b>28.503</b>		<b>5.79</b>	<b>19.2</b>
DESV.				0.2888			0.17	0.031		0.32	0.1
EXP5											
ENS17	6.556	10665.73	18358.21	6.2434	2.22	0.894	3.61	36.323	<b>12.65</b>	<b>5.70</b>	<b>19.3</b>
ENS18	6.449	10665.73	18358.21	6.0401	2.22	0.894	3.49	36.582	<b>13.40</b>	<b>5.42</b>	<b>19.4</b>
ENS19	6.654	10665.73	18358.21	6.4314	2.22	0.894	3.72	36.674	<b>12.10</b>	<b>6.02</b>	<b>19.4</b>
ENS20	6.484	10665.73	18358.21	6.1055	2.22	0.894	3.53	36.690	<b>13.10</b>	<b>5.56</b>	<b>19.4</b>
PROM.				<b>6.2051</b>			<b>3.59</b>	<b>36.567</b>		<b>5.67</b>	<b>19.4</b>
DESV.				0.1730			0.10	0.170		0.26	0.0

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 3.5b  
ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_d$ ) Y VISCOSIDAD ( $\mu$ ):

2.- Aceite SAE 40

EXP	Ln((1+v/v <sub>i</sub> )/(1-v/v <sub>i</sub> ))=2ab.t			K <sub>r</sub> =a <sup>2</sup> b <sup>2</sup> M <sup>2</sup> /F, Tambien C <sub>d</sub> =2.K <sub>r</sub> /(ρ <sub>f</sub> .A)				C <sub>d</sub> =24/R <sub>e</sub> +6/(1+R <sub>e</sub> <sup>0.5</sup> )+0.4, VISCOSIDAD μ			
	2ab	M <sup>2</sup>	F	k <sub>r</sub>	D	ρ <sub>f</sub>	C <sub>d</sub>	v <sub>i</sub>	R <sub>e</sub>	μ(P)	T °C
EXP1	2ab	M <sup>2</sup>	F	k <sub>r</sub>	D	ρ <sub>f</sub>	C <sub>d</sub>	v <sub>i</sub>	R <sub>e</sub>	μ(P)	T °C
ENS1	3.327	24017.25	10021.06	6.6334	2.52	0.894	2.98	8.748	17.00	1.16	18.4
ENS2	3.464	24017.25	10021.06	7.1875	2.52	0.894	3.22	8.821	15.10	1.32	18.4
ENS3	3.466	24017.25	10021.06	7.1975	2.52	0.894	3.23	8.821	15.00	1.32	18.4
ENS4	3.864	24017.25	10021.06	8.9445	2.52	0.894	4.01	8.959	10.85	1.86	18.5
PROM.				7.4907			3.36	8.837		1.42	18.4
DESV.				1.0044			0.45	0.088		0.31	0.1
EXP2	2ab	M <sup>2</sup>	F	k <sub>r</sub>	D	ρ <sub>f</sub>	C <sub>d</sub>	v <sub>i</sub>	R <sub>e</sub>	μ(P)	T °C
ENS5	4.907	22984.08	13317.80	10.3905	2.52	0.894	4.66	14.936	8.75	3.85	18.6
ENS6	5.548	22984.08	13317.80	13.2779	2.52	0.894	5.96	15.248	6.24	5.51	18.5
ENS7	5.673	22984.08	13317.80	13.8845	2.52	0.894	6.23	15.190	5.89	5.81	18.6
ENS8	5.492	22984.08	13317.80	13.0154	2.52	0.894	5.84	15.201	6.42	5.33	18.6
PROM.				12.6421			5.67	15.144		5.12	18.6
DESV.				1.5445			0.69	0.141		0.87	0.1
EXP3	2ab	M <sup>2</sup>	F	k <sub>r</sub>	D	ρ <sub>f</sub>	C <sub>d</sub>	v <sub>i</sub>	R <sub>e</sub>	μ(P)	T °C
ENS9	5.735	21973.62	16614.53	10.8744	2.52	0.894	4.88	21.397	8.20	5.88	18.5
ENS10	5.317	21973.62	16614.53	9.3484	2.52	0.894	4.19	21.344	10.18	4.72	18.7
ENS11	5.363	21973.62	16614.53	9.5108	2.52	0.894	4.27	21.363	9.90	4.86	18.6
ENS12	5.481	21973.62	16614.53	9.9310	2.52	0.894	4.45	21.344	9.35	5.14	18.4
PROM.				9.9161			4.45	21.362		5.15	18.6
DESV.				0.6844			0.31	0.025		0.52	0.1
EXP4	2ab	M <sup>2</sup>	F	k <sub>r</sub>	D	ρ <sub>f</sub>	C <sub>d</sub>	v <sub>i</sub>	R <sub>e</sub>	μ(P)	T °C
ENS13	6.206	20980.07	19930.84	10.1365	2.52	0.894	4.55	28.467	9.05	7.09	18.5
ENS14	6.022	20980.07	19930.84	9.5431	2.52	0.894	4.28	28.537	9.86	6.52	18.4
ENS15	6.077	20980.07	19930.84	9.7198	2.52	0.894	4.36	28.481	9.60	6.68	18.5
ENS16	5.894	20980.07	19930.84	9.1405	2.52	0.894	4.10	28.491	10.50	6.11	18.0
PROM.				9.6350			4.32	28.494		6.60	18.4
DESV.				0.4130			0.19	0.030		0.40	0.2
EXP5	2ab	M <sup>2</sup>	F	k <sub>r</sub>	D	ρ <sub>f</sub>	C <sub>d</sub>	v <sub>i</sub>	R <sub>e</sub>	μ(P)	T °C
ENS17	6.373	19998.20	23286.27	8.7203	2.52	0.894	3.91	36.513	11.25	7.31	18.6
ENS18	6.247	19998.20	23286.27	8.3792	2.52	0.894	3.76	36.613	11.92	6.92	18.6
ENS19	6.426	19998.20	23286.27	8.8654	2.52	0.894	3.98	37.001	10.95	7.61	18.5
ENS20	6.254	19998.20	23286.27	8.3966	2.52	0.894	3.77	36.868	11.90	6.98	18.6
PROM.				8.5904			3.85	36.749		7.21	18.6
DESV.				0.2413			0.11	0.225		0.32	0.1

Fuente: Elaboración Propia

**Harina – agua (mazamorra)**, es una mezcla entre harina y agua, que al ser calentada a temperaturas entre 90°C a 100°C forma una sustancia “homogénea” viscosa. Esta propiedad, interés de la investigación, es la que se pretende estimar en base a la experimentación.

El procedimiento efectuado para muestra estudiada sigue la misma secuencia indicada para el Aceite SAE 40, vale decir las ecuaciones utilizadas para el análisis están basadas en la Ec. 3.4 y por consiguiente la Ec. 3.5.

La muestra estudiada (Harina – agua), contó con los EXP1,...EXP5 que corresponden a los ENS1, ENS2, ENS3, ENS4,...ENS17, ENS18, ENS19, ENS20 respectivamente. El rango de temperatura en la que fue realizada la experiencia fluctúan en promedio entre los 62.1°C y 64.3°C

En las Figura 3.17a y Figura 3.17b, solo por mostrar la metodología, se muestran los EXP2 y EXP3, siguiendo el mismo criterio con los demás EXP que se encuentran detallados en el Anexo II – B.

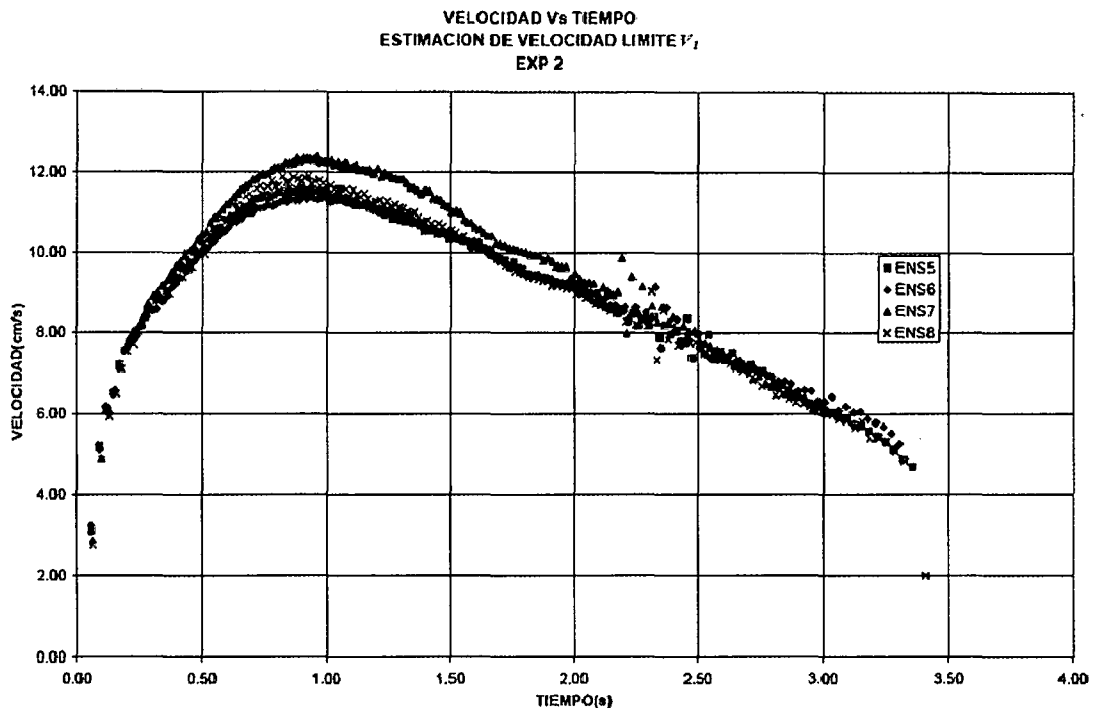


FIGURA 3.17a Harina – Agua para el EXP2  
Fuente: Elaboración Propia



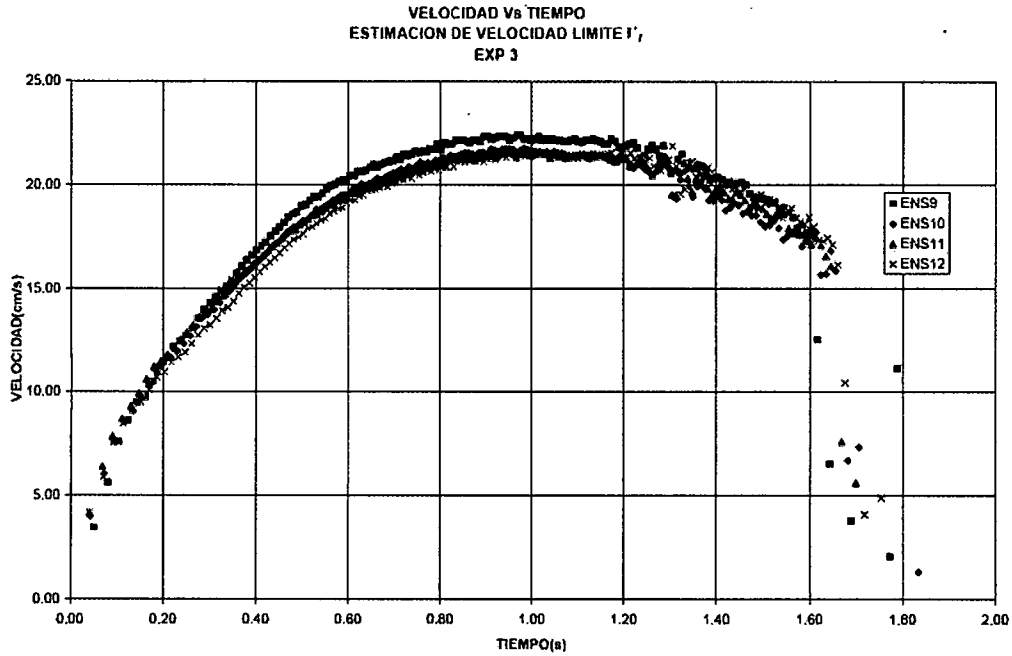


FIGURA 3.17b Harina – Agua para el EXP3  
Fuente: Elaboración Propia

Para la determinación de la viscosidad de la sustancia Harina – Agua, se analizaron los EXP1, EXP2, EXP3, EXP4 y EXP5. El EXP1 no presenta una correlación adecuada por ser muy disperso los puntos obtenidos. La dispersión se muestra en la Figura 3.17c.

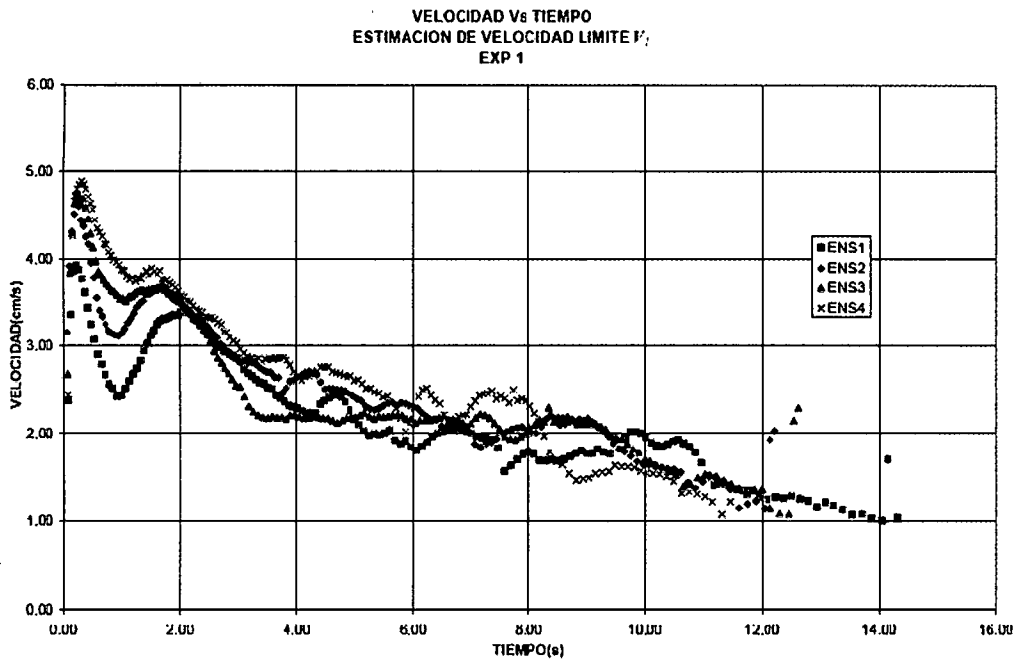


FIGURA 3.17c Harina – Agua para el EXP1  
Fuente: Elaboración Propia

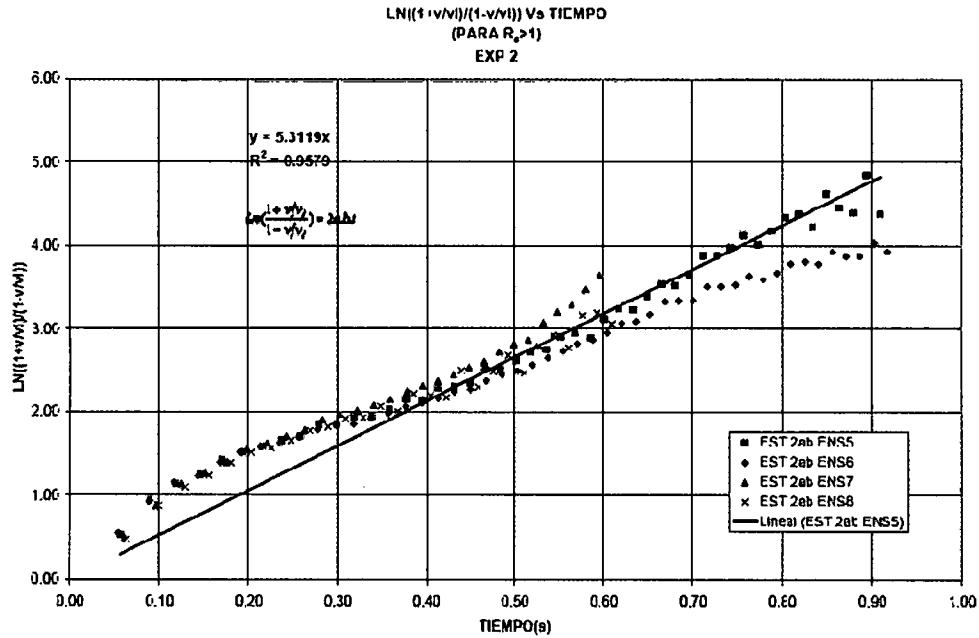


FIGURA 3.18a Harina – agua, estimación 2a.b para el EXP2  
 Fuente: Elaboración Propia

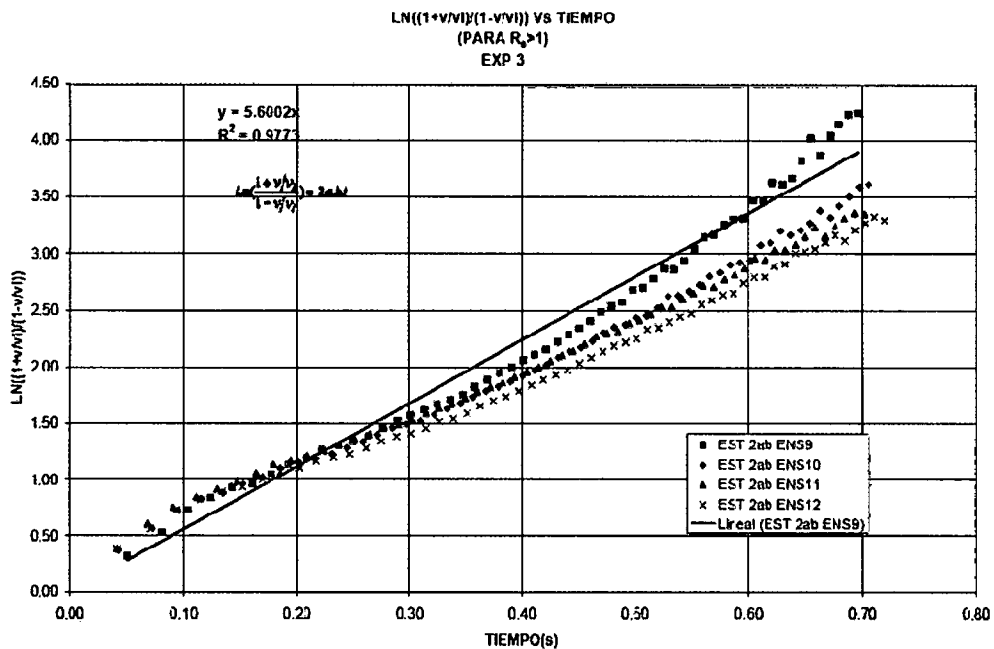


FIGURA 3.18b Harina – agua, estimación 2a.b para el EXP3  
 Fuente: Elaboración Propia

En el Cuadro 3.6, se muestran los valores de la viscosidad, obtenidas bajo el concepto planteado en la Ec. 3.5. Las Figura 3.18a y Figura3.18b, muestra la tendencia de las curvas, siendo analizada cada una de ellas que permita obtener el valor de 2a.b y por consiguiente obtener el valor de la viscosidad siguiendo el procedimiento ya descrito anteriormente.

**CUADRO 3.6**  
**ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE ( $C_d$ ) Y VISCOSIDAD ( $\mu$ ):**  
**Harina – Agua**

EXP	$\ln((1+v/v_i)/(1-v/v_i))=2ab.t$			$K_f=a^2b^2M^2/F$ , Tambien $C_d=2.K_f/(\rho_f.A)$				$C_d=24/R_e+6/(1+R_e^{0.5})+0.4$ , VISC. $\mu$			
	2ab	M <sup>2</sup>	F	$k_f$	D=2R	$\rho_f$	$C_d$	$v_i$	$R_e$	$\mu(P)$	T °C
EXP1											
ENS1	s/corr				2.22	1.120					
ENS2	s/corr				2.22	1.120					
ENS3	s/corr				2.22	1.120					
ENS4	s/corr				2.22	1.120					
PROM.	s/corr				2.22	1.120					
DESV.											
EXP2											
ENS5	5.312	11873.37	12790.61	6.5482	2.22	1.120	3.02	11.615	<b>16.70</b>	<b>1.73</b>	<b>63.5</b>
ENS6	4.817	11873.37	12790.61	5.3856	2.22	1.120	2.48	11.346	<b>23.00</b>	<b>1.23</b>	<b>63.5</b>
ENS7	5.977	11873.37	12790.61	8.2901	2.22	1.120	3.82	12.348	<b>11.64</b>	<b>2.64</b>	<b>62.4</b>
ENS8	5.476	11873.37	12790.61	6.9578	2.22	1.120	3.21	11.888	<b>15.10</b>	<b>1.96</b>	<b>62.6</b>
PROM.				<b>6.7954</b>	2.22	1.120	<b>3.13</b>	<b>11.799</b>	<b>15.80</b>	<b>2.11</b>	<b>63.0</b>
DESV.				1.1985			0.55				
EXP3											
ENS9	5.600	11150.30	16087.35	5.4344	2.22	1.120	2.51	22.259	<b>22.50</b>	<b>2.46</b>	<b>62.9</b>
ENS10	4.986	11150.30	16087.35	4.3077	2.22	1.120	1.99	21.703	<b>33.80</b>	<b>1.60</b>	<b>63.0</b>
ENS11	4.879	11150.30	16087.35	4.1246	2.22	1.120	1.90	21.507	<b>37.00</b>	<b>1.45</b>	<b>63.3</b>
ENS12	4.620	11150.30	16087.35	3.6990	2.22	1.120	1.71	21.505	<b>45.00</b>	<b>1.19</b>	<b>63.1</b>
PROM.				<b>4.3914</b>	2.22	1.120	<b>2.03</b>	<b>21.744</b>	<b>32.70</b>	<b>1.88</b>	<b>63.1</b>
DESV.				0.7406			0.34				
EXP4											
ENS13	5.341	10449.95	19384.08	3.8446	2.22	1.120	1.77	32.844	<b>42.00</b>	<b>1.94</b>	<b>62.9</b>
ENS14	4.705	10449.95	19384.08	2.9833	2.22	1.120	1.38	32.101	<b>70.00</b>	<b>1.14</b>	<b>63.0</b>
ENS15	4.877	10449.95	19384.08	3.2054	2.22	1.120	1.48	32.832	<b>60.70</b>	<b>1.34</b>	<b>62.7</b>
ENS16	4.489	10449.95	19384.08	2.7154	2.22	1.120	1.25	32.357	<b>88.00</b>	<b>0.91</b>	<b>62.2</b>
PROM.				<b>3.1872</b>	2.22	1.120	<b>1.47</b>	<b>32.534</b>	<b>61.00</b>	<b>1.51</b>	<b>62.7</b>
DESV.				0.4819			0.22				
EXP5											
ENS17	5.177	9768.36	22700.39	2.8836	2.22	1.120	1.33	43.514	<b>76.00</b>	<b>1.42</b>	<b>62.7</b>
ENS18	5.038	9768.36	22700.39	2.7309	2.22	1.120	1.26	44.695	<b>86.00</b>	<b>1.29</b>	<b>61.2</b>
ENS19	5.226	9768.36	22700.39	2.9380	2.22	1.120	1.36	44.786	<b>73.00</b>	<b>1.53</b>	<b>61.8</b>
ENS20	4.414	9768.36	22700.39	2.0961	2.22	1.120	0.97	44.695	<b>170.00</b>	<b>0.65</b>	<b>62.5</b>
PROM.				<b>2.6622</b>	2.22	1.120	<b>1.23</b>	<b>44.423</b>	<b>92.00</b>	<b>1.20</b>	<b>62.1</b>
DESV.				0.3874			0.18				

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2 RELAVE MINERO

En esta parte de la investigación, no se pretende dar una definición de relave ni los procesos mineros por la que pasa el mineral, pero si se dará algunos alcances de lo que es el relave.

Los **Relaves**, es el material de desecho, producto de los procesos mineros y concentrados de minerales, que por el mismo proceso de obtención del mineral, contiene altas concentraciones de químicos y otros elementos tóxicos. Estos desechos sólidos de tamaño entre arena y limo, son transportados y depositados en forma de lodo, que por lo general vienen a ser una mezcla de suelo, mineral, roca y agua.

Los relaves por ser desechos tóxicos y contener altas concentraciones de elementos químicos, son agentes que fácilmente alteran el medio ambiente, por lo que los mecanismos de transporte y almacenamiento se manejan siguiendo normas ambientales y de seguridad. Entonces, el transporte y almacenamiento de este tipo de material requiere de un tratamiento especial debido a los altos costos para su manejo, esto motiva a las compañías mineras a ubicar a los “depósitos de relave” lo más cerca posible a la planta de procesamiento de minerales, consiguiendo con esto minimizar costos de transportes y reutilizar el agua contenida.

Los mecanismos de transportes de los relaves utilizados comúnmente en la industria minera, es por medio de canales, que aprovechando la topografía de la zona se canaliza para su transporte al depósito final (depósito de relaves). El transporte por medio de tubería, es el otro tipo de transporte, para ello utilizan estaciones de bombeo que permiten transportar a los depósitos de relaves respectivos; comúnmente este tipo de transporte utiliza una combinación entre sistemas de canales y sistemas de tuberías.

El manejo de relaves, en especial en el almacenamiento, es una operación importante para la recuperación del agua, la misma que es reutilizada y usada también para otros fines. Con la recuperación del agua en los “depósitos de relaves”, se reduce las filtraciones hacia el subsuelo evitando de esta manera que éstas lleguen a las napas subterráneas.

Para la investigación realizada, se contó con muestras de relave de la mina **Cobriz**, perteneciente a la firma Doe Run Perú. Esta Minera se encuentra ubicada a 390 kilómetros al sudeste de La Oroya, en el distrito de San Pedro de Coris, provincia de Churcampa, región Huancavelica.

La muestra de relave estudiada, fue proporcionada al Laboratorio Nacional de Hidráulica en depósitos de barriles sellados, esto para mantener y conservar, en lo posible, inalterada la muestra.

Se efectuaron los ensayos básicos para la caracterización física del relave, vale decir, se determinó la densidad de sólidos y la granulometría. Esto con la finalidad de tener un control en las concentraciones para la mezcla sólido – líquido (relave), que permita la experimentación de la muestra a diferentes concentraciones tanto en peso como en volumen.

El ensayo para determinar la **densidad de sólidos**, se encuentra descrita en el capítulo anterior (Medida de la densidad), la misma que sigue los procedimientos indicados en la norma ASTM 854. En la Figura 3.19 se muestra el ensayo por el método del picnómetro.



FIGURA 3.19 Ensayo para determinar la densidad de sólidos por el método del picnómetro.

Fuente: Elaboración Propia

El ensayo para la determinación de la **granulometría**, se efectuó por el método del hidrómetro, siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D 422. En la Figura 3.20, se muestra el ensayo realizado.

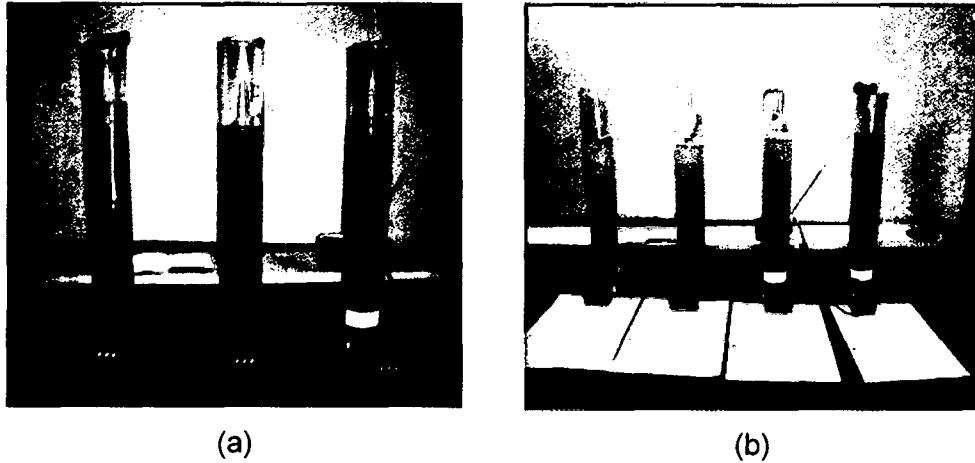


FIGURA 3.20 a) Lectura con el hidrómetro, b) Lectura de la temperatura.

Fuente: Elaboración Propia

La determinación de las características físicas descritas, son importantes para la caracterización reológica, por ser el punto de partida de los ensayos básicos requeridos en esta investigación.

Es necesario señalar que se pueden efectuar otros ensayos adicionales que permitan tener mayor información de las propiedades físicas y químicas del relave estudiado, esto dependerá de la mayor o menor incidencia del parámetro (físico o químico) en la caracterización reológica analizada. Para el caso de la investigación solo se ha optado por efectuar los ensayos ya descritos.

### 3.2.1 Instrumental de Medición reológica Caída de Varilla

El uso del instrumental reológico a nivel de prototipo, es el paso siguiente para la caracterización reológica, pero esto implica desarrollar una serie de procesos previos, que permita establecer o controlar algunos parámetros, en especial para este caso, la concentración (concentración en peso o volumen) para el análisis respectivo, es decir caracterizar la muestra a diferentes concentraciones. Se describe en forma resumida el proceso seguido en el laboratorio para el control de las concentraciones de la muestra estudiada

La muestra de relave se extrajo del barril herméticamente cerrada, para ello previamente se extrajo el agua, para luego ser secada en el horno, se extrajo un total de 120kg de material en promedio, esto para realizar ensayos de densidad, análisis granulométrico y finalmente el ensayo reológico. La Figura 3.21 presenta el proceso para el secado de la muestra.

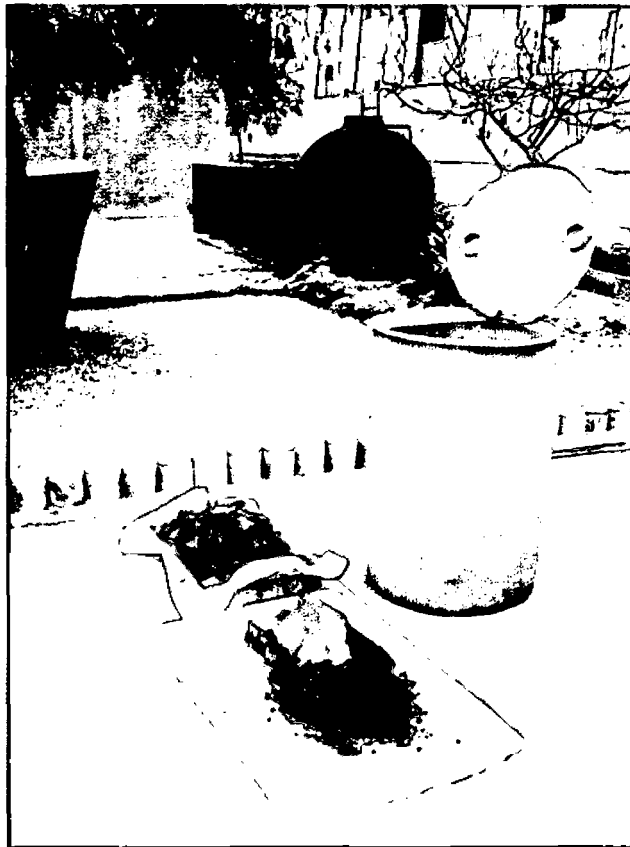


FIGURA 3.21a Extracción de la muestra del depósito de barril hermético después de haber sacado el agua

Fuente: Elaboración Propia

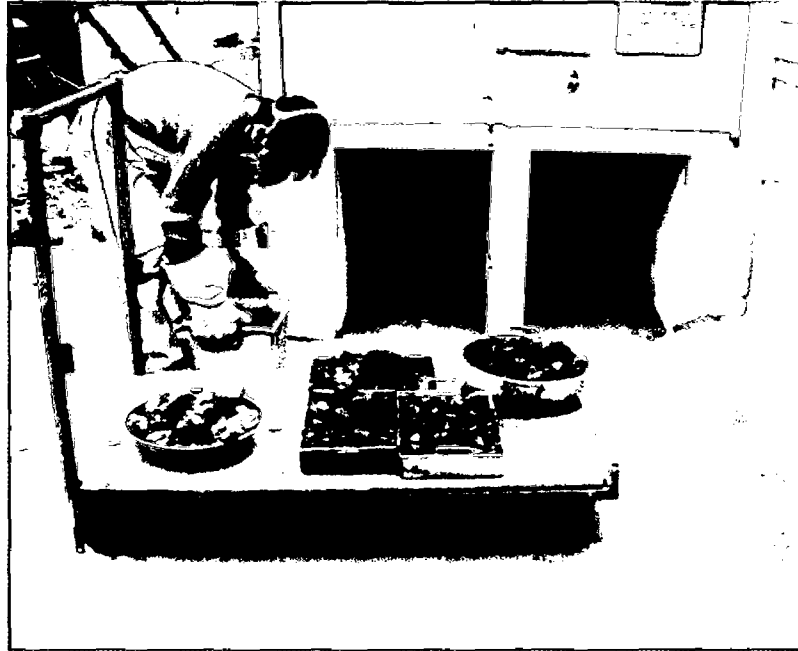


FIGURA 3.21b Muestra seca en el horno eléctrico del Laboratorio Nacional de Hidráulica.

Fuente: Elaboración Propia

La muestra seca, pasó a un proceso de molienda la misma que se efectuó manualmente. Para este proceso de molienda se tomaron todas las medidas de seguridad para evitar, en lo posible, la contaminación.



FIGURA 3.22a Molienda inicial.

Fuente: Elaboración Propia





FIGURA 3.22b Tamizado inicial.

Fuente: Elaboración Propia

La muestra después de realizado el proceso de molienda, tal como se observa en la Figura 3.22a y Figura 3.22b, se encuentra lista para el mezclado y control de las concentraciones. En la Figura 3.22c la muestra se encuentra finalmente molida.

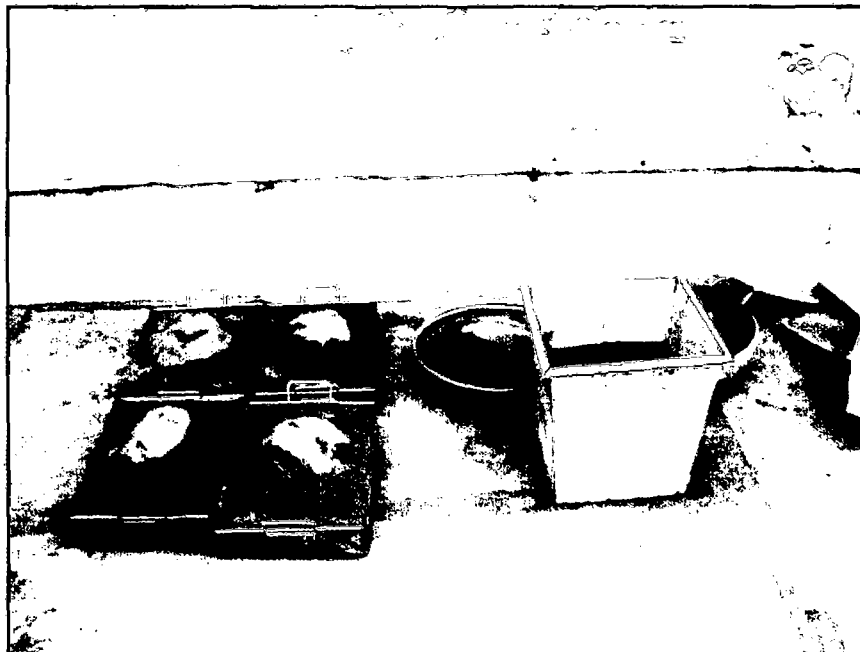


FIGURA 3.22c Molienda final.

Fuente: Elaboración Propia

Las concentraciones ensayadas, estuvieron en función, de la trabajabilidad característica de cada muestra, en la cantidad de 120Kg en promedio, mezclado en mezcladora de 1.5 pie<sup>3</sup> aproximadamente y del equipo reológico (volumen requerido 40 litros en promedio). En la Figura 3.23 se muestra el equipo de mezclado.

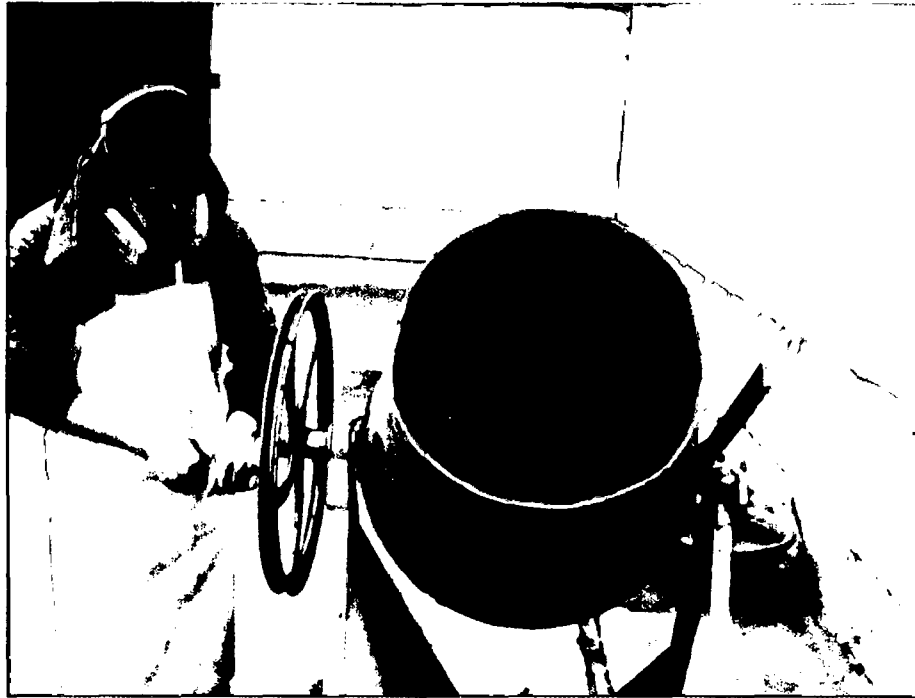


FIGURA 3.23 Proceso de mezclado de la muestra.  
Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 3.7  
CONCENTRACIONES EN PESO ( $C_w$ ) Y EN VOLUMEN ( $C_v$ )  
EXPERIMENTADAS EN RELAVE ( $\rho_s=3.66$  g/cc)

MUESTRA	EXPERIMENTO	ENSAYOS	$\rho_m$ g/cc	$C_w$ %	$C_v$ %
Relave	EXP 1	ENS1 al ENS9	2.31	79.01%	49.88%
	EXP 2	ENS1 al ENS3	2.28	77.51%	48.39%
	EXP 3	ENS1 al ENS3	2.25	76.91%	47.37%
	EXP 4	ENS1 al ENS3	2.15	74.50%	43.73%
	EXP 5	ENS1 al ENS8	2.16	74.41%	43.95%
	EXP 6	ENS1 al ENS4	2.09	73.26%	41.93%
	EXP 7	ENS1 al ENS4	2.01	70.87%	38.91%
	EXP 8	ENS1 al ENS6	1.94	67.54%	35.80%
	EXP 9	ENS1 al ENS7	1.83	65.17%	32.65%
	EXP 10	ENS1 al ENS6	1.80	63.37%	31.10%

Fuente: Elaboración Propia

En el Cuadro 3.7 se encuentra las concentraciones que se obtuvieron en el proceso experimental realizado, siendo estos valores el rango donde la muestra de relave permite ser trabajable y el equipo de medición reológica, en la mayoría de los EXP, logra interactuar con la muestra.

Finalmente con el prototipo instrumental de caída de varilla, se realizaron las experimentos con relave minero a diferentes concentraciones de partículas sólidas.

### Reómetro de caída de varilla

El mecanismo de movimiento del equipo instrumental, al igual que el de caída de esfera, se basa en el principio de la máquina de Atwood. El instrumental, en uno de sus extremos sostiene una varilla de masa ( $m_1$ ) y en el otro extremo sostiene una masa ( $m_2$ ) que es controlada de acuerdo a la interacción que ocurre entre la muestra de relave – varilla. Las dimensiones de las varillas y su masa, se encuentra indicada en el Cuadro 3.8.

CUADRO 3.8  
DIMENSIONES DE LA VARILLA DE ALUMINIO

Masa	Código	Descripción	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Peso (gr)
$m_1$	VA 1.1	Varilla de Aluminio	1.58	65.00	336.00
	VA 1.2	Varilla de Aluminio	1.24	65.00	210.04

Fuente: Elaboración Propia

Las masas de  $m_2$ , son las mismas que se indican en el Cuadro 3.2

El planteamiento físico para la obtención de la propiedad física de la muestra, se encuentra desarrollada en el capítulo anterior, referida a la **Medida del Esfuerzo de Corte y Medida de la Gradiente de Velocidad, Velocidad de deformación Angular**. Haciendo uso de la Ec. 2.36, experimentalmente se determina la fuerza de rozamiento  $\Delta F_r$  y para el cálculo de la gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}_R$ ) se emplea la Ec. 2.37. Las ecuaciones ya desarrolladas, como se indicó, en el orden respectivo, son los siguientes:

$$\Delta F_{r(t)} = (m_1 - m_2).g - (m_1 + m_2 + 0.5m_D).a_{(t)} - \Delta E_{(t)} - E_{(0)} - F_{pa}; \text{ y}$$

$$\dot{\gamma}_R = \frac{v}{R(1-k)}$$

Los experimentos realizados con la muestra de relave, se efectuaron de acuerdo a las concentraciones pre establecidas, las mismas que se encuentran indicadas en el Cuadro 3.7. La secuencia experimental con el relave fue el siguiente: se inicio con la mayor concentración, para el siguiente experimento progresivamente se fue rebajando la concentración con el incremento de agua a la muestra mezclada. De esta forma se efectuó la experimentación, rebajando la concentración, respecto al anterior con el incremento de agua. En la Figura 3.24 se muestra el ensayo realizado para el relave.

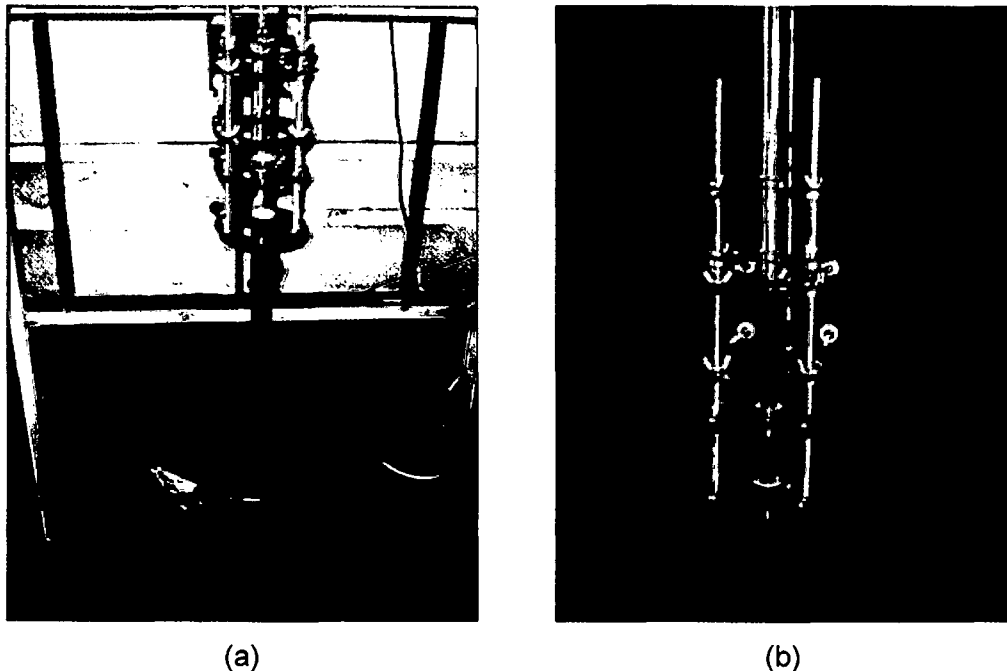


FIGURA 3.24 (a) Caída de Varilla y (b) Varilla sumergida en el relave.

Fuente: Elaboración Propia

El Reómetro de caída de varilla, consta de una varilla de aluminio VA1.1 de 1.58 cm de diámetro que actúa como elemento móvil y un tubo de vidrio de 2.50 cm de diámetro como dispositivo fijo. En la Figura 3.24 se muestra el equipo.

La secuencia experimental realizada para el relave minero, siguió el orden indicado en el Cuadro 3.7, obteniéndose para cada experimento (EXP 1 al EXP 10) la información del registro de la data proporcionada por el equipo

instrumental. En el Anexo II – C se encuentra el procesamiento de la data y los resultados respectivos.

En el análisis de la información, se emplearon las gráficas experimentales **Velocidad Vs Tiempo**, para obtener, en base a la data, la expresión algebraica que describe el movimiento de la Varilla en interacción con la muestra de relave. Derivando la expresión algebraica del movimiento, se obtiene la aceleración para cualquier instante del movimiento. La expresión o relación algebraica de la aceleración obtenida, y las masas que interactúan en el mecanismo de movimiento, permiten determinar las fuerzas actuantes en el mecanismo de movimiento, para ello se empleó la Ec. 2.37, como ya se explicó anteriormente.

Del análisis descrito anteriormente, se obtienen los esfuerzos que se manifiestan en el contacto varilla – relave, por lo que conocida la velocidad de deformación, se elabora el **Reograma**. Para cada experimento se elaboró su respectivo Reograma de acuerdo a las concentraciones indicadas en el Cuadro 3.7.

Solo por cuestiones de explicación se presentan los resultados de algunos de los experimentos que a elección del investigador resultan los más representativos, siendo estos experimentos correspondientes a los EXP1, EXP2, EXP5 y EXP10, mostrándose para cada una de ellas las graficas de **Velocidad Vs Tiempo** y el **Reograma**.

El experimento EXP1 fué ensayada para una concentración en peso  $C_w=79.01\%$ . En las figuras Figura 3.25 y Figura 3.26 muestran la gráfica Velocidad Vs Tiempo y el Reograma respectivamente para el ensayo ENS4 del experimento EXP1.

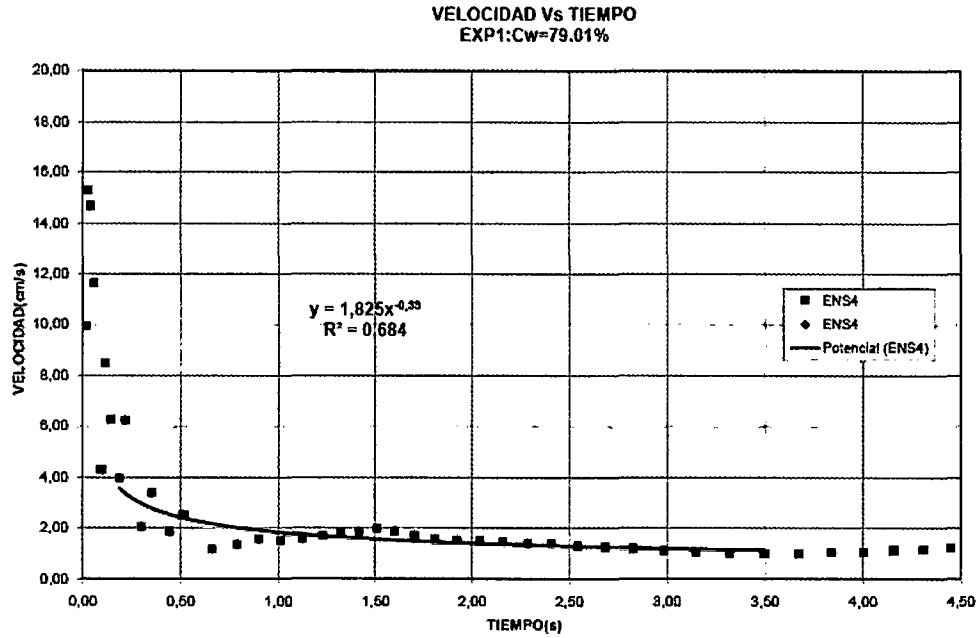


FIGURA 3.25 Expresión algebraica que relaciona velocidad y tiempo.

Fuente: Elaboración Propia

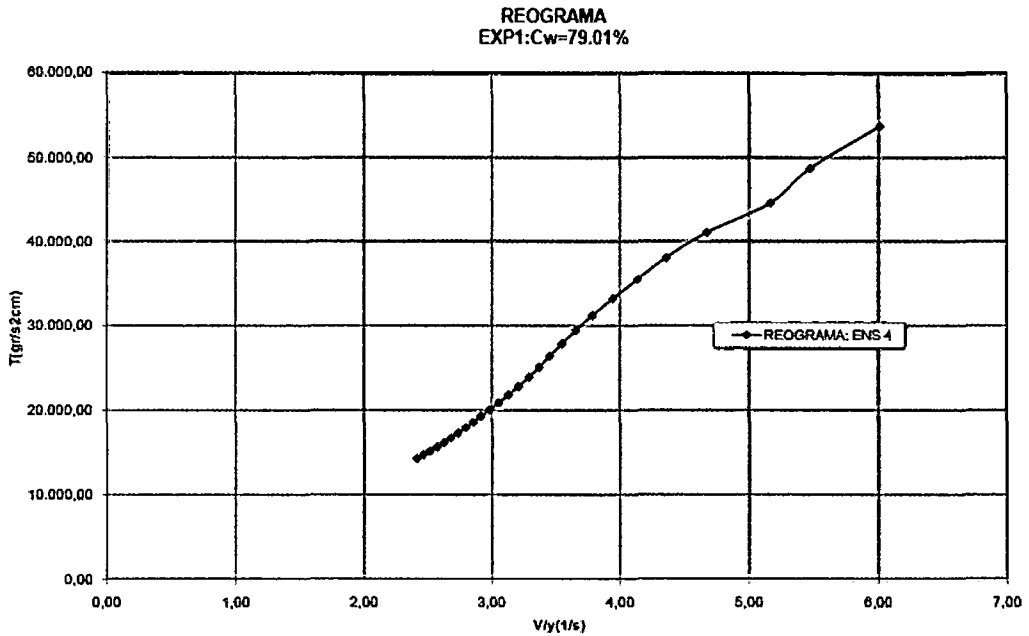


FIGURA 3.26 Reograma del ensayo ENS4 del experimento EXP1.

Fuente: Elaboración Propia

El experimento EXP2 se ensayó para una concentración en peso  $C_w=77.51\%$ . En las figuras Figura 3.27 y Figura 3.28 muestran la gráfica Velocidad Vs Tiempo y el Reograma respectivamente para el ensayo ENS1 del experimento EXP2.

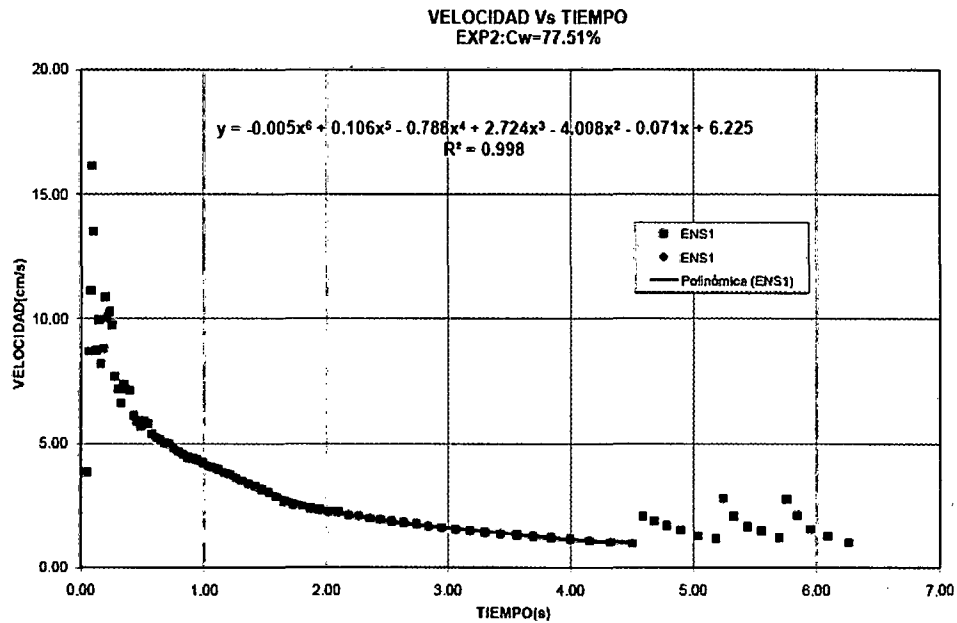


FIGURA 3.27: Expresión que relaciona velocidad y tiempo.

Fuente: Elaboración Propia

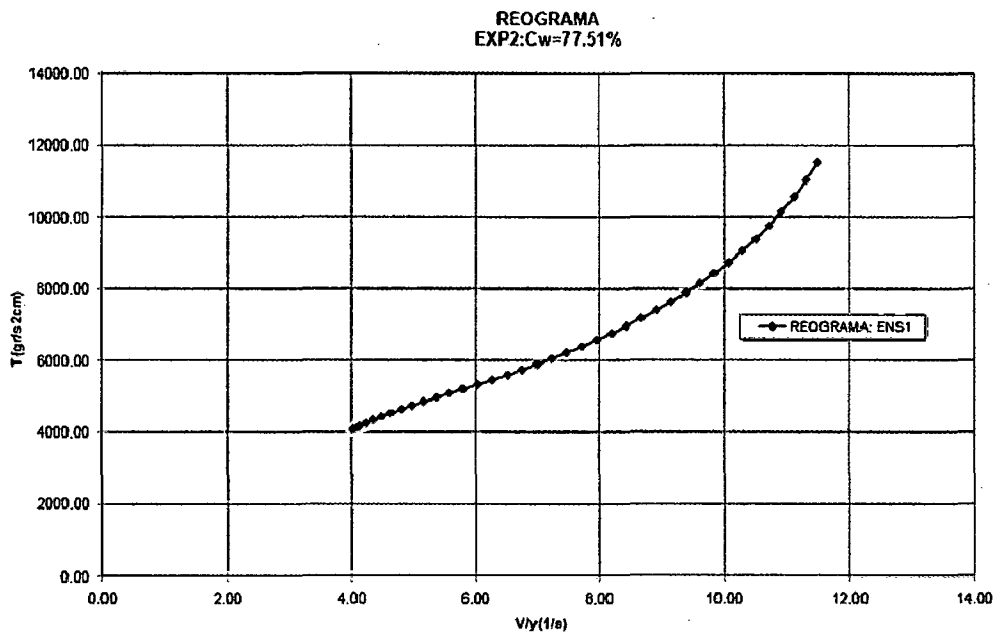


FIGURA 3.28 Reograma del ensayo ENS1 del experimento EXP 2.

Fuente: Elaboración Propia

El experimento EXP5 se ensayó para una concentración en peso  $C_w=74.41\%$ . En las figuras Figura 3.29 y Figura 3.30 muestran la gráfica Velocidad Vs Tiempo y el Reograma respectivamente para el ensayo ENS6 del experimento EXP5.

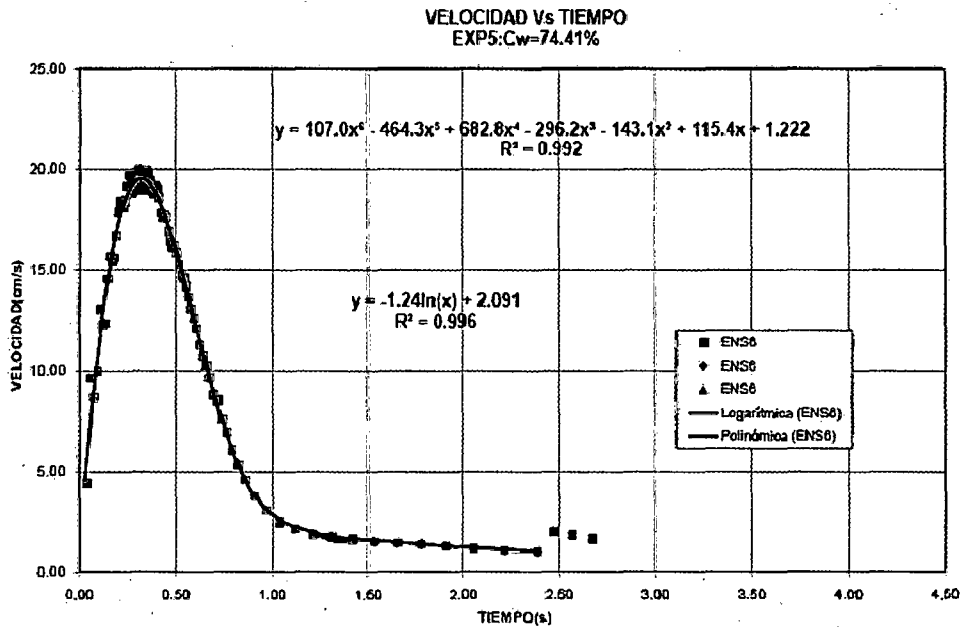


FIGURA 3.29 Expresiones que relacionan velocidad y tiempo.

Fuente: Elaboración Propia

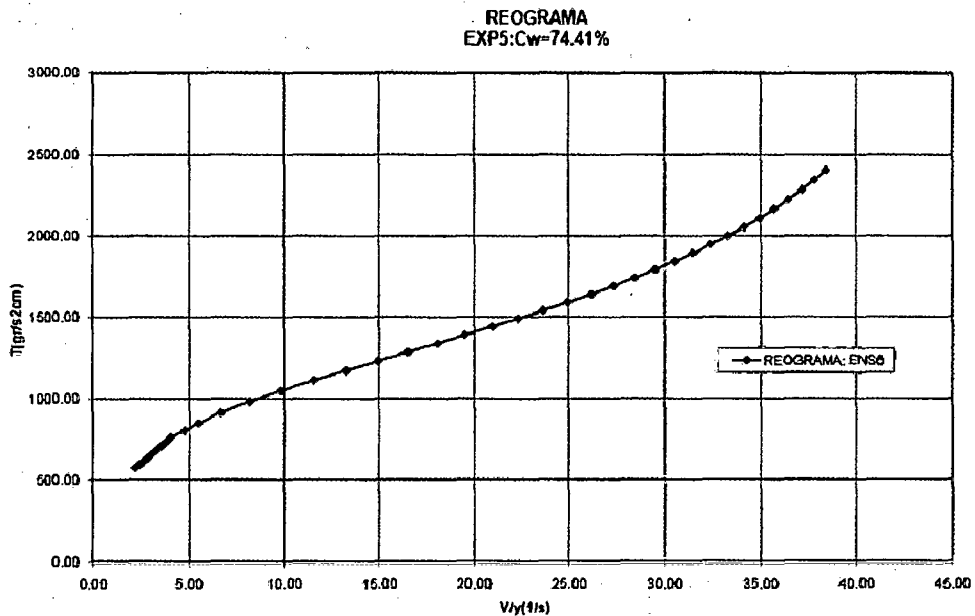


FIGURA 3.30 Reograma del ensayo ENS6 del experimento EXP5.

Fuente: Elaboración Propia



El experimento EXP10 se ensayó para una concentración en peso  $C_w=63.37\%$ . En las figuras Figura 3.31 y Figura 3.32 muestran la gráfica Velocidad Vs Tiempo y el Reograma respectivamente para el ensayo ENS1 del experimento EXP10.

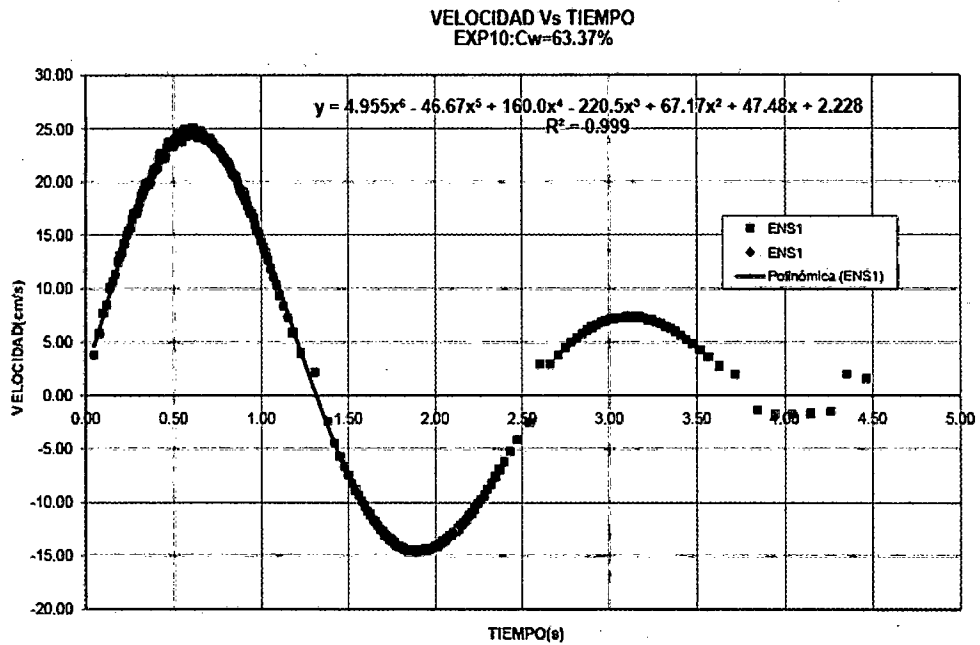


FIGURA 3.31 Expresión que relaciona velocidad y tiempo.  
Fuente: Elaboración Propia

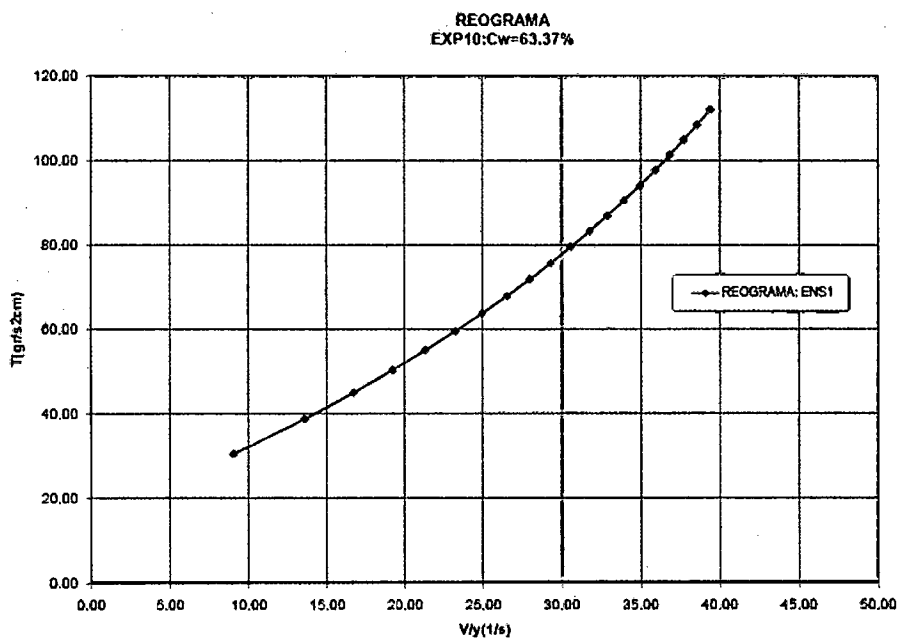


FIGURA 3.32 Reograma del ensayo ENS1 del experimento EXP10.  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.2 Caracterización reológica

Con la elaboración y construcción de reogramas de las muestras ensayadas con el reómetro de Caída de Varilla (Reometría), se logra estimar en forma experimental los valores del **esfuerzo de cedencia** y la **viscosidad dinámica**  $\mu$ . Este procedimiento de análisis e interpretación gráfica, permite caracterizar reológicamente las muestras ensayadas.

El Reograma, viene a ser la representación gráfica experimental de la relación **Esfuerzos de Corte ( $\tau$ ) Vs Velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ )**, esta gráfica se obtiene del procesamiento de la data obtenida del equipo instrumental (respuesta de la interacción muestra – dispositivo) asociada a las propiedades físicas de la muestra (Densidad, Concentración).

El **Esfuerzo de cedencia** ( $\tau_y$ ), como ya se explicó, se encuentra en las proximidades de iniciación del movimiento, obteniéndose al extender una recta a la curva generada en el reograma que intercepte con el eje de esfuerzos de corte ( $\tau$ ) La **Viscosidad dinámica** ( $\mu$ ), se determina por la pendiente de la recta tangente a la curva ( $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$ ) generada en el reograma. En la Figura 3.33 se esquematiza el procedimiento gráfico para la obtención de los parámetros reológicos.

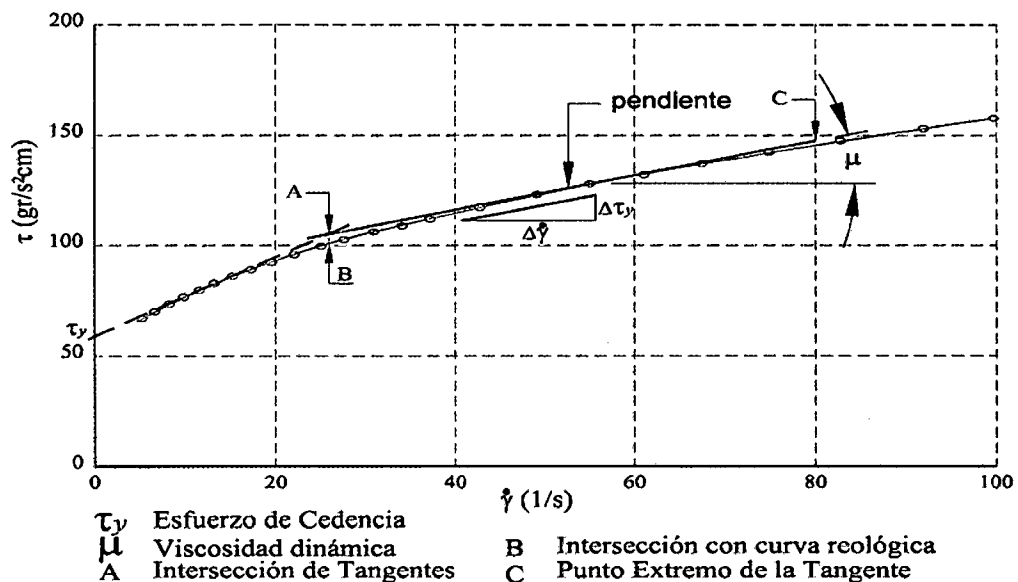


FIGURA 3.33 Procedimiento gráfico para obtener los parámetros reológicos

Fuente: Elaboración Propia

De los experimentos realizados, se muestran los resultados en los Reogramas, las mismas que han sido agrupadas en Experimento (EXP). El agrupamiento de los experimentos va asociado a las concentraciones de las muestras estudiadas.

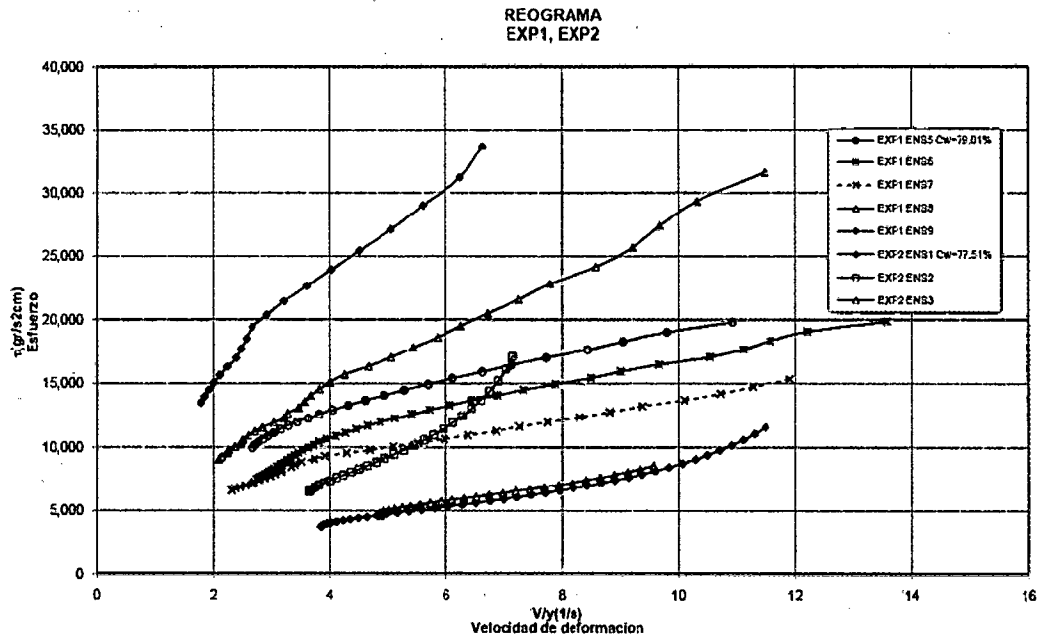


FIGURA 3.34 Reograma de los experimentos EXP 1, EXP 2  
Fuente: Elaboración Propia

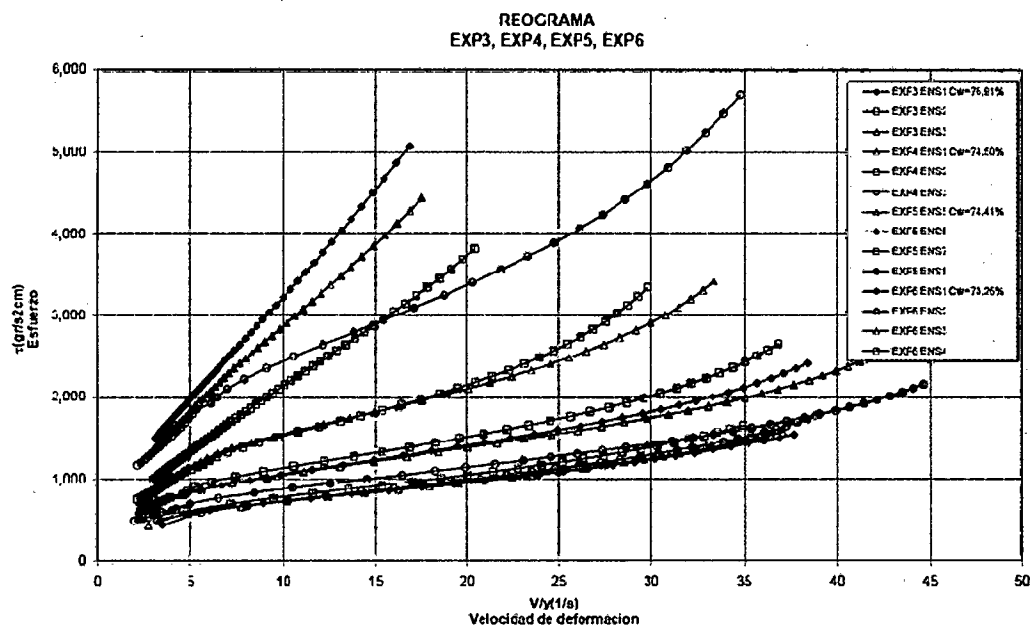


FIGURA 3.35 Reograma de los experimentos EXP 3, EXP 4,  
EXP 5, EXP 6  
Fuente: Elaboración Propia

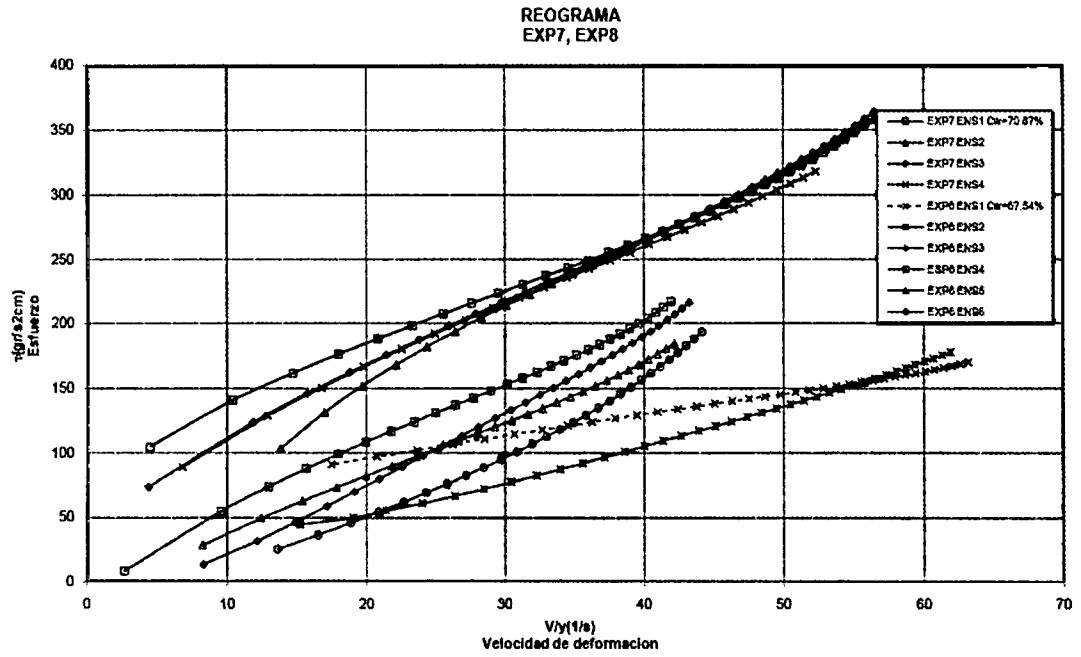


FIGURA 3.36 Reograma de los experimentos EXP 7, EXP 8  
Fuente: Elaboración Propia

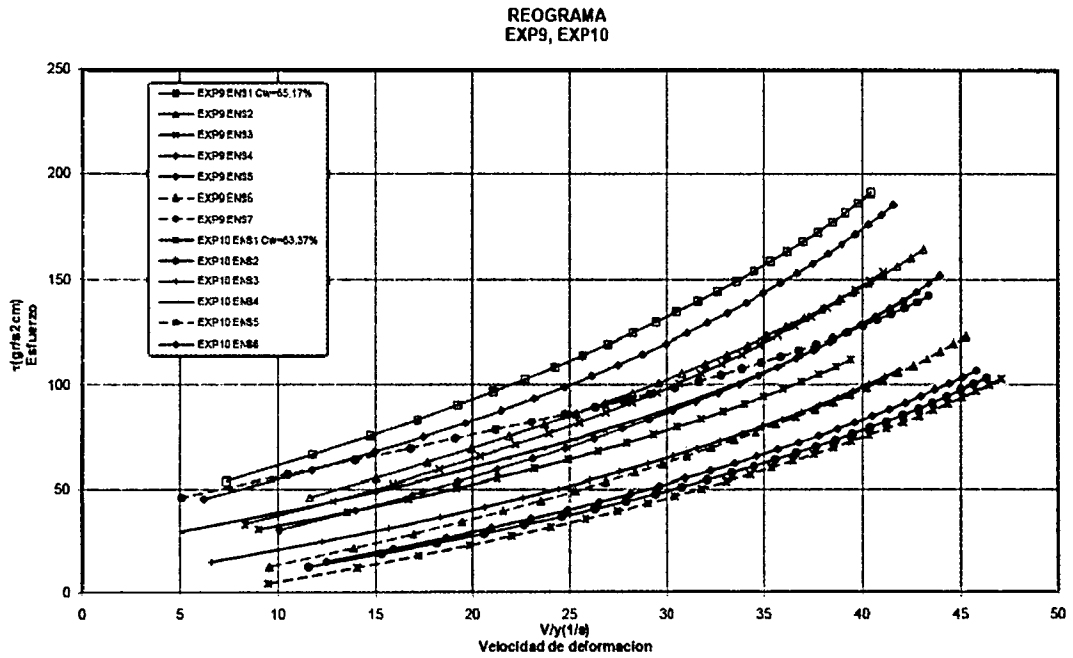


FIGURA 3.37 Reograma de los experimentos EXP 9, EXP 10  
Fuente: Elaboración Propia

Se ha estimado gráficamente, de los reogramas, los parámetros reológicos de los experimentos realizados para diferentes concentraciones. Para ello, los valores estimados de  $\tau_y$ , A, B y C, en base al procedimiento gráfico indicado en la Figura 3.33, son las que se presenta en el Cuadro 3.9.

CUADRO 3.9  
ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS PARTE 1

EXP.	ENSAYO	C <sub>w</sub> (%)	$\tau_y$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	INTERSECCIÓN (A)			VISCOSIDAD DINÁMICA			PTO. EXTREMO (C)	
				V/y (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	Curva (B)	$\Delta V/y$ (s <sup>-1</sup> )	$\Delta \tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	$\mu$ (poise)	V/y (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (dinas/cm <sup>2</sup> )
EXP1	ENS5	79.01	6,500	4.50	13,800	13,500	4.90	5,000	1,020.41	10.8	20,200
	ENS6		5,500	5.00	12,300	12,300	5.40	5,000	925.93	12.0	17,800
	ENS7		6,500	3.50	8,844		6.80	5,000	735.29	12.0	15,200
	ENS8		7,000	3.50	13,553		6.40	5,000	781.25	9.6	18,500
EXP2	ENS1	77.51	1,800	4.00	4,076		3.40	2,000	588.24	8.0	6,500
	ENS2						3.10	2,000	645.16	5.6	10,400
	ENS3		1,800	5.01	5,060		3.00	2,000	666.67	8.4	7,300
EXP3	ENS1	76.91	750	3.00	1,500		2.00	500	250.00	14.0	4,250
	ENS2		550	2.96	997		2.20	500	227.27	20.0	4,750
	ENS3		750	2.68	1,290		2.40	500	208.33	14.0	3,700
EXP4	ENS1	74.50	400	6.20	1,350	1,300	5.50	300	54.55	25.0	2,350
	ENS2		450	5.90	1,280	1,220	8.00	500	62.50	25.0	2,450
	ENS3		700	6.50	2,120	2,050	8.40	500	59.52	25.0	3,200
EXP5	ENS5	74.41	360	4.60	880	820	15.00	500	33.33	30.0	1,720
	ENS6		340	5.20	880	840	14.00	500	35.71	30.0	1,780
	ENS7		350	5.80	980	950	13.70	500	36.50	25.0	1,680
	ENS8		350	5.80	770	730	18.20	500	27.47	30.0	1,420
EXP6	ENS1	73.26	200	6.30	640	620	8.20	200	24.39	30.0	1,220
	ENS2		380	6.20	660	650	7.50	200	26.67	30.0	1,260
	ENS3		240	5.20	600	590	8.00	200	25.00	25.0	1,090
	ENS4		440	8.70	750	740	7.50	200	26.67	25.0	1,190
EXP7	ENS1	70.87	70	11.00	150	145	12.50	50	4.00	48.0	300
	ENS2		10	23.80	185	178	10.00	50	5.00	52.0	325
	ENS3		45	15.00	145	140	10.50	50	4.76	50.0	315
	ENS4		45	16.80	155	150	11.00	50	4.55	54.0	325
EXP8	ENS1	67.54	55	25.00	107	104	30.50	50	1.64	62.0	165
	ENS2			19.00	49.5		17.00	50	2.94	54.0	145
	ENS3			8.30	13.5		8.80	50	5.68	39.0	183
	ENS4		5	17.00	96	93	11.70	50	4.27	35.0	173
	ENS5			8.30	28.7		12.40	50	4.03	35.0	145
	ENS6			13.60	25.2		11.50	50	4.35	31.0	100
EXP9	ENS1	65.17	27	7.30	53.5		15.20	50	3.29	25.0	110
	ENS2		13	11.60	45.9		17.50	50	2.86	27.0	90
	ENS3		8	8.30	32.9		17.50	50	2.86	27.0	85
	ENS4		5	10.00	30.2		19.50	50	2.56	26.0	72
	ENS5		25	6.20	45.1		17.50	50	2.86	25.0	96
	ENS6			9.60	12.4		19.00	50	2.63	33.0	70
	ENS7		35	5.10	45.8		24.20	50	2.07	33.0	102
EXP10	ENS1	63.37	30	9.00	30.6		9.70	20	2.06	26.0	65
	ENS2			11.50	12.4		9.70	20	2.06	34.0	57
	ENS3			6.60	14.9		8.30	20	2.41	32.0	69
	ENS4			5.00	29.6		7.80	20	2.56	30.0	86
	ENS5			9.50	4.4		9.30	20	2.15	32.0	50
	ENS6			12.40	15		9.00	20	2.22	33.0	59

Fuente: Elaboración Propia

En el Cuadro 3.10, se presenta en forma resumida la estimación de los parámetros reológicos, indicándose los promedios de los esfuerzos de cedencia  $\tau_y$  (promedio) y viscosidad dinámica  $\mu$  (promedio), obtenidos del Cuadro 3.9.

CUADRO 3.10  
ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS PARTE 2

EXP.	ENSAYO	$C_w(\%)$	$C_v(\%)$	$\tau_y$ (promedio) (dinas/cm <sup>2</sup> )		$\mu$ (promedio) (poise)	
EXP1	ENS5	79.01%	49.88%	6,500	6,375.00	1,020.41	865.72
	ENS6			5,500		925.93	
	ENS7			6,500		735.29	
	ENS8			7,000		781.25	
EXP2	ENS1	77.51%	48.39%	1,800	1,800.00	588.24	633.35
	ENS2					645.16	
	ENS3			1,800		666.67	
EXP3	ENS1	76.91%	47.37%	750	683.33	250.00	228.54
	ENS2			550		227.27	
	ENS3			750		208.33	
EXP4	ENS1	74.50%	43.73%	400	516.67	54.55	58.86
	ENS2			450		62.50	
	ENS3			700		59.52	
EXP5	ENS5	74.41%	43.95%	360	350.00	33.33	33.25
	ENS6			340		35.71	
	ENS7			350		36.50	
	ENS8			350		27.47	
EXP6	ENS1	73.26%	41.93%	200	315.00	24.39	25.68
	ENS2			380		26.67	
	ENS3			240		25.00	
	ENS4			440		26.67	
EXP7	ENS1	70.87%	38.91%	70	42.50	4.00	4.58
	ENS2			10		5.00	
	ENS3			45		4.76	
	ENS4			45		4.55	
EXP8	ENS1	67.54%	35.80%	55	30.00	1.64	3.82
	ENS2					2.94	
	ENS3					5.68	
	ENS4			5		4.27	
	ENS5					4.03	
	ENS6					4.35	
EXP9	ENS1	65.17%	32.65%	27	18.83	3.29	2.73
	ENS2			13		2.86	
	ENS3			8		2.86	
	ENS4			5		2.56	
	ENS5			25		2.86	
	ENS6					2.63	
	ENS7			35		2.07	
EXP10	ENS1	63.37%	31.10%	30	30.00	2.06	2.25
	ENS2					2.06	
	ENS3					2.41	
	ENS4					2.56	
	ENS5					2.15	
	ENS6					2.22	

Fuente: Elaboración Propia

En resumen, la determinación de los parámetros reológicos como **Esfuerzo de Cedencia  $\tau_y$**  y **Viscosidad Dinámica  $\mu$**  del relave minero con densidad de sólidos  $\rho_s = 3.66 \text{ gr/cm}^3$ , se muestran en el siguiente cuadro:

CUADRO 3.11  
PARÁMETROS REOLÓGICOS OBTENIDOS

Experimento	$\rho_m(\text{gr/cm}^3)$	$C_w(\%)$	$C_v(\%)$	$\tau_y(\text{promedio})$ (dinas/cm <sup>2</sup> )	$\mu(\text{promedio})$ Poise	$V_{m\acute{a}x}$ (cm/s)	Nº Reynolds
EXP1	2.31	79.01%	49.88%	<b>6,375.00</b>	<b>865.72</b>	6.89	0.01
EXP2	2.28	77.51%	48.39%	<b>1,800.00</b>	<b>633.35</b>	5.36	0.01
EXP3	2.25	76.91%	47.37%	<b>683.33</b>	<b>228.54</b>	14.97	0.06
EXP4	2.15	74.50%	43.73%	<b>516.67</b>	<b>58.86</b>	15.14	0.21
EXP5	2.16	74.41%	43.95%	<b>350.00</b>	<b>33.25</b>	20.28	0.49
EXP6	2.09	73.26%	41.93%	<b>315.00</b>	<b>25.68</b>	17.86	0.55
EXP7	2.01	70.87%	38.91%	<b>42.50</b>	<b>4.58</b>	25.70	4.24
EXP8	1.94	67.54%	35.80%	30.00	3.82	29.05	5.54
EXP9	1.83	65.17%	32.65%	18.83	2.73	20.81	5.24
EXP10	1.80	63.37%	31.10%	30.00	2.25	21.65	6.50

Fuente: Elaboración Propia

Del Cuadro 3.11, se ha elaborado las Figura 3.38 y Figura 3.39 en la que se relacionan Esfuerzo de cedencia Vs Concentración en volumen y Viscosidad dinámica Vs Concentración en volumen, respectivamente.

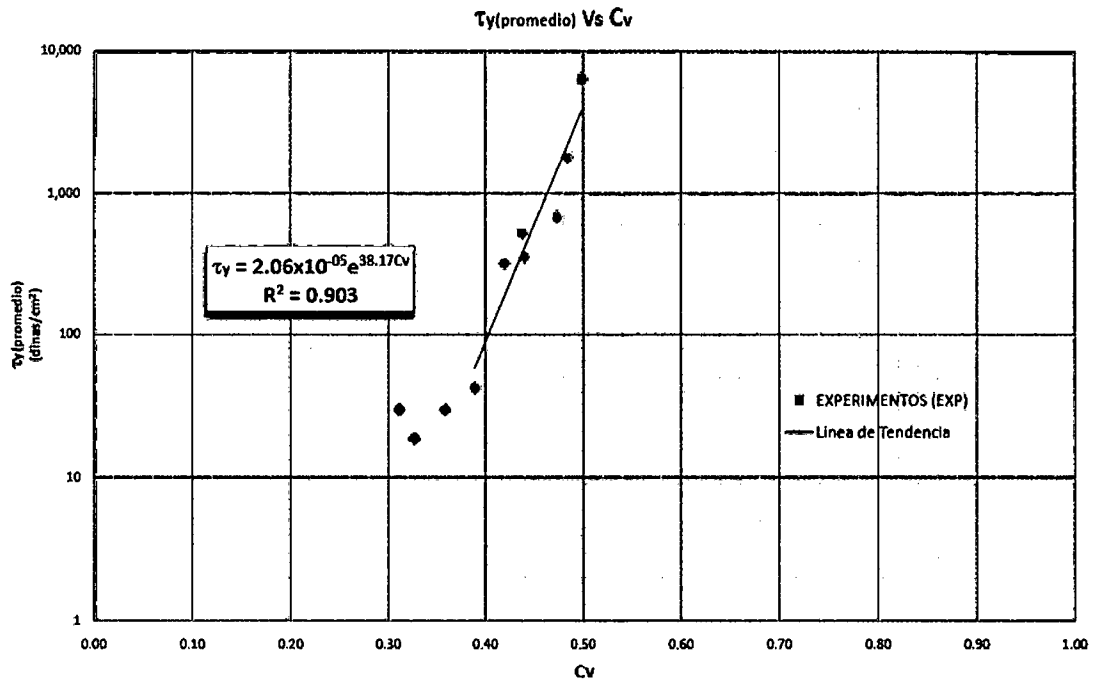


FIGURA 3.38 Relación  $\tau_y$  Vs  $C_v$ , del relave minero

Fuente: Elaboración Propia

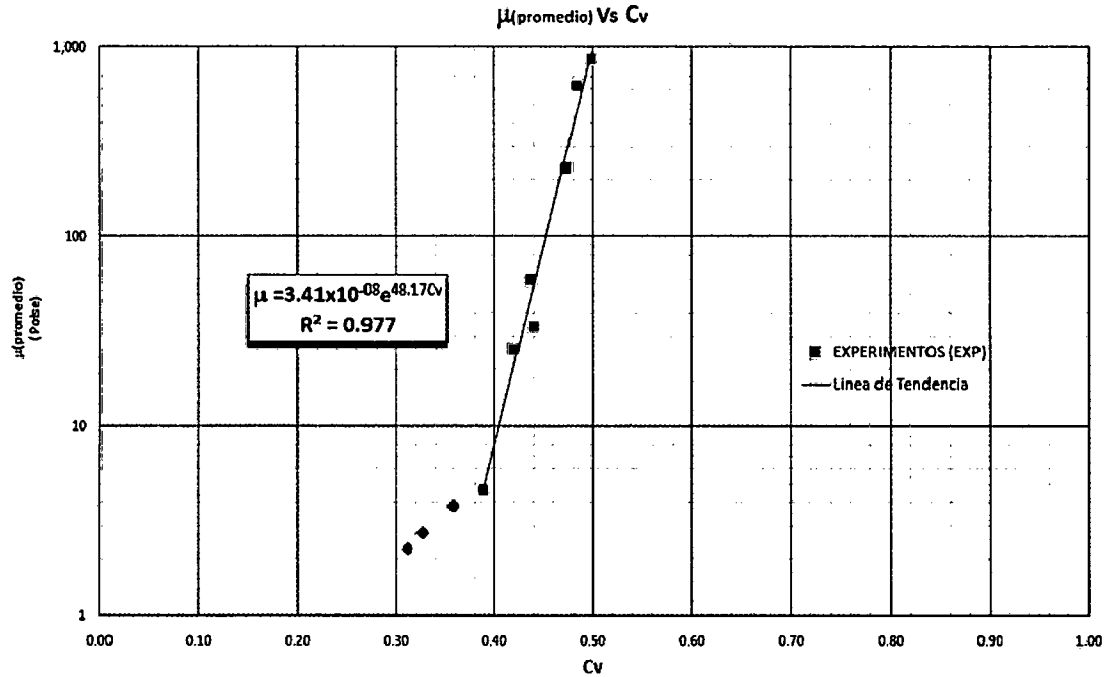


FIGURA 3.39 Relación  $\mu$  Vs  $C_v$ , del relave minero  
Fuente: Elaboración Propia

Las correlaciones satisfacen para los primeros experimentos, es decir para el EXP1 al EXP7, mientras que los experimentos EXP8, EXP9 y EXP10 no presentan buen número de datos certeros o adecuados.

Como resultado, para la muestra de relave analizada, se presenta la expresión matemática que relaciona **Esfuerzo de Cedencia** con la **Concentración Volumétrica** y la **Viscosidad Dinámica** con la **Concentración Volumétrica**. He aquí las expresiones:

$$\tau_y = 2.06 \times 10^{-05} e^{38.17 C_v} \quad (3.7)$$

$$\mu = 3.41 \times 10^{-08} e^{48.17 C_v} \quad (3.8)$$



## CONCLUSIONES

La investigación realizada, implica destacar tres aspectos importantes para la determinación de los parámetros reológicos: **Equipo Instrumental**, **Muestras Estudiadas** y la **Caracterización Reológica del relave minero**. En cada caso, se concluye lo siguiente:

Del **Equipo Instrumental**, se hizo el empleo de tres equipos, siendo estas el Viscosímetro tipo Drage, Caída de Esfera y Caída de Varilla

- El **Viscosímetro Tipo Drage** del Laboratorio Nacional de Hidráulica, es un instrumento de medición relativa que solo cuenta con una velocidad de rotación (240 RPM). Esta condición, no permite o restringe estudiar a los fluidos al ser sometidos a diferentes velocidades de deformación.
- El equipo de **Caída de Esfera** utilizado, basada en el principio de Stokes, se limita a estimar la Viscosidad Dinámica de fluidos homogéneos, condicionada por el régimen del flujo. Esta condición, solo permite ensayar con sustancias de viscosidades relativamente altas.
- El Instrumental **Reómetro de Caída de Varilla**, permite determinar parámetros reológicos de flujos hiperconcentrados. Para el caso estudiado, concentraciones menores a 70.87% ( $C_w$ ) o 38.91% ( $C_v$ ), la respuesta del equipo instrumental es limitada.

De las **Muestras Estudiadas**, para cada tipo de muestra ensayada, se tiene:

- Para la **Mezcla Azúcar – Agua**, experimentado con el viscosímetro tipo Drage, se obtuvo una relación directa entre la viscosidad relativa y la concentración en peso. Aplicable en el rango comprendida entre 28.57% y 50.00% de concentración en peso.
- **Mezcla Relave – Agua**, experimento realizado con el viscosímetro tipo Drage, la relación viscosidad relativa y concentración es directa, solo se consiguió para el rango 24.30% al 70.00% de concentración en peso equivalente al 8.20% al 39.10% de concentración volumétrica. Menores concentraciones a lo indicado, la muestra perdía homogeneidad al decantarse rápidamente.

- Con el **Aceite SAE 40**, experimentada con el equipo de Caída de Esfera, se desarrolló para el régimen turbulento, obteniéndose buenos resultados en la estimación de la viscosidad dinámica.
- La muestra **Harina – Agua**, experimento efectuado con el equipo de Caída de Esfera, se obtuvo resultados relativamente buenos, siendo la condicionante la temperatura alta (entre 61.8°C y 63.5°C) a la que fue ensayada.

De la **Caracterización Reológica del relave minero**, relave procedente de la mina Cobriza, se concluye lo siguiente:

- Para la muestra hiperconcentrada de relave minero, se obtuvieron esfuerzos de cedencia  $\tau_y$  y viscosidad dinámica  $\mu$  de magnitudes altas. Se obtuvo valores tal como se muestra a continuación:

CUADRO  
RESUMEN DE RESULTADOS

Experimento	$C_w(\%)$	$C_v(\%)$	$\tau_y$ (promedio) (dinas/cm <sup>2</sup> )	$\mu$ (promedio) (poise)
EXP1	79.01%	49.88%	<b>6,375.00</b>	<b>865.72</b>
EXP2	77.51%	48.39%	<b>1,800.00</b>	<b>633.35</b>
EXP3	76.91%	47.37%	<b>683.33</b>	<b>228.54</b>
EXP4	74.50%	43.73%	<b>516.67</b>	<b>58.86</b>
EXP5	74.41%	43.95%	<b>350.00</b>	<b>33.25</b>
EXP6	73.26%	41.93%	<b>315.00</b>	<b>25.68</b>
EXP7	70.87%	38.91%	<b>42.50</b>	<b>4.58</b>
EXP8	67.54%	35.80%	30.00	3.82
EXP9	65.17%	32.65%	18.83	2.73
EXP10	63.37%	31.10%	30.00	2.25

Fuente: Elaboración Propia

- La caracterización reológica del relave minero, es una característica propia de la muestra. Para otras condiciones de su propiedad física o químicas, tales como ph, Conductividad eléctrica, granulometría, mineralogía, etc; variaran en los resultados.
- El rango de valores obtenidos en los experimentos, se debieron a dos aspectos importantes: El primer aspecto está referida a la muestra de Relave minero, que para concentraciones “bajas” el proceso de decantación de la muestra es más acelerada, por lo que el concepto de muestra “homogénea” pierde validez; y el segundo aspecto tiene que ver con el equipo de Reómetro de caída de varilla, debido a la sensibilidad del equipo para registrar datos en procesos de deformaciones “lentos”.

## RECOMENDACIONES

En general, el trabajo de investigación realizado, busca proporcionar conceptos y aportes básicos para el desarrollo de la Reología. En tal sentido para proseguir la investigación, se sugiere tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

### Del Equipo Instrumental:

- El **Viscosímetro Tipo Drage** del Laboratorio Nacional de Hidráulica, por su condición de instrumento de medición relativa y por contar con una sola velocidad de rotación, es recomendable su uso para determinar viscosidades de fluidos homogéneas. Para tener una mejor respuesta en las deformaciones, se puede adecuar el instrumento para que trabaje a diferentes velocidades de rotación y torque.
- El equipo de **Caída de Esfera**, recomendable su uso para caracterizar fluidos homogéneas, con viscosidad dinámica relativamente “alta”
- El Instrumental **Reómetro de Caída de Varilla**, se recomienda su uso para determinar parámetros reológicos de flujos hiperconcentrados. Para tener una mejor respuesta del dispositivo en velocidades bajas, es necesario modificar el dispositivo del temporizador para la captación de las pulsaciones del encoder.

### De las Muestras Estudiadas:

- Para la **Mezcla Azúcar – Agua**, se recomienda analizar la relación viscosidad relativa Vs concentración volumétrica para su caracterización como **fluido con suspensión de sólidos diluidos o fluido con suspensión de sólidos concentrados**, expuesto en el capítulo 1 de esta investigación.
- La **Mezcla Relave – Agua**, es recomendable experimentar, utilizando el viscosímetro tipo Drage, con muestras de relaves procedentes de otras mineras. Esta muestra procede de la mina Bateas.
- El **Aceite SAE 40**, se recomienda experimentar para temperaturas menores a los 10°C utilizando el equipo de Caída de Esfera. Esto con el objeto de lograr en los ensayos el régimen laminar.

- Del mismo modo, la muestra **Harina – Agua**, se recomienda experimentar a diferentes temperaturas y concentraciones, utilizando el equipo de Caída de Esfera y posteriormente utilizar el viscosímetro tipo Drage para su comparación.

#### De la **Caracterización Reológica del relave minero:**

- Cuando se experimente con flujos hiperconcentrados de relave minero, se espera obtener esfuerzos de cedencia  $\tau_y$  y viscosidad  $\mu$  dinámica de magnitudes altas, por lo que se recomienda estudiarlos para su caracterización, en la iniciación del proceso de deformación, Esto nos permite estimar de una mejor manera los parámetros reológicos.
- Se recomienda realizar la caracterización reológica del relave minero, incluyendo otras propiedades física o químicas que no se han considerado en esta investigación.
- Dependiendo de las propiedades físicas o químicas, se recomienda experimentar con Reómetros de Rotación, para velocidades de deformaciones bajas, Esto con la finalidad de cubrir el rango de velocidad de deformación.

La aplicación de la investigación, está orientada en general, a la caracterización reológica de flujos hiperconcentrados. Se recomienda establecer líneas de investigación que permitan obtener resultados satisfactorios, siendo algunos de ellos los siguientes temas:

- Fabricación de equipo instrumental para la determinación de parámetros reológicos.
- Métodos y procedimientos de medición reológica in situ para fluidos de alta concentración de sólidos más comunes o usuales.
- Modelamiento físico y matemático de flujos de alta concentración de partículas sólidas.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1 **Arrospide Aliaga José.** Diseño de un sistema de hidrotransporte para evacuar 60Tn/día de polvo de SINTER de Plomo. UNI, 1997 - Informe.
- 2 **Beverage, J. P. and J. K. Culbertson.** Hyperconcentrations of suspended sediments. ASCE vol 90, HY 6, pp. 117-128. 1964.
- 3 **Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N.** Fenómenos de Transporte. Ed. Reverté S.A. México D.F. 1997.
- 4 **Castillo Navarro Leonardo.** Aplicación de un modelo numérico de flujos de lodo y escombros en una quebrada en el Perú. UNI, 2006 - Tesis.
- 5 **Córdova Rojas Carlos Alejandro.** Transporte de pulpas por tuberías y canal. UNI, 1988 - Tesis.
- 6 **Costa, J.,** Rheology, Geomorphic and sedimentologic differentiation of wáter floods, hyperconcentrated flows, and debris flow, in Flood geomorphology, pp. 113-122. 1988
- 7 **Echávez Aldape Gabriel.** Introducción a los Modelos Hidráulicos de Fondo Fijo y a la Ingeniería Experimental. UNAM, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Asociación Mexicana de Hidráulica. Mexico 1996.
- 8 **Gay, E. C. Nelson, P. A. and Armstrong, W. P.** Flow Properties of Suspensions with High Solids Concentrations. AIChE Journal, V. 6, p. 15 (Nov. 1969)
- 9 **Gebhard Schramm.** A Practical Approach to Rheology and Rheometry. Thermo Haake Rheology, 2nd Edition. Federal Republic of Germany, 2000.
- 10 **Guth, E. and Simha, R,** Kolloid-Z, V. 74, p. 266 (1936)
- 11 **Orr, C and Dalla Valle J. M.,** Chem. Eng. Prog.(Symp. Series N° 09), V. 50, pp.29-45 (19954)

- 12 **Ponce Victor Miguel, Chen Y. H., Simons D. B., Morawski T. E.** Sediment Transport at Low Concentrations in Pipes, Volume I : Literature Review, Selected Abstracts and Bibliography. USDA Science and Education Administration - Agricultural Research. Colorado 1979.
- 13 **Sevallos Cruz Roberto.** Diseño, cálculo, selección y ejecución del sistema de bombeo para la deposición de relaves en la cancha N° 6 minas de Arcata S.A. UNI, 1997 - Informe.
- 14 **Thomas, D. G.** Heat and Momentum Transport Characteristic of Now – Newtonian Aqueous Thorium Oxide Suspensions. AIChE Journal, V. 6, pp. 631-639 (Dec. 1960)
- 15 **Thomas, D. G.** Transport Characteristics of Suspensions: Part VIII. A Note on the Viscosity of Newtonian Suspensions of Uniform Spherical Particles, J. Colloid Sci, 20, 267 (1965).
- 16 **Valladares Navega.** Diseño del sistema de transporte y almacenamiento de amoniaco para una planta fertilizante. UNI, 1994 - Tesis.
- 17 **Wasp Edward J., John P. Kenny, Ramesh L. Gandhi.** Solid - Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation. Gulf Publishing Company. Houston, London, Paris, Tokyo. 1979.

# ANEXOS

## **A.1 ENSAYOS DE LABORATORIO**



**PESO ESPECIFICO DE SOLIDOS (Gs)**  
A.S.T.M. - 854

Proyecto : Determinación de los parámetros reológicos del sistema sólido - líquido para partículas sólidas en suspensión  
Realizado por: Kenñe Rosario Garcilazo  
Ubicación: Cobriza  
Fecha : 11/10/06

TIPO DE MUESTRA		RELAVE MINERO			
MUESTRA		M-1	M-2	M-3	M-4
NRO DE PICNÓMETRO		1	2	4	5
1	Peso del frasco + peso suelo seco (gr)	199.60	201.80	205.40	201.00
2	Peso del frasco volumétrico	94.10	96.60	102.00	95.20
3	Peso del suelo seco ( 1 - 2 ) (gr)	105.50	105.20	103.40	105.80
4	Peso del Picnómetro + peso suelo + peso agua (gr)	419.80	422.00	426.20	419.90
5	Peso del Picnómetro + peso del agua enrasada (gr)	343.20	345.70	350.90	343.00
6	Volumen del suelo (3 + 5 - 4) (cm <sup>3</sup> )	28.90	28.90	28.10	28.90
7	Gs (3)/(6) gr/cc	3.65	3.64	3.68	3.66
8	Temperatura final	21.6*	21.9*	21.8*	21.8*

**PESO ESPECIFICO DE SOLIDOS (Gs)**  
A.S.T.M. - 854

Proyecto : Determinación de los parámetros reológicos del sistema sólido - líquido para partículas sólidas en suspensión  
Realizado por: Kenñe Rosario Garcilazo  
Ubicación: Cobriza  
Fecha : 21/10/06

TIPO DE MUESTRA		RELAVE MINERO				
MUESTRA		M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
NRO DE PICNÓMETRO		1	2	3	4	5
1	Peso del frasco + peso suelo seco (gr)	188.20	195.90	211.40	202.10	195.60
2	Peso del frasco volumétrico	94.10	96.60	109.50	102.00	95.10
3	Peso del suelo seco ( 1 - 2 ) (gr)	94.10	99.30	101.90	100.10	100.50
4	Peso del Picnómetro + peso suelo + peso agua (gr)	411.60	417.80	432.50	423.80	416.20
5	Peso del Picnómetro + peso del agua enrasada (gr)	343.20	345.70	358.40	350.90	343.00
6	Volumen del suelo (3 + 5 - 4) (cm <sup>3</sup> )	25.70	27.20	27.80	27.20	27.30
7	Gs (3)/(6) gr/cc	3.66	3.66	3.67	3.66	3.68
8	Temperatura final	25.2*	25.1*	25.1*	25.0*	25.2*

Fuente: Elaboración Propia

## Granulometría

<b>ANÁLISIS POR HIDROMETRO</b>												
Obra												
Localización	Cobriza					Ensayo:	1					
Sondeo N°						Muestra N°	M-1					
Fecha	15/10/06					Descripción:	Relave Minero					
Realizado por:	Kenfe Rosario Garcilazo					Prof.:						
<b>FACTORES DE CORRECCIÓN</b>						<b>CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA</b>						
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						$C_m$	1.00	W				29.31 gr
Factor de Corrección por Temperatura						$C_T$	0.50	Peso total de la muestra secada al horno				
Factor de Corrección por Humedad						$FC_w$	0.99	W <sub>s</sub>				29.07 gr
Factor cuando G <sub>s</sub> no es 2.65						a	0.86	Gravedad específica relativa de sólidos				
								G <sub>s</sub>				3.66
<b>CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO</b>												
L <sub>1</sub> para lectura 0 gr/lt			(L <sub>1</sub> ) <sub>0</sub>	10.5 cm								
L <sub>1</sub> para lectura 50 gr/lt			(L <sub>1</sub> ) <sub>50</sub>	2.3 cm								
Volumen del Bulbo			(V <sub>b</sub> )	67 cm <sup>3</sup>								
Area del Cilindro de Ensayo			(A)	27.8 cm <sup>2</sup>								
Altura del Bulbo			(L <sub>2</sub> )	14 cm								
Altura de Levantamiento			(V <sub>l</sub> /A)	2.4 cm								
Fecha	t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)		
	0.5	0.5	22.2°	26.0	27.0	21.5	63.36	6.1	11.9	0.01047	0.0511	
	1.0	1.0	22.2°	22.0	23.0	17.5	51.57	6.7	12.5	0.01047	0.0370	
	1.5	1.5	22.2°	21.0	22.0	16.5	48.63	6.9	12.7	0.01047	0.0305	
	2.0	2.0	22.2°	19.0	20.0	14.5	42.73	7.2	13.0	0.01047	0.0267	
	5.0	5.0	22.1°	14.2	15.2	9.7	28.59	8.0	13.8	0.01048	0.0174	
	15.0	15.0	22.1°	11.2	12.2	6.7	19.75	8.5	14.3	0.01048	0.0102	
	30.0	30.0	22.1°	9.2	10.2	4.7	13.85	8.8	14.6	0.01048	0.0073	
	60.0	60.0	22.1°	8.0	9.0	3.5	10.31	9.0	14.8	0.01048	0.0052	
	120.0	120.0	22.0°	7.2	8.2	2.7	7.96	9.2	15.0	0.01049	0.0037	
	250.0	250.0	22.0°	6.9	7.9	2.4	7.07	9.2	15.0	0.01049	0.0026	
	1440.0	24 hrs	21.0°	6.5	7.5	2.0	5.89	9.3	15.1	0.01062	0.0011	
	2880.0	48 hrs	21.0°	6.3	7.3	1.8	5.30	9.3	15.1	0.01062	0.0008	
	4320.0	72 hrs	20.7°	6.1	7.1	1.6	4.72	9.3	15.1	0.01066	0.0006	
	5760.0	96 hrs	20.6°	6.0	7.0	1.5	4.42	9.4	15.2	0.01067	0.0005	
	7200.0	120 hr	21.5°	5.8	6.8	1.3	3.83	9.4	15.2	0.01056	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<sub>1</sub>: 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>												
						$R_m = R_a + C_m$ $R_c = R_m - C_{GS} + C_T$						
						$D = K \sqrt{L/T}$ $P(\%) = \frac{R_c \cdot a}{W_s} \cdot 100$						

Fuente: Elaboración Propia

## Granulometría

Obra _____					<b>ANÁLISIS POR HIDROMETRO</b>						
Localización	Cobriza				Ensayo:	1					
Sondeo N°	_____				Muestra N°	M-2					
Fecha	15/10/06				Descripción:	Relave Minero					
Realizado por:	Kenfe Rosario Garcilazo				Prof.:	_____					
<b>FACTORES DE CORRECCIÓN</b>					<b>CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA</b>						
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					$C_m$	1.00	W 42.13 gr				
Factor de Corrección por Temperatura					$C_T$	0.50	Peso total de la muestra secada al horno				
Factor de Corrección por Humedad					$FC_w$	0.99	W <sub>s</sub> 41.76 gr				
Factor cuando G <sub>s</sub> no es 2.65					a	0.86	Gravedad específica relativa de sólidos				
							G <sub>s</sub> 3.65				
<b>CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO</b>											
L <sub>1</sub> para lectura 0 gr/lt		(L <sub>1</sub> ) <sub>0</sub>	10.5 cm								
L <sub>1</sub> para lectura 50 gr/lt		(L <sub>1</sub> ) <sub>50</sub>	2.3 cm								
Volumen del Bulbo		(V <sub>b</sub> )	67 cm <sup>3</sup>								
Área del Cilindro de Ensayo		(A)	27.8 cm <sup>2</sup>								
Altura del Bulbo		(L <sub>2</sub> )	14 cm								
Altura de Levantamiento		(V <sub>b</sub> /A)	2.4 cm								
Fecha	t	T (°C)	R <sub>a</sub>	R <sub>m</sub>	R <sub>c</sub>	P (%)	L <sub>1</sub>	L	K	D (mm.)	
	0.5	0.5	22.2°	34.0	35.0	29.5	60.58	4.8	10.6	0.01049	0.0483
	1.0	1.0	22.2°	27.5	28.5	23.0	47.23	5.8	11.6	0.01049	0.0357
	1.5	1.5	22.2°	25.0	26.0	20.5	42.10	6.2	12.0	0.01049	0.0297
	2.0	2.0	22.2°	22.0	23.0	17.5	35.94	6.7	12.5	0.01049	0.0262
	5.0	5.0	22.2°	17.0	18.0	12.5	25.67	7.5	13.3	0.01049	0.0171
	15.0	15.0	22.2°	12.5	13.5	8.0	16.43	8.3	14.1	0.01049	0.0102
	30.0	30.0	22.1°	10.2	11.2	5.7	11.71	8.7	14.5	0.01050	0.0073
	60.0	60.0	22.1°	8.5	9.5	4.0	8.21	8.9	14.7	0.01050	0.0052
	120.0	120.0	22.1°	6.9	7.9	2.4	4.93	9.2	15.0	0.01050	0.0037
	250.0	250.0	22.1°	6.5	7.5	2.0	4.11	9.3	15.1	0.01050	0.0026
	1440.0	24 hrs	21.0°	5.8	6.8	1.3	2.67	9.4	15.2	0.01064	0.0011
	2880.0	48 hrs	20.9°	5.3	6.3	0.8	1.64	9.5	15.3	0.01065	0.0008
	4320.0	72 hrs	20.7°	5.2	6.2	0.7	1.44	9.5	15.3	0.01068	0.0006
	5760.0	96 hrs	20.6°	5.1	6.1	0.6	1.23	9.5	15.3	0.01069	0.0006
	7200.0	120 hr	21.5°	5.1	6.1	0.6	1.23	9.5	15.3	0.01058	0.0005
<p>t: tiempo acumulado transcurrido en minutos</p> <p>R<sub>a</sub>: lectura del hidrómetro</p> <p>R<sub>m</sub>: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco</p> <p>R<sub>c</sub>: 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<sub>1</sub>: 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>											
					$R_m = R_a + C_m$ $R_c = R_m - C_{Gs} + C_T$						
					$D = K \sqrt{LIT}$ $P(\%) = \frac{R_c \cdot a}{W_s} \cdot 100$						

Fuente: Elaboración Propia

### Granulometría

ANÁLISIS POR HIDRÓMETRO											
Obra _____						Ensayo: _____ 1 _____					
Localización <u>Cobriza</u>						Muestra N° <u>M-3</u>					
Sondeo N° _____						Descripción: <u>Relave Minero</u>					
Fecha <u>15/10/06</u>						Prof.: _____					
Realizado por: <u>Kenfe Rosario Garcilazo</u>											
<b>FACTORES DE CORRECCIÓN</b>						<b>CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA</b>					
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						$C_m$	1.00	W 33.66 gr			
Factor de Corrección por Temperatura						$C_T$	0.50	Peso total de la muestra secada al horno			
Factor de Corrección por Humedad						$FC_w$	0.99	W <sub>s</sub> 33.40 gr			
Factor cuando G <sub>s</sub> no es 2.65						a	0.86	Gravedad específica relativa de sólidos			
								G <sub>s</sub> 3.67			
<b>CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO</b>											
L <sub>1</sub> para lectura 0 gr/lt			(L <sub>1</sub> ) <sub>0</sub>	10.5 cm							
L <sub>1</sub> para lectura 50 gr/lt			(L <sub>1</sub> ) <sub>50</sub>	2.3 cm							
Volumen del Bulbo			(V <sub>b</sub> )	67 cm <sup>3</sup>							
Área del Cilindro de Ensayo			(A)	27.8 cm <sup>2</sup>							
Altura del Bulbo			(L <sub>2</sub> )	14 cm							
Altura de Levantamiento			(V <sub>b</sub> /A)	2.4 cm							
Fecha	t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)	
	0.5	0.5	22.2°	29.0	30.0	24.5	62.78	5.6	11.4	0.01045	0.0499
	1.0	1.0	22.2°	23.5	24.5	19.0	48.69	6.5	12.3	0.01045	0.0366
	1.5	1.5	22.2°	20.5	21.5	16.0	41.00	7.0	12.8	0.01045	0.0305
	2.0	2.0	22.2°	18.8	19.8	14.3	36.64	7.3	13.1	0.01045	0.0267
	5.0	5.0	22.2°	14.8	15.8	10.3	26.39	7.9	13.7	0.01045	0.0173
	15.0	15.0	22.1°	11.2	12.2	6.7	17.17	8.5	14.3	0.01046	0.0102
	30.0	30.0	22.1°	9.5	10.5	5.0	12.81	8.8	14.6	0.01046	0.0073
	60.0	60.0	22.1°	8.1	9.1	3.6	9.22	9.0	14.8	0.01046	0.0052
	120.0	120.0	22.0°	6.7	7.7	2.2	5.64	9.2	15.0	0.01047	0.0037
	250.0	250.0	22.1°	6.2	7.2	1.7	4.36	9.3	15.1	0.01046	0.0026
	1440.0	24 hrs	21.0°	5.6	6.6	1.1	2.82	9.4	15.2	0.01060	0.0011
	2880.0	48 hrs	21.0°	5.2	6.2	0.7	1.79	9.5	15.3	0.01060	0.0008
	4320.0	72 hrs	20.7°	5.2	6.2	0.7	1.79	9.5	15.3	0.01064	0.0006
	5760.0	96 hrs	20.7°	5.1	6.1	0.6	1.54	9.5	15.3	0.01064	0.0005
	7200.0	120 hr	21.5°	5.0	6.0	0.5	1.28	9.5	15.3	0.01054	0.0005

t: tiempo acumulado transcurrido en minutos  
Ra : lectura del hidrómetro  
Rm: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco  $R_m = R_a + C_m$   
Rc: Lectura del Hidrómetro corregido total  $R_c = R_m - C_{GS} + C_T$   
T: Temperatura en Grados Celsius  
K: Constante en función de la Temperatura y la Gravedad Específica  
L<sub>1</sub>: 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  $P(\%) = \frac{R_c \cdot a}{W_s} \cdot 100$   
P: Porcentaje de suelo Remanente con diámetros menores a "D"

Fuente: Elaboración Propia

## Granulometría

ANÁLISIS POR HIDROMETRO													
Obra _____						Ensayo: _____							
Localización <u>Cobriza</u>						Muestra N° <u>M-4</u>							
Sondeo N° _____						Descripción: <u>Relave Minero</u>							
Fecha <u>15/10/06</u>						Prof.: _____							
Realizado por: <u>Kenfe Rosario Garcilazo</u>													
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				$W$	35.72 gr
Factor de Corrección por menisco						$C_m$	1.00	Peso total de la muestra secada al horno				$W_s$	35.40 gr
Factor de Corrección por Temperatura						$C_T$	0.50	Gravedad específica relativa de sólidos				$G_s$	3.68
Factor de Corrección por Humedad						$FC_w$	0.99						
Factor cuando $G_s$ no es 2.65						$a$	0.85						
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO													
$L_1$ para lectura 0 gr/lt			$(L_1)_0$	10.5 cm									
$L_1$ para lectura 50 gr/lt			$(L_1)_{50}$	2.3 cm									
Volumen del Bulbo			$(V_b)$	67 cm <sup>3</sup>									
Área del Cilindro de Ensayo			$(A)$	27.8 cm <sup>2</sup>									
Altura del Bulbo			$(L_2)$	14 cm									
Altura de Levantamiento			$(V_b/A)$	2.4 cm									
Fecha		t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)		
		0.5	22.4°	30.0	31.0	25.5	61.59	5.4	11.2	0.01040	0.0492		
		1.0	22.4°	24.5	25.5	20.0	48.30	6.3	12.1	0.01040	0.0362		
		1.5	22.4°	21.2	22.2	16.7	40.33	6.9	12.7	0.01040	0.0303		
		2.0	22.4°	19.5	20.5	15.0	36.23	7.1	12.9	0.01040	0.0264		
		5.0	22.3°	15.0	16.0	10.5	25.36	7.9	13.7	0.01042	0.0172		
		15.0	22.3°	11.3	12.3	6.8	16.42	8.5	14.3	0.01042	0.0102		
		30.0	22.2°	9.5	10.5	5.0	12.08	8.8	14.6	0.01043	0.0073		
		60.0	22.1°	8.3	9.3	3.8	9.18	9.0	14.8	0.01044	0.0052		
		120.0	22.1°	7.0	8.0	2.5	6.04	9.2	15.0	0.01044	0.0037		
		250.0	22.2°	6.5	7.5	2.0	4.83	9.3	15.1	0.01043	0.0026		
		1440.0	21.1°	6.0	7.0	1.5	3.62	9.4	15.2	0.01057	0.0011		
		2880.0	21.0°	5.6	6.6	1.1	2.66	9.4	15.2	0.01058	0.0008		
		4320.0	20.7°	5.3	6.3	0.8	1.93	9.5	15.3	0.01062	0.0006		
		5760.0	20.7°	5.2	6.2	0.7	1.69	9.5	15.3	0.01062	0.0005		
		7200.0	21.5°	5.2	6.2	0.7	1.69	9.5	15.3	0.01052	0.0005		
<p>t: tiempo acumulado transcurrido en minutos</p> <p>Ra : lectura del hidrómetro</p> <p>Rm: Lectura del Hidrómetro corregido por Menisco <span style="float: right;"><math>R_m = R_a + C_m</math></span></p> <p>Rc: Lectura del Hidrómetro corregido total <span style="float: right;"><math>R_c = R_m - C_{GS} + C_T</math></span></p> <p>T: Temperatura en Grados Celsius</p> <p>K: Constante en función de la Temperatura y la Gravedad Específica</p> <p><math>L_1</math>: Altura a lo largo del vástago hasta la lectura del hidrometro</p> <p>L: Altura Efectiva de caída de partículas <span style="float: right;"><math>D = K \sqrt{L/T}</math></span></p> <p>D: Diámetro de partículas en mm <span style="float: right;"><math>P(\%) = \frac{R_c \cdot a}{W_s} \cdot 100</math></span></p> <p>P: Porcentaje de suelo Remanente con diámetros menores a "D"</p>													

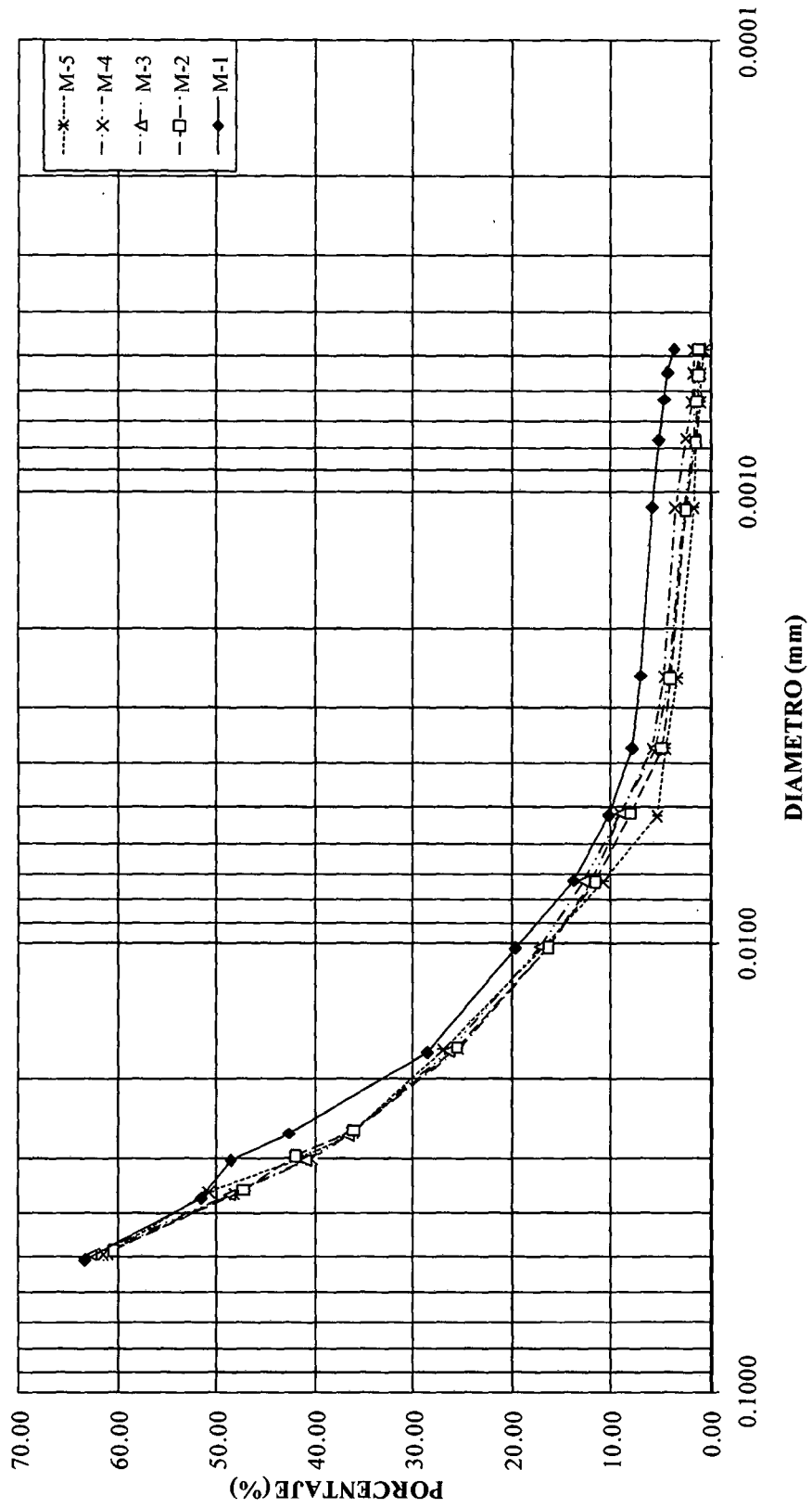
Fuente: Elaboración Propia

## Granulometría

ANÁLISIS POR HIDROMETRO											
Obra											
Localización	Cobriza			Ensayo:		1					
Sondeo N°				Muestra N°		M-5					
Fecha	15/10/06			Descripción:		Relave Minero					
Realizado por:	Kenfe Rosario Garcilazo			Prof.:							
<b>FACTORES DE CORRECCIÓN</b>						<b>CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA</b>					
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						$C_m$	1.00	W 37.41 gr			
Factor de Corrección por Temperatura						$C_T$	0.50	Peso total de la muestra secada al horno			
Factor de Corrección por Humedad						$FC_w$	0.99	W <sub>s</sub> 37.10 gr			
Factor cuando G <sub>s</sub> no es 2.65						a	0.85	Gravedad específica relativa de sólidos			
								G <sub>s</sub> 3.68			
<b>CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓMETRO</b>											
L <sub>1</sub> para lectura 0 gr/lt		(L <sub>1</sub> ) <sub>0</sub>	10.5 cm								
L <sub>1</sub> para lectura 50 gr/lt		(L <sub>1</sub> ) <sub>50</sub>	2.3 cm								
Volumen del Bulbo		(V <sub>b</sub> )	67 cm <sup>3</sup>								
Area del Cilindro de Ensayo		(A)	27.8 cm <sup>2</sup>								
Altura del Bulbo		(L <sub>2</sub> )	14 cm								
Altura de Levantamiento		(V <sub>l</sub> /A)	2.4 cm								
Fecha		t	T (°C)	Ra	Rm	Rc	P (%)	L1	L	K	D (mm.)
	0.5	0.5	22.2°	31.0	32.0	26.5	61.07	5.3	11.1	0.01043	0.0491
	1.0	1.0	22.2°	26.5	27.5	22.0	50.70	6.0	11.8	0.01043	0.0358
	1.5	1.5	22.2°	22.3	23.3	17.8	41.02	6.7	12.5	0.01043	0.0301
	2.0	2.0	22.2°	20.2	21.2	15.7	36.18	7.0	12.8	0.01043	0.0264
	5.0	5.0	22.2°	16.2	17.2	11.7	26.96	7.7	13.5	0.01043	0.0171
	15.0	15.0	22.1°	11.8	12.8	7.3	16.82	8.4	14.2	0.01044	0.0102
	30.0	30.0	22.1°	9.2	10.2	4.7	10.83	8.8	14.6	0.01044	0.0073
	60.0	60.0	22.1°	6.9	7.9	2.4	5.53	9.2	15.0	0.01044	0.0052
	120.0	120.0	22.1°	6.5	7.5	2.0	4.61	9.3	15.1	0.01044	0.0037
	250.0	250.0	22.1°	6.0	7.0	1.5	3.46	9.4	15.2	0.01044	0.0026
	1440.0	24 hrs	21.2°	5.3	6.3	0.8	1.84	9.5	15.3	0.01056	0.0011
	2880.0	48 hrs	21.0°	5.2	6.2	0.7	1.61	9.5	15.3	0.01058	0.0008
	4320.0	72 hrs	20.7°	5.0	6.0	0.5	1.15	9.5	15.3	0.01062	0.0006
	5760.0	96 hrs	20.8°	5.0	6.0	0.5	1.15	9.5	15.3	0.01061	0.0005
	7200.0	120 hr	21.6°	4.8	5.8	0.3	0.69	9.5	15.3	0.01051	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<sub>1</sub>: 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>											
						$R_m = R_a + C_m$ $R_c = R_m - C_{GS} + C_T$					
						$D = K \sqrt{L/T}$ $P(\%) = \frac{R_c \cdot a}{W_s} \cdot 100$					

Fuente: Elaboración Propia

**CURVA GRANULOMETRICA**  
**MUESTRAS: M-1, M-2, M-3, M-4 Y M-5**



Fuente: Elaboración Propia

## **A.2 ENSAYOS REOLÓGICOS**

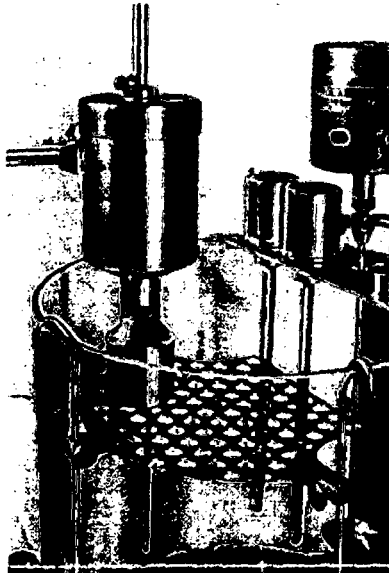


## VISCOSÍMETRO TIPO DRAGE

### Calibración

**PROLABO**

### Viscosimètres à mobile tournant Type DRAGE



Viscosimètre DRAGE TV  
avec bain thermostatique PROLABO

#### AVANTAGES ESSENTIELS

- Mesures très rapides - l'exécution d'une mesure est pratiquement instantanée : le moteur est mis en route; l'aiguille indicatrice se stabilise en quelques secondes; la lecture est aussitôt faite. Les risques d'erreur sont réduits, car l'attention n'est pas longuement sollicitée.
- Nettoyage facile - mobiles et récipients sont démontables, peu fragiles, et leur nettoyage s'effectue rapidement sans précautions spéciales. L'économie et le gain de temps sont là encore notables.
- Domaine de mesures étendu - le même appareil de mesures s'équipe d'un assortiment de vases et de mobiles de tailles diverses pour couvrir une large gamme de viscosités, allant de la solution aqueuse au produit pâteux. Le modèle TV couvre par exemple le domaine 2 à 100.000 centipoises. Le modèle STVK mesure de 3 à 3.000.000 de centipoises.
- Etude des variations de la viscosité - les mesures étant instantanées, l'étude des variations de la viscosité en fonction du temps, de la température ou du traitement préalable du produit est possible. Plusieurs modèles de viscosimètres Drage, équipés de moteurs à vitesses de rotation multiples, sont adaptés à l'étude des variations de la viscosité apparente selon la vitesse des frottements (produits non newtoniens). Des modèles spéciaux conviennent pour l'enregistrement et la régulation.
- Simplicité d'emploi - la rapidité de mesure dispense d'utiliser un thermostat complexe pour les mesures simples au voisinage de la température ambiante : la température ne peut présenter de variations notables pendant la durée de la mesure. L'usage d'un bain thermostatique ne sera nécessaire que pour les mesures précises effectuées à des températures variées. La figure ci-dessus montre un montage classique constitué d'éléments standards PROLABO : le godet du viscosimètre est immergé dans le bain et repose par le fond sur un plateau perforé réglable en hauteur.

Les viscosimètres DRAGE, destinés à la mesure instantanée des viscosités comprises entre 2 centipoises et 3 millions de centipoises, conviennent aussi bien pour mesurer la viscosité des liquides vrais (ou newtoniens) que pour étudier les fluides non newtoniens à viscosité variable selon la vitesse d'écoulement et les conditions d'agitation (thixotropie, rhéopexie). Une gamme de modèles variés permet de résoudre les problèmes les plus divers, allant du contrôle d'atelier aux recherches de laboratoire, à l'enregistrement et la régulation.

#### PRINCIPE

- Les viscosimètres DRAGE sont construits sur le principe classique du mobile tournant, rendu célèbre par Couette en 1890. La mise en œuvre de ce principe revêt ici une forme simple, pratique, originale et élégante. Nous la décrivons en nous référant aux notations du schéma ci-dessous.
- Le vase V, immobile, contient le fluide dont la viscosité sera mesurée. Un mobile M tourne au sein du liquide, entraîné par un moteur électrique à vitesse constante représenté schématiquement par son rotor R et son stator S. Le stator S est suspendu librement : seul un ressort calibré B s'oppose à sa rotation; une aiguille A, solidaire du stator, repère sa position angulaire. Nous avons figuré symboliquement en p sur le schéma, les paliers de maintien et de guidage des différents axes.
- Lorsque le moteur tourne, le stator S subit par réaction un couple égal et de sens opposé au couple résistant dû aux frottements du mobile M dans le liquide. Ce couple est proportionnel à la viscosité du liquide. Le ressort B s'oppose à la rotation de S; un équilibre s'établit très rapidement et la position atteinte par l'aiguille A indique l'angle dont a tourné le stator pour atteindre sa position d'équilibre : cet angle est proportionnel au couple résistant du ressort.
- La déviation lue, sensiblement proportionnelle en définitive à la viscosité du liquide, est reportée sur une courbe d'étalonnage d'où l'opérateur déduit immédiatement la viscosité cherchée.

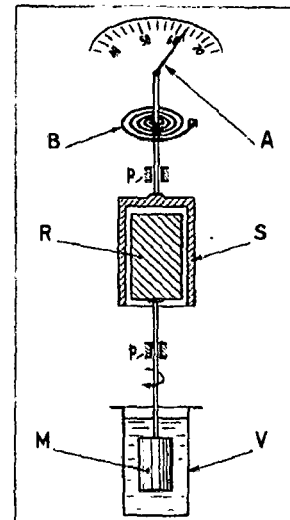


Schéma de principe  
des viscosimètres DRAGE

**PROLABO** 12, rue Pelée **PARIS-XI<sup>e</sup>**

118 A1

## VISCOSÍMETRO TIPO DRAGE

### Calibración

#### PRINCIPAUX VISCOSIMETRES DRAGE

Nous présenterons ici les modèles les plus courants. Dans le doute au sujet du choix d'un appareil, et pour tout problème spécial de viscosimétrie, ne pas hésiter à nous consulter : spécifier dans ce cas la nature des produits à contrôler, le domaine des viscosités à couvrir et la température des mesures. Il existe des viscosimètres DRAGE à enregistrement direct, enregistreurs à distance, régulateurs agissant sur un relais, spéciaux pour températures élevées, etc...

#### Viscosimètre TV à une vitesse.

Le viscosimètre TV est le plus simple et le plus couramment employé. Léger, portable, il est facile à transporter. Il permet de faire des mesures jusqu'à la température de 80° C environ.

L'appareil comprend l'ensemble moteur-appareil de mesure, prise de courant, interrupteur, trois godets de mesure G1, G2 et G3 avec les adaptateurs cylindro-coniques correspondants, et 5 mobiles n° 12, 20, 30, MKZ 10 et MKZ 5; les trois premiers mobiles sont en forme de fourchette, les deux derniers sont cylindriques. Six courbes d'étalonnage accompagnent l'appareil; une pour chaque mobile, sauf le n° 12 qui en comporte deux : l'une est utilisée pour les huiles, l'autre pour les liquides aqueux. Cet ensemble couvre approximativement les domaines de viscosité suivants :

mobile	godet	domaine de mesures
palette n° 12	G1 capacité 300 ml	2 à 20 cp
palette n° 20	G2 capacité 65 ml	20 à 600 cp
palette n° 30	G3 capacité 25 ml	600 à 4.000 cp
cylindre MKZ 10	G3 capacité 25 ml	4.000 à 20.000 cp
cylindre MKZ 5	G3 capacité 25 ml	20.000 à 100.000 cp

5427. Viscosimètre DRAGE type TV complet pour mesures de 2 à 100.000 centipoises. Livré avec 5 mobiles, trois godets et leurs adaptateurs, et 6 courbes d'étalonnage. L'appareil est prévu pour courant alternatif 220 V 50 p entre deux fils. Nous livrons sur demande un transformateur spécial pour l'adapter au courant 110 V.

5428-1. Transformateur 110/220 V pour viscosimètre DRAGE.

#### Viscosimètre STVK à trois vitesses.

Ce modèle comporte un dispositif de changement de vitesses, pour faire tourner le moteur à 20, 64 ou 200 tours/minute. Les mobiles tournants sont tous cylindriques, cette forme procurant un écoulement laminaire du liquide entre le vase et le mobile. Son domaine de mesures spécialement étendu vers les viscosités élevées, va de 6 à 3.000.000 de centipoises. Les trois vitesses de rotation permettent d'étudier les liquides non-newtoniens, dont la viscosité apparente varie avec le gradient de vitesse : thixotropie, rhéopexie, corps de Bingham, corps d'Ostwald; ces phénomènes se présentent très souvent avec les corps fortement visqueux.

Pour chaque mobile l'opérateur dispose de trois domaines de mesures distincts.

	vitesse 200 t/mn	vitesse 64 t/mn	vitesse 20 t/mn	
mobile A	6 à 40	20 à 120	60 à 400	cPo
mobile B	30 à 300	100 à 1.000	300 à 3.000	cPo
mobile C	300 à 3.000	1.000 à 10.000	3.000 à 30.000	cPo
mobile D	3.000 à 30.000	10.000 à 100.000	30.000 à 300.000	cPo
mobile E	30.000 à 300.000	100.000 à 1.000.000	300.000 à 3.000.000	cPo

5431. Viscosimètre DRAGE type STVK, à trois vitesses de rotation, domaine de mesures 6 à 3.000.000 de centipoises. Livré avec support à vis calantes, mobiles A B C D E en écriin, godets cylindriques et notice d'emploi, le tout contenu dans une valise de transport. L'appareil se branche sur le secteur alternatif 220 V 50 Hz entre deux fils. Pour l'alimentation sous 110 V, employer le transformateur 5428-1 (voir chapitre ci-dessus).

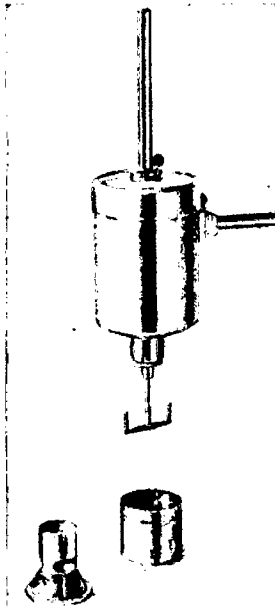
#### Viscosimètre Rhéomat 15 à 15 vitesses.

Cet appareil est susceptible de 15 vitesses obtenues par simple rotation d'un bouton. Le domaine de mesures couvre de 2 à 10.000.000 de centipoises, avec de très larges recouvrements entre les domaines des différents mobiles. C'est l'instrument le mieux adapté à l'étude rhéologique des corps non-newtoniens.

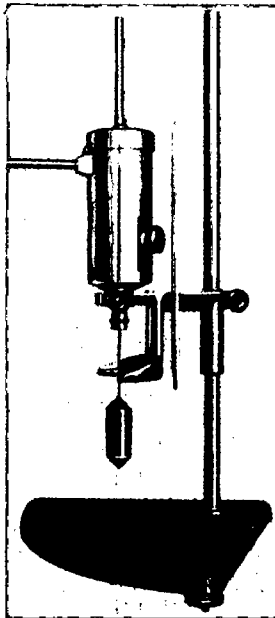
Pour chaque mobile, l'opérateur dispose de quinze domaines de mesures distincts.

	vitesse 352	vitesse 7,51	vitesse 5,59	
mobile A	2 à 20	130 à 1.300	170 à 1.700	cPo
mobile B	20 à 200	100 à 1.000	1.300 à 13.000	cPo
mobile C	2 à 20	90 à 930	120 à 1.200	Po
mobile D	20 à 200	1.000 à 10.000	1.300 à 13.000	Po
mobile E	200 à 2.000	10.000 à 100.000	13.000 à 130.000	Po

5439. Viscosimètre Drage Rhéomat 15 à 15 vitesses de rotation, domaine de mesures 2 à 10.000.000 de centipoises. Livré avec support à vis calantes, coffret de commande électrique, mobiles A B C D E en écriin, godets cylindriques, notice d'emploi détaillée et nécessaire pour le tracé de courbes rhéologiques. Se branche sur 220 V 50 Hz entre deux fils.



Viscosimètre TV N° 5427



Viscosimètre STVK N° 5431

118 A2

PROLABO 12, rue Pelée

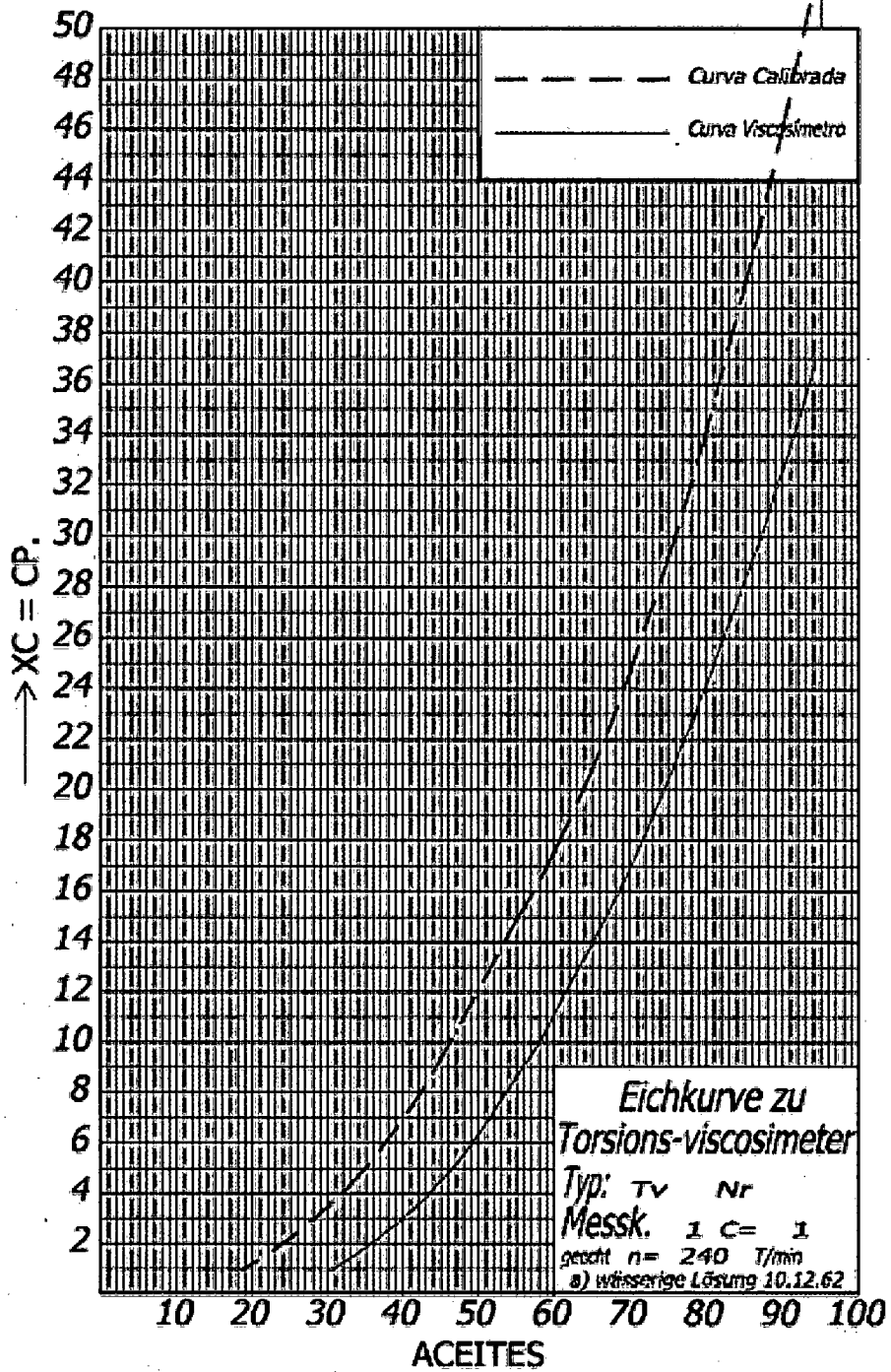
PARIS-XI°

RL 0352

### VISCOSÍMETRO TIPO DRAGE

#### Calibración

MS - r 1a 60 Hz

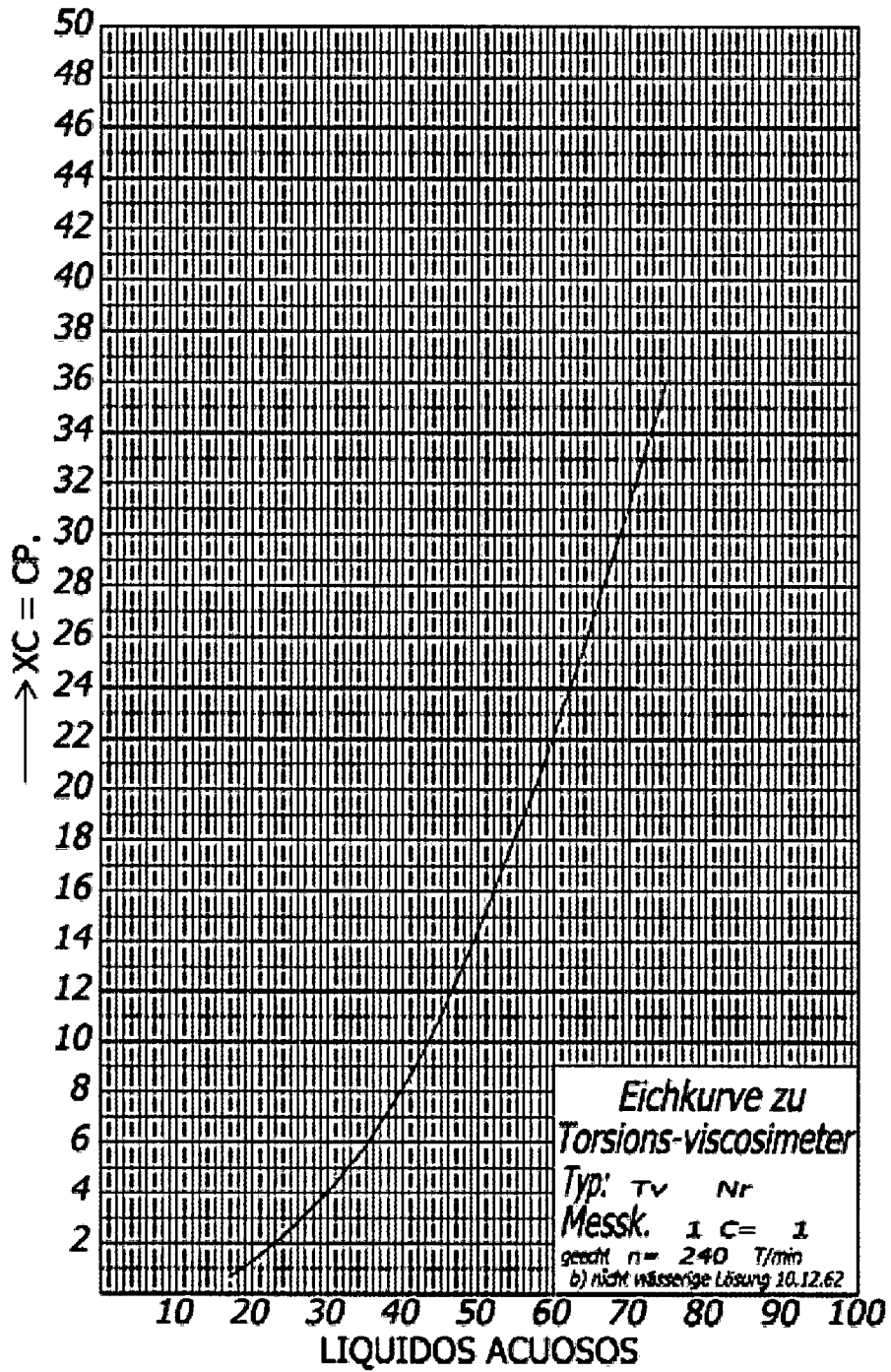


Fuente: Elaboración Propia

### VISCOSÍMETRO TIPO DRAGE

#### Calibración

MS - r 1b 60 Hz

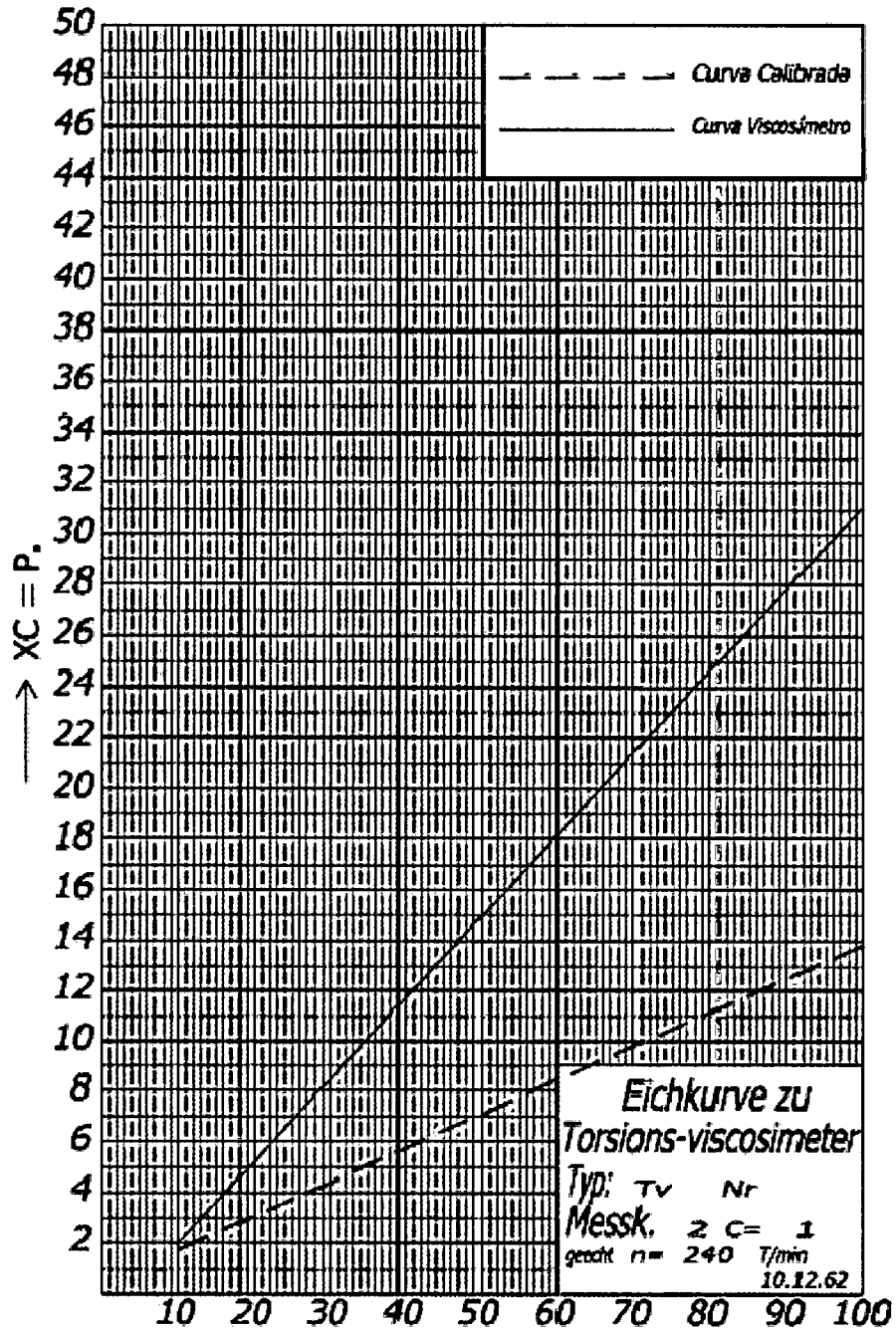


Fuente: Elaboración Propia

### VISCOSÍMETRO TIPO DRAGE

#### Calibración

MS - r 2 60 Hz

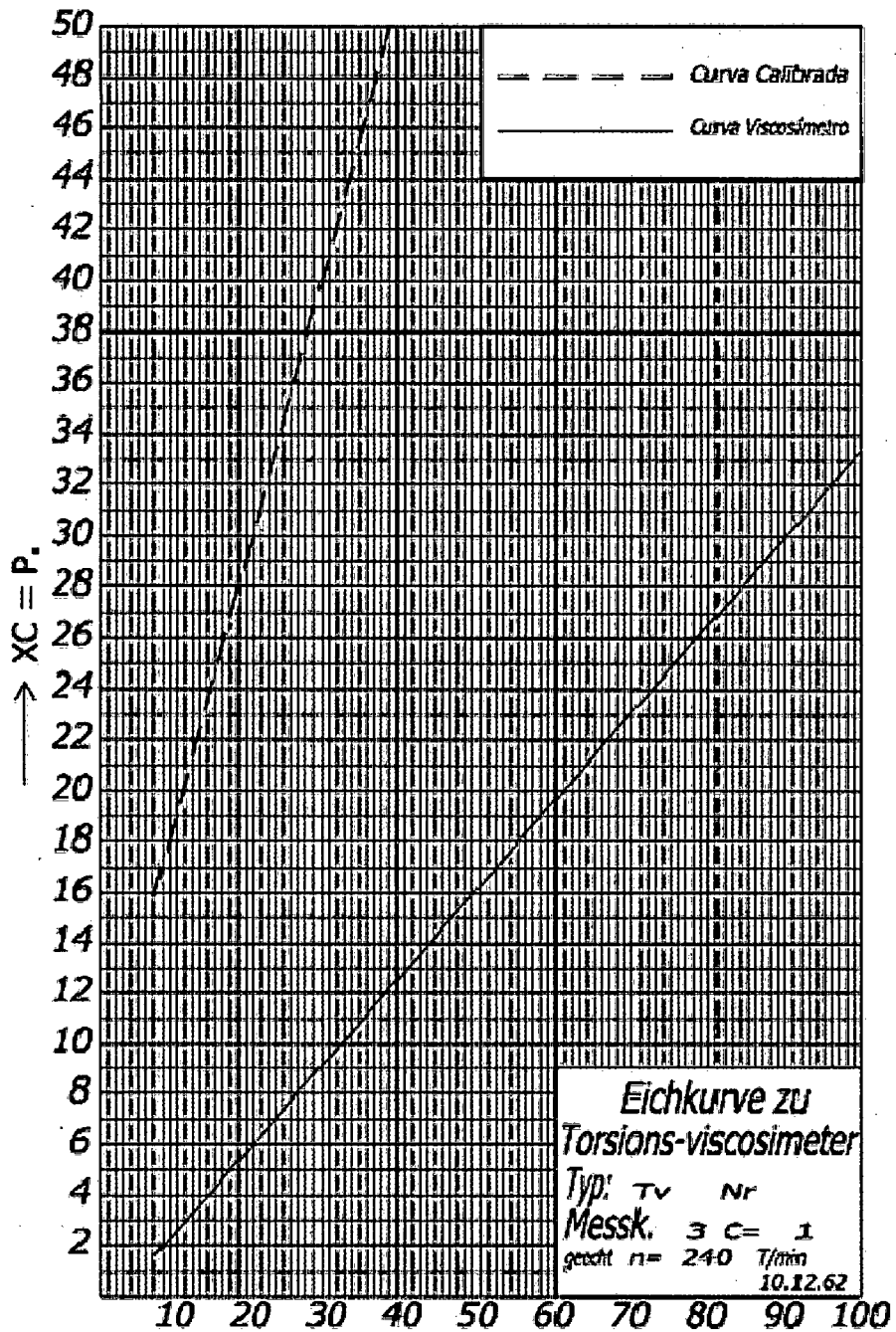


Fuente: Elaboración Propia

### VISCOSÍMETRO TIPO DRAGE

#### Calibración

MS - r 3 60 Hz

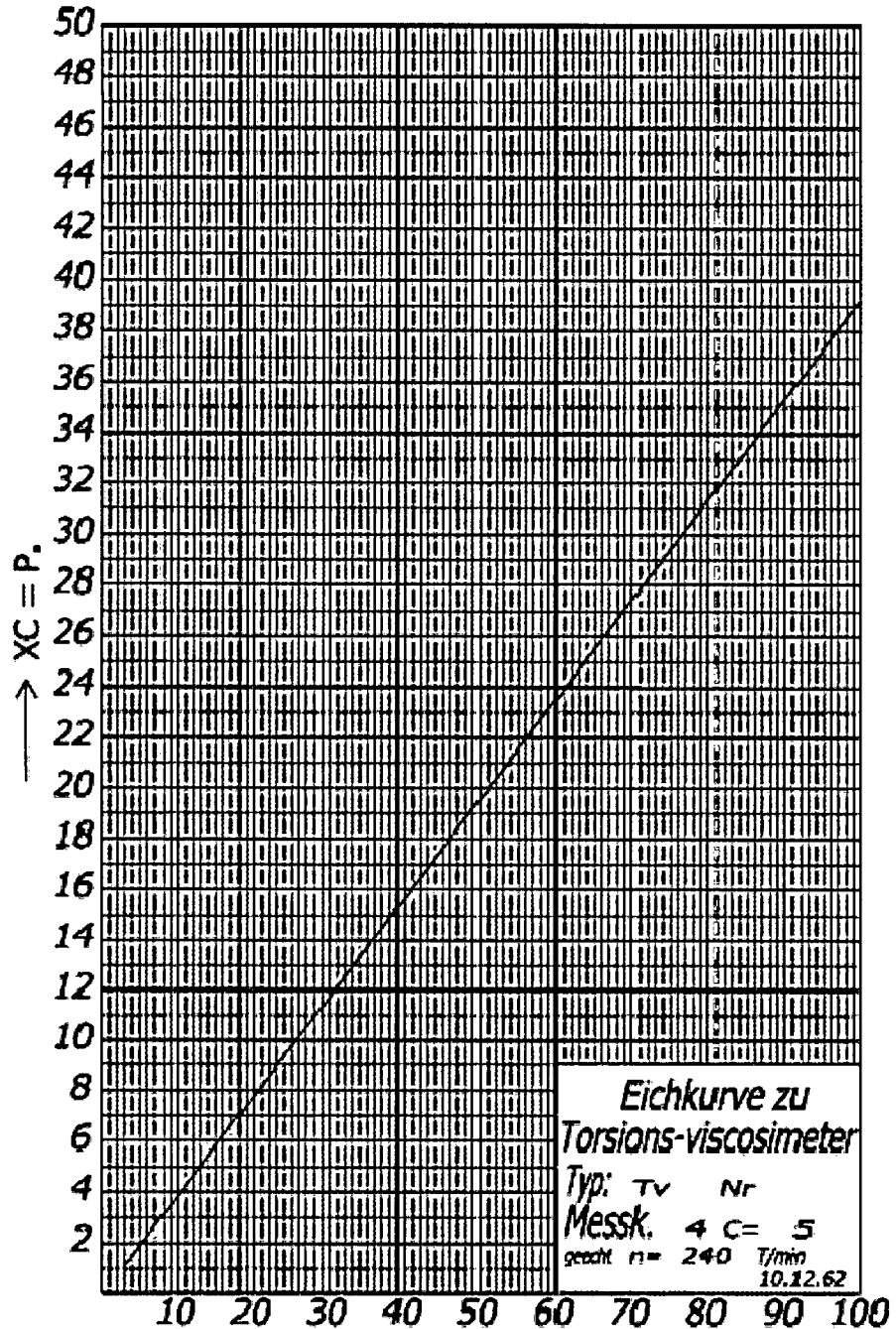


Fuente: Elaboración Propia

### VISCOSÍMETRO TIPO DRAGE

#### Calibración

MS - r 4 60 Hz

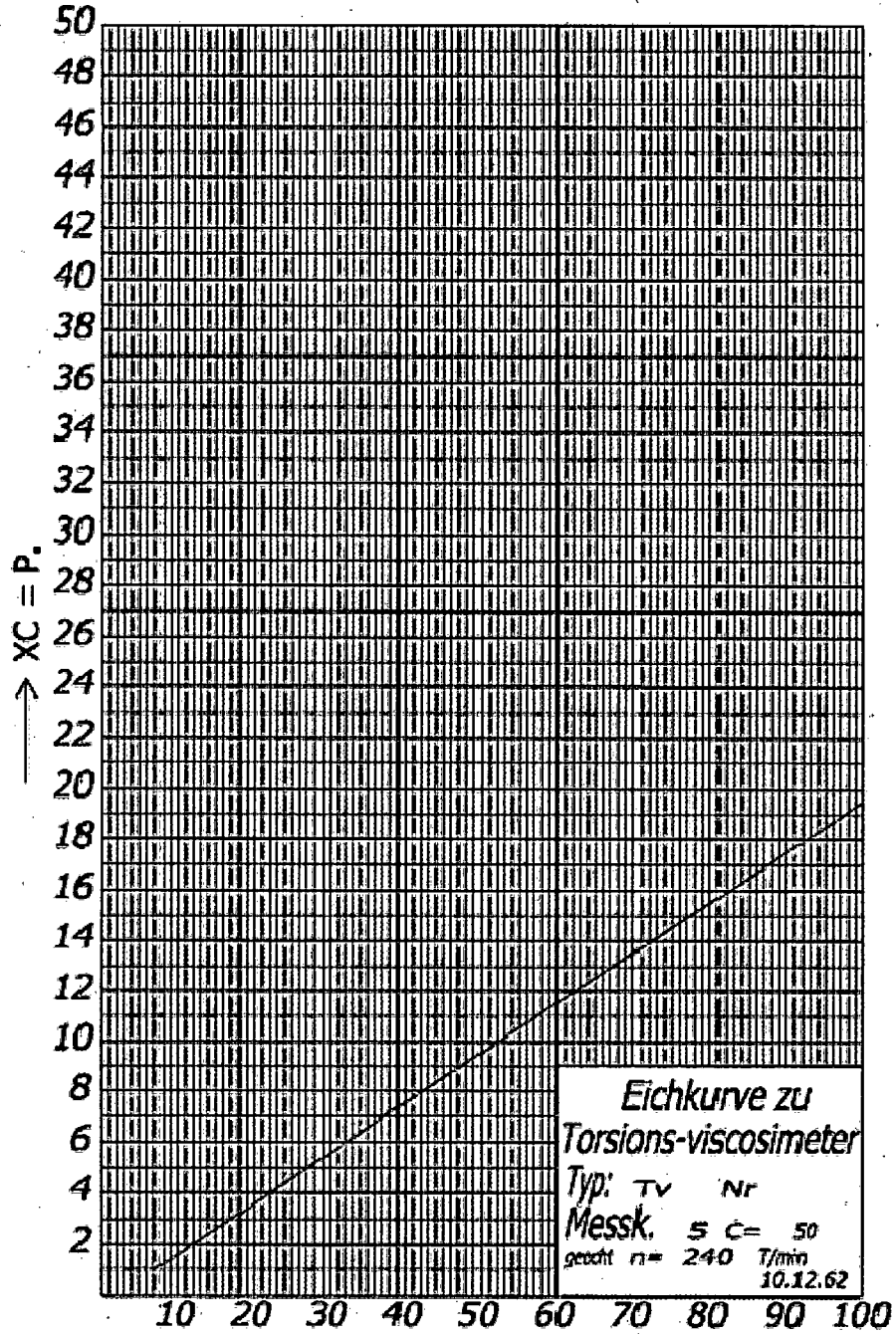


Fuente: Elaboración Propia

### VISCOSÍMETRO TIPO DRAGE

Calibración

MS - r 5 60 Hz



Fuente: Elaboración Propia



## VISCOSÍMETRO TIPO DRAGE

### Calibración

Fecha: 16/08/2006  
Muestra: Aceite SAE 40  
Densidad: 0.894 gr/cm<sup>3</sup>  
Instrumental: Viscosímetro tipo Drage

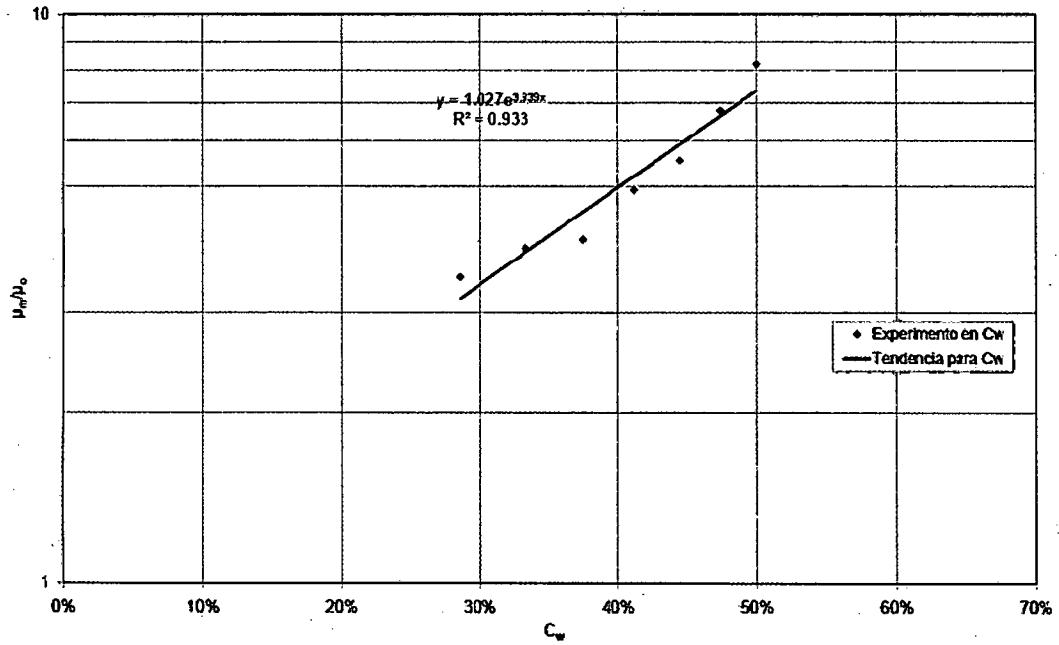
ENSAYO	FLUIDO	PALETA N°	LECTURA INST..	TEMP. (°C)	GRAFICO	VISCOSIDADES		
						VISC. DRAGE (cP)	VISC. SAE 40	
						Cinética (cst)	Dinámica (cP)	
8	Aceite	1	98.5	57.7	MS - r1a	41.00	63.85	57.08
7	Aceite	1	92.5	60.0	MS - r1a	35.00	57.50	51.41
6	Aceite	1	89.0	63.2	MS - r1a	31.80	50.30	44.97
5	Aceite	1	84.0	66.4	MS - r1a	27.40	44.46	39.75
4	Aceite	1	77.0	73.8	MS - r1a	22.00	33.62	30.06
1	Aceite	1	67.0	82.6	MS - r1a	15.00	24.86	22.22
3	Aceite	1	64.0	86.1	MS - r1a	13.30	22.33	19.96
2	Aceite	1	58.0	91.2	MS - r1a	10.00	19.17	17.14
38	Aceite	2	98.5	14.7	MS - r2	1533.00	800.00	715.20
37	Aceite	2	89.0	17.5	MS - r2	1380.00	663.76	593.40
36	Aceite	2	75.5	19.0	MS - r2	1161.00	591.12	528.46
20	Aceite	2	74.5	20.0	MS - r2	1144.00	548.86	490.68
35	Aceite	2	68.0	20.6	MS - r2	1040.00	522.10	466.76
21	Aceite	2	58.8	21.6	MS - r2	890.00	482.10	431.00
34	Aceite	2	51.5	23.0	MS - r2	775.00	435.52	389.35
22	Aceite	2	46.0	25.5	MS - r2	683.00	369.60	330.42
33	Aceite	2	43.0	27.6	MS - r2	685.00	323.25	288.99
23	Aceite	2	32.0	30.0	MS - r2	458.00	274.08	245.03
32	Aceite	2	31.5	33.8	MS - r2	450.00	214.93	192.15
24	Aceite	2	18.0	37.5	MS - r2	230.00	175.00	156.45
31	Aceite	2	16.0	40.8	MS - r2	197.00	145.00	129.63
25	Aceite	2	14.0	44.6	MS - r2	165.00	117.84	105.35
30	Aceite	2	11.0	47.9	MS - r2	116.00	100.56	89.90
26	Aceite	2	9.5	50.0	MS - r2	92.00	90.65	81.04
29	Aceite	2	5.0	55.6	MS - r2	19.00	69.72	62.33
28	Aceite	2	4.5	62.5	MS - r2	11.00	51.71	46.23
27	Aceite	2	3.0	63.6	MS - r2		49.40	44.16
9	Aceite	3	31.0	7.5	MS - r3	326.00	1605.00	1434.87
10	Aceite	3	22.5	10.0	MS - r3	227.00	1219.27	1090.03
11	Aceite	3	21.0	10.5	MS - r3	212.00	1158.06	1035.31
12	Aceite	3	17.5	11.6	MS - r3	172.00	1038.50	928.42
13	Aceite	3	15.5	13.2	MS - r3	149.00	900.00	804.60
14	Aceite	3	13.5	14.1	MS - r3	126.00	838.76	749.85
15	Aceite	3	13.0	15.0	MS - r3	120.00	781.66	698.80
16	Aceite	3	10.0	16.4	MS - r3	87.00	713.83	638.16
17	Aceite	3	8.0	17.6	MS - r3	63.00	657.74	588.02
18	Aceite	3	7.0	18.5	MS - r3	52.00	618.18	552.65
19	Aceite	3	6.2	19.3	MS - r3	43.00	580.68	519.13

Fuente: Elaboración Propia

### VISCOSÍMETRO TIPO DRAGÉ

#### Mezcla: Azúcar – Agua

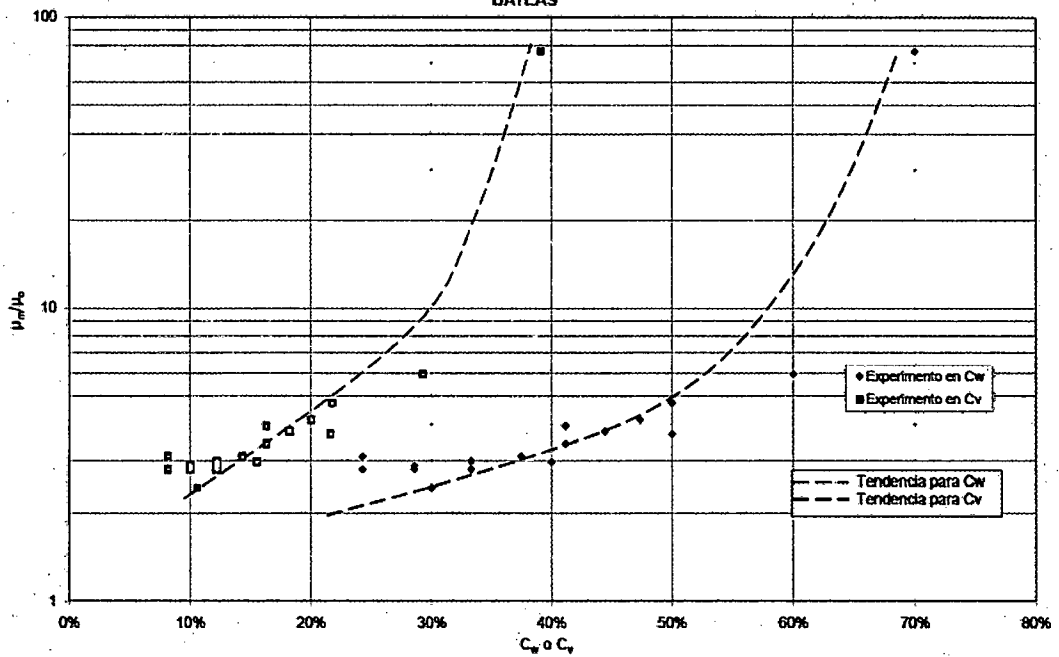
$\mu_m/\mu_o$  Vs  $C_w$   
 (MEZCLA AZUCAR - AGUA)



Fuente: Elaboración Propia

#### Mezcla: Relave – Agua

$\mu_m/\mu_o$  Vs Concentración ( $C_w$  o  $C_v$ )  
 (MEZCLA RELAVE - AGUA)  
 BATEAS



Fuente: Elaboración Propia

**REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA  
 CARACTERÍSTICAS DE LOS ACCESORIOS**

Masa	Código	Descripcion	Diametro (cm)	Peso (gr)
$m_1$	ES 1.1	Esfera de Acero	2.52	65.66
	ES 1.2	Esfera de Acero	2.22	44.07
	EV 1.1	Esfera de Vidrio	2.51	20.61
$m_2$	AL 1.1	Aluminio	-	102.55
	AL 1.2	Aluminio	-	101.57
	AL 2.1	Aluminio	-	51.63
	AL 2.2	Aluminio	-	50.64
	AL 2.3	Aluminio	-	50.26
	AL 3.1	Aluminio	-	9.34
	AL 3.2	Aluminio	-	9.33
	AL 4.1	Aluminio	-	5.26
	AL 4.2	Aluminio	-	5.12
	BR 1.1	Bronce	-	195.70
	BR 1.2	Bronce	-	98.89
	PL 1.1	Plexiglas	-	9.77
	PL 1.2	Plexiglas	-	9.76
	PL 1.3	Plexiglas	-	9.53
	PL 2.1	Plexiglas	-	4.78
	PL 2.2	Plexiglas	-	4.75
	PL 2.3	Plexiglas	-	4.68
	SP 1.1	Soporte	-	6.35
	SP 1.2	Soporte	-	5.90
	SP 1.3	Soporte	-	5.89
	MO 1.1	Moneda	-	3.43
MO 1.2	Moneda	-	3.39	
MO 1.3	Moneda	-	3.37	
MO 1.4	Moneda	-	3.37	
MO 1.5	Moneda	-	3.35	
$m_D$	D1	Polea 1	5.00	45.54
	D2	Polea 2	5.00	25.79

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Agua

MUESTRA	EXPERIMENTO	ENSAYOS
Agua	EXP1	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4
	EXP2	ENS5,ENS6,ENS7,ENS8
	EXP3	ENS9,ENS10,ENS11,ENS12

**Nota:**

Solo se presenta el experimento EXP 1: ENS1.

Se adjunta en archivo digital la data, procesamiento y resultados de cada experimento realizado

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Agua: EXP 1

#### ENS 1

	Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)	V <sub>limite</sub>	V/V <sub>limite</sub>	ln(1/(1-v/v <sub>l</sub> ))	ln((1+v/v <sub>l</sub> )/(1-v/v <sub>l</sub> ))	Vel <sup>2</sup>	Fr
	0.000000	0.000		29.018					
1	0.093486	0.175	1.867	29.018	0.064	0.066499	0.128851	3.485	6864.623
2	0.148786	0.349	3.156	29.018	0.109	0.115144	0.218389	9.961	6937.899
3	0.192798	0.524	3.966	29.018	0.137	0.146944	0.275036	15.726	6996.218
4	0.229308	0.698	4.780	29.018	0.165	0.180009	0.332505	22.852	7044.596
5	0.262855	0.873	5.203	29.018	0.179	0.197583	0.362493	27.067	7089.048
6	0.293210	1.047	5.750	29.018	0.198	0.220822	0.401594	33.059	7129.270
7	0.320968	1.222	6.288	29.018	0.217	0.244212	0.440337	39.535	7166.052
8	0.347180	1.396	6.659	29.018	0.229	0.260662	0.467236	44.336	7200.784
9	0.371641	1.571	7.135	29.018	0.246	0.282209	0.502054	50.910	7233.197
10	0.394549	1.745	7.619	29.018	0.263	0.304561	0.537697	58.047	7263.551
11	0.416773	1.920	7.853	29.018	0.271	0.315579	0.555095	61.675	7293.000
12	0.437415	2.094	8.455	29.018	0.291	0.344429	0.600137	71.491	7320.352
13	0.457719	2.269	8.596	29.018	0.296	0.351298	0.610754	73.891	7347.256
14	0.477008	2.443	9.048	29.018	0.312	0.373695	0.645106	81.872	7372.815
15	0.495455	2.618	9.461	29.018	0.326	0.394593	0.676795	89.517	7397.259
16	0.513637	2.793	9.599	29.018	0.331	0.401669	0.687448	92.145	7421.351
17	0.531084	2.967	10.004	29.018	0.345	0.422713	0.718909	100.072	7444.469
18	0.547889	3.142	10.386	29.018	0.358	0.443017	0.748959	107.864	7466.737
19	0.564492	3.316	10.512	29.018	0.362	0.449821	0.758965	110.505	7488.737
20	0.580619	3.491	10.822	29.018	0.373	0.466729	0.783691	117.124	7510.107
21	0.596225	3.665	11.184	29.018	0.385	0.486785	0.812775	125.075	7530.786
22	0.611578	3.840	11.368	29.018	0.392	0.497173	0.827736	129.231	7551.129
23	0.626688	4.014	11.551	29.018	0.398	0.507584	0.842664	133.421	7571.151
24	0.641300	4.189	11.944	29.018	0.412	0.530380	0.875116	142.671	7590.513
25	0.655590	4.363	12.214	29.018	0.421	0.546269	0.897555	149.173	7609.448
26	0.669723	4.538	12.349	29.018	0.426	0.554375	0.908947	152.506	7628.175
27	0.683567	4.712	12.607	29.018	0.434	0.569962	0.930746	158.939	7646.520
28	0.697142	4.887	12.857	29.018	0.443	0.585302	0.952069	165.301	7664.507
29	0.710505	5.061	13.061	29.018	0.450	0.598003	0.969629	170.587	7682.214
30	0.723715	5.236	13.212	29.018	0.455	0.607528	0.982743	174.562	7699.719
31	0.736692	5.411	13.449	29.018	0.463	0.622650	1.003466	180.886	7716.914
32	0.749425	5.585	13.707	29.018	0.472	0.639342	1.026209	187.885	7733.786
33	0.761933	5.760	13.954	29.018	0.481	0.655577	1.048199	194.706	7750.360
34	0.774378	5.934	14.024	29.018	0.483	0.660277	1.054541	196.682	7766.850
35	0.786687	6.109	14.179	29.018	0.489	0.670665	1.068523	201.052	7783.161
36	0.798820	6.283	14.385	29.018	0.496	0.684623	1.087231	206.928	7799.238
37	0.810773	6.458	14.602	29.018	0.503	0.699537	1.107123	213.207	7815.076
38	0.822597	6.632	14.761	29.018	0.509	0.710649	1.121880	217.884	7830.744
39	0.834381	6.807	14.811	29.018	0.510	0.714169	1.126544	219.366	7846.358
40	0.846008	6.981	15.011	29.018	0.517	0.728346	1.145274	225.330	7861.765
41	0.857528	7.156	15.150	29.018	0.522	0.738349	1.158439	229.535	7877.030
42	0.868863	7.330	15.398	29.018	0.531	0.756341	1.182013	237.089	7892.049
43	0.880188	7.505	15.411	29.018	0.531	0.757339	1.183318	237.508	7907.056
44	0.891367	7.679	15.613	29.018	0.538	0.772242	1.202740	243.752	7921.869
45	0.902457	7.854	15.738	29.018	0.542	0.781632	1.214934	247.680	7936.564
46	0.913472	8.029	15.845	29.018	0.546	0.789734	1.225427	251.065	7951.159
47	0.924348	8.203	16.048	29.018	0.553	0.805225	1.245422	257.523	7965.571
48	0.935128	8.378	16.190	29.018	0.558	0.816304	1.259667	262.130	7979.855
49	0.945903	8.552	16.198	29.018	0.558	0.816890	1.260419	262.374	7994.133
50	0.956579	8.727	16.348	29.018	0.563	0.828676	1.275521	267.262	8008.279
51	0.967143	8.901	16.521	29.018	0.569	0.842450	1.293108	272.959	8022.277
52	0.977632	9.076	16.640	29.018	0.573	0.851948	1.305197	276.877	8036.176
53	0.988009	9.250	16.819	29.018	0.580	0.866562	1.323737	282.886	8049.926
54	0.998400	9.425	16.797	29.018	0.579	0.864706	1.321387	282.124	8063.695
55	1.008657	9.599	17.016	29.018	0.586	0.882824	1.344283	289.544	8077.286
56	1.018864	9.774	17.099	29.018	0.589	0.889793	1.353061	292.387	8090.811
57	1.028932	9.948	17.335	29.018	0.597	0.909798	1.378172	300.516	8104.152
58	1.038975	10.123	17.379	29.018	0.599	0.913499	1.382803	302.015	8117.459
59	1.048911	10.297	17.566	29.018	0.605	0.929708	1.403038	308.554	8130.625
60	1.058892	10.472	17.487	29.018	0.603	0.922816	1.394445	305.778	8143.851
61	1.068767	10.647	17.674	29.018	0.609	0.939227	1.414884	312.378	8156.936
62	1.078586	10.821	17.775	29.018	0.613	0.948153	1.425966	315.951	8169.946
63	1.088292	10.996	17.982	29.018	0.620	0.966730	1.448955	323.351	8182.808
64	1.097977	11.170	18.021	29.018	0.621	0.970269	1.453324	324.755	8195.641

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Agua: EXP 1

#### ENS 1

	Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)	V <sub>límite</sub>	V/V <sub>límite</sub>	ln(1/(1-v/v <sub>l</sub> ))	ln((1+v/v <sub>l</sub> )/(1-v/v <sub>l</sub> ))	Vel <sup>2</sup>	Fr
65	1.107619	11.345	18.101	29.018	0.624	0.977604	1.462366	327.658	8208.417
66	1.117179	11.519	18.257	29.018	0.629	0.991928	1.479979	333.303	8221.085
67	1.126735	11.694	18.264	29.018	0.629	0.992638	1.480851	333.582	8233.747
68	1.136225	11.868	18.391	29.018	0.634	1.004520	1.495416	338.238	8246.322
69	1.145690	12.043	18.440	29.018	0.635	1.009101	1.501022	340.027	8258.864
70	1.155074	12.217	18.599	29.018	0.641	1.024262	1.519530	345.922	8271.298
71	1.164366	12.392	18.783	29.018	0.647	1.042094	1.541222	352.806	8283.611
72	1.173594	12.566	18.913	29.018	0.652	1.054903	1.556753	357.717	8295.838
73	1.182816	12.741	18.926	29.018	0.652	1.056121	1.558228	358.183	8308.058
74	1.192001	12.915	19.002	29.018	0.655	1.063704	1.567399	361.074	8320.229
75	1.201122	13.090	19.135	29.018	0.659	1.077105	1.583573	366.159	8332.315
76	1.210197	13.265	19.232	29.018	0.663	1.086967	1.595448	369.881	8344.340
77	1.219259	13.439	19.260	29.018	0.664	1.089791	1.598842	370.943	8356.348
78	1.228288	13.614	19.330	29.018	0.666	1.097030	1.607539	373.659	8368.312
79	1.237306	13.788	19.354	29.018	0.667	1.099467	1.610463	374.571	8380.261
80	1.246218	13.963	19.584	29.018	0.675	1.123574	1.639318	383.534	8392.070
81	1.255100	14.137	19.650	29.018	0.677	1.130610	1.647714	386.130	8403.839
82	1.263986	14.312	19.641	29.018	0.677	1.129666	1.646588	385.782	8415.614
83	1.272765	14.486	19.881	29.018	0.685	1.155527	1.677357	395.243	8427.247
84	1.281507	14.661	19.965	29.018	0.688	1.164778	1.688328	398.596	8438.830
85	1.290244	14.835	19.976	29.018	0.688	1.166041	1.689824	399.053	8450.408
86	1.298900	15.010	20.163	29.018	0.695	1.186932	1.714522	406.556	8461.877
87	1.307558	15.184	20.159	29.018	0.695	1.186406	1.713902	406.368	8473.350
88	1.316153	15.359	20.306	29.018	0.700	1.203224	1.733720	412.347	8484.739
89	1.324683	15.533	20.461	29.018	0.705	1.221145	1.754773	418.655	8496.042
90	1.333234	15.708	20.411	29.018	0.703	1.215290	1.747902	416.602	8507.372
91	1.341664	15.882	20.704	29.018	0.713	1.249919	1.788440	428.647	8518.542
92	1.350089	16.057	20.716	29.018	0.714	1.251397	1.790166	429.156	8529.706
93	1.358477	16.232	20.807	29.018	0.717	1.262465	1.803070	432.950	8540.821
94	1.366861	16.406	20.817	29.018	0.717	1.263675	1.804478	433.363	8551.930
95	1.375225	16.581	20.867	29.018	0.719	1.269763	1.811565	435.438	8563.013
96	1.383553	16.755	20.957	29.018	0.722	1.280891	1.824500	439.211	8574.048
97	1.391827	16.930	21.094	29.018	0.727	1.298005	1.844346	444.963	8585.012
98	1.400094	17.104	21.112	29.018	0.728	1.300261	1.846959	445.717	8595.966
99	1.408350	17.279	21.140	29.018	0.729	1.303825	1.851084	446.905	8606.906
100	1.416542	17.453	21.305	29.018	0.734	1.325012	1.875558	453.915	8617.761
101	1.424710	17.628	21.368	29.018	0.736	1.333161	1.884951	456.587	8628.584
102	1.432858	17.802	21.420	29.018	0.738	1.340041	1.892870	458.831	8639.381
103	1.441004	17.977	21.426	29.018	0.738	1.340733	1.893667	459.056	8650.175
104	1.449107	18.151	21.539	29.018	0.742	1.355821	1.911006	463.941	8660.912
105	1.457182	18.326	21.614	29.018	0.745	1.365857	1.922519	467.164	8671.612
106	1.465227	18.500	21.695	29.018	0.748	1.376802	1.935055	470.655	8682.272
107	1.473261	18.675	21.724	29.018	0.749	1.380866	1.939704	471.945	8692.917
108	1.481217	18.850	21.937	29.018	0.756	1.410501	1.973527	481.244	8703.460
109	1.489171	19.024	21.943	29.018	0.756	1.411280	1.974415	481.486	8713.999
110	1.497122	19.199	21.951	29.018	0.756	1.412451	1.975748	481.849	8724.535
111	1.505016	19.373	22.110	29.018	0.762	1.435133	2.001535	488.833	8734.995
112	1.512866	19.548	22.233	29.018	0.766	1.453234	2.022057	494.328	8745.397
113	1.520719	19.722	22.225	29.018	0.766	1.451983	2.020640	493.951	8755.802
114	1.528524	19.897	22.362	29.018	0.771	1.472308	2.043629	500.045	8766.145
115	1.536290	20.071	22.474	29.018	0.774	1.489321	2.062826	505.080	8776.435
116	1.544033	20.246	22.541	29.018	0.777	1.499575	2.074374	508.085	8786.695
117	1.551757	20.420	22.596	29.018	0.779	1.508171	2.084046	510.588	8796.930
118	1.559442	20.595	22.711	29.018	0.783	1.526188	2.104282	515.783	8807.113
119	1.567057	20.769	22.920	29.018	0.790	1.559846	2.141968	525.309	8817.203
120	1.574637	20.944	23.025	29.018	0.793	1.577351	2.161508	530.171	8827.247
121	1.582200	21.118	23.077	29.018	0.795	1.586025	2.171176	532.558	8837.269
122	1.589754	21.293	23.105	29.018	0.796	1.590664	2.176342	533.827	8847.278
123	1.597283	21.468	23.181	29.018	0.799	1.603722	2.190871	537.378	8857.255
124	1.604821	21.642	23.154	29.018	0.798	1.598991	2.185610	536.096	8867.243
125	1.612309	21.817	23.308	29.018	0.803	1.625707	2.215286	543.279	8877.165
126	1.619794	21.991	23.318	29.018	0.804	1.627345	2.217101	543.715	8887.083
127	1.627227	22.166	23.481	29.018	0.809	1.656378	2.249246	551.349	8896.933
128	1.634643	22.340	23.535	29.018	0.811	1.666145	2.260039	553.880	8906.759
129	1.641847	22.515	24.227	29.018	0.835	1.801161	2.408147	586.958	8916.305

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Agua: EXP 1

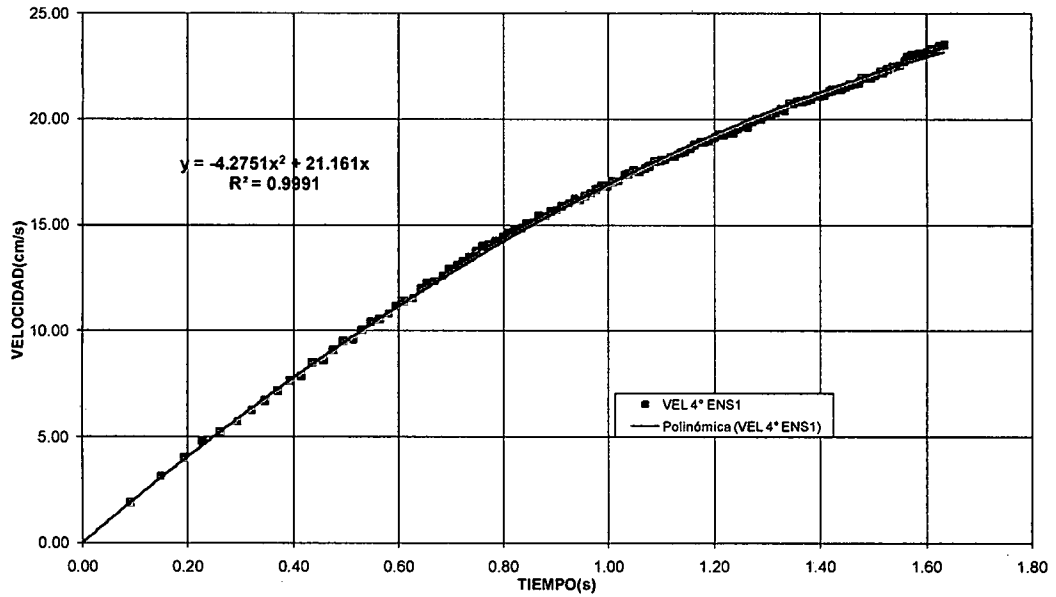
ENS 1										
	Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)		V <sub>limite</sub>	V/V <sub>limite</sub>	ln(1/(1-v/v <sub>l</sub> ))	ln((1+v/v <sub>l</sub> )/(1-v/v <sub>l</sub> ))	Vel <sup>2</sup>	Fr
130	1.648780	22.689	25.174		29.018	0.868	2.021380	2.645995	633.742	8925.492
131	1.655951	22.864	24.339		29.018	0.839	1.824706	2.433783	592.373	8934.994
132	1.663469	23.038	23.215		29.018	0.800	1.609550	2.197349	538.952	8944.956
133	1.671284	23.213	22.333		29.018	0.770	1.468018	2.038782	498.766	8955.311
134	1.678959	23.387	22.740		29.018	0.784	1.530890	2.109556	517.128	8965.481
135	1.686308	23.562	23.749		29.018	0.818	1.706059	2.304026	564.025	8975.219
136	1.693415	23.736	24.558		29.018	0.846	1.872674	2.485851	603.090	8984.636
137	1.700451	23.911	24.806		29.018	0.855	1.929834	2.547626	615.323	8993.959
138	1.707602	24.086	24.407		29.018	0.841	1.839359	2.449711	595.691	9003.435
139	1.714980	24.260	23.656		29.018	0.815	1.688498	2.284695	559.600	9013.211
140	1.722408	24.435	23.497		29.018	0.810	1.659236	2.252406	552.091	9023.054
141	1.729739	24.609	23.808		29.018	0.820	1.717187	2.316259	566.798	9032.768
142	1.736940	24.784	24.237		29.018	0.835	1.803269	2.410445	587.448	9042.310
143	1.744069	24.958	24.482		29.018	0.844	1.858269	2.467588	599.373	9051.756
144	1.751294	25.133	24.157		29.018	0.832	1.786570	2.392233	583.551	9061.330
145	1.758583	25.307	23.945		29.018	0.825	1.743866	2.345532	573.349	9070.988
146	1.765953	25.482	23.682		29.018	0.816	1.693297	2.289982	560.815	9080.754
147	1.773257	25.656	23.896		29.018	0.823	1.734220	2.334957	570.996	9090.432
148	1.780498	25.831	24.103		29.018	0.831	1.775650	2.380309	580.975	9100.027
149	1.787622	26.005	24.499		29.018	0.844	1.859621	2.471704	600.215	9109.467
150	1.794805	26.180	24.298		29.018	0.837	1.816054	2.424370	590.395	9118.985
151	1.801983	26.354	24.315		29.018	0.838	1.819647	2.428279	591.218	9128.496
152	1.809179	26.529	24.254		29.018	0.836	1.806798	2.414290	588.264	9138.031
153	1.816316	26.704	24.455		29.018	0.843	1.849795	2.461043	598.031	9147.488
154	1.823417	26.878	24.579		29.018	0.847	1.877337	2.490901	604.110	9156.898
155	1.830486	27.053	24.690		29.018	0.851	1.902717	2.518355	609.591	9166.265
156	1.837555	27.227	24.690		29.018	0.851	1.902717	2.518355	609.591	9175.631
157	1.844700	27.402	24.427		29.018	0.842	1.843813	2.454549	596.692	9185.099
158	1.851805	27.576	24.565		29.018	0.847	1.874225	2.487531	603.430	9194.514
159	1.858985	27.751	24.308		29.018	0.838	1.818208	2.426713	590.889	9204.028
160	1.866148	27.925	24.366		29.018	0.840	1.830531	2.440118	593.697	9213.519
161	1.873229	28.100	24.648		29.018	0.849	1.893097	2.507955	607.527	9222.902
162	1.880133	28.274	25.280		29.018	0.871	2.049273	2.675838	639.077	9232.050
163	1.887096	28.449	25.066		29.018	0.864	1.993556	2.616168	628.293	9241.277
164	1.893828	28.623	25.926		29.018	0.893	2.238949	2.877339	672.150	9250.197
165	1.900529	28.798	26.046		29.018	0.898	2.278505	2.919075	678.384	9259.076
166	1.907510	28.972	25.001		29.018	0.862	1.977337	2.598753	625.057	9268.326
167	1.914783	29.147	23.997		29.018	0.827	1.754302	2.356962	575.874	9277.964
168	1.922170	29.322	23.627		29.018	0.814	1.683137	2.278787	558.237	9287.752
169	1.929407	29.496	24.117		29.018	0.831	1.778364	2.383274	581.618	9297.341
170	1.936322	29.671	25.240		29.018	0.870	2.038574	2.664397	637.045	9306.504
171	1.943096	29.845	25.765		29.018	0.888	2.188276	2.823736	663.841	9315.480
172	1.949939	30.020	25.505		29.018	0.879	2.111447	2.742153	650.522	9324.548
173	1.956797	30.194	25.450		29.018	0.877	2.095692	2.725375	647.679	9333.635
174	1.963682	30.369	25.350		29.018	0.874	2.068111	2.695959	642.609	9342.758
175	1.970710	30.543	24.834		29.018	0.856	1.936560	2.554876	616.725	9352.071
176	1.977729	30.718	24.866		29.018	0.857	1.944199	2.563106	618.307	9361.371
177	1.984770	30.892	24.788		29.018	0.854	1.925661	2.543126	614.449	9370.701
178	1.991771	31.067	24.930		29.018	0.859	1.959714	2.579807	621.491	9379.978
179	1.998732	31.241	25.073		29.018	0.864	1.995379	2.618124	628.654	9389.202
180	2.006675	31.416	21.973		29.018	0.757	1.415584	1.979315	482.820	9399.727
181	2.030464	31.590	7.337		29.018	0.253	0.291462	0.516867	53.827	9431.249
182	2.084326	31.765	3.240		29.018	0.112	0.118408	0.224268	10.500	9502.620

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

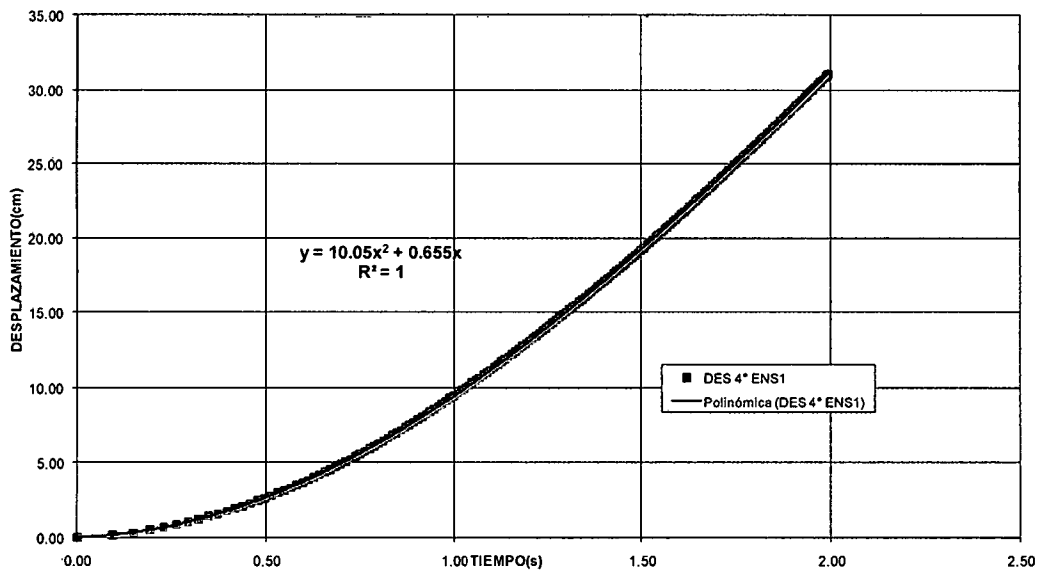
Agua: EXP 1

VELOCIDAD Vs TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

DESPLAZAMIENTO Vs TIEMPO



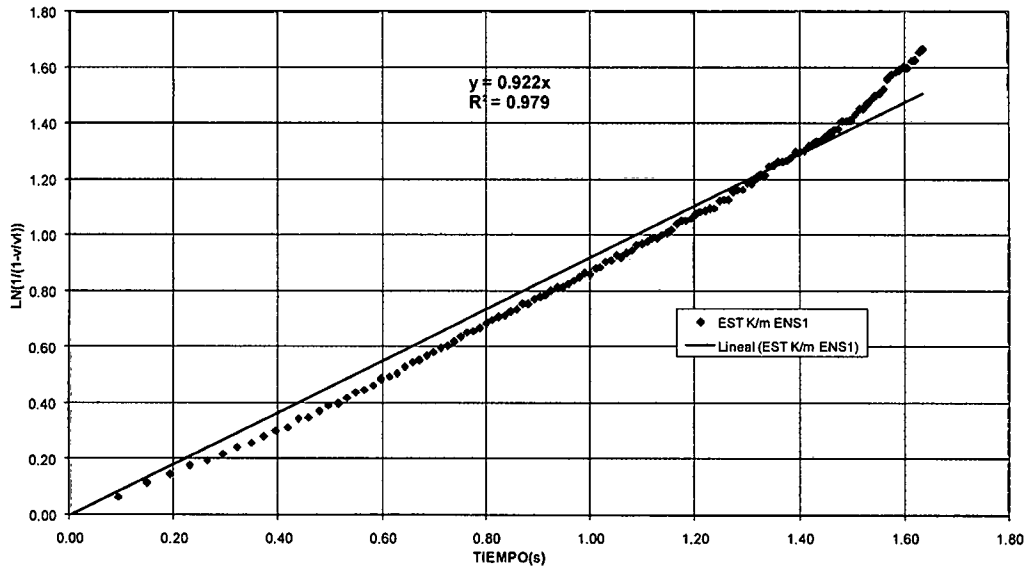
Fuente: Elaboración Propia



## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

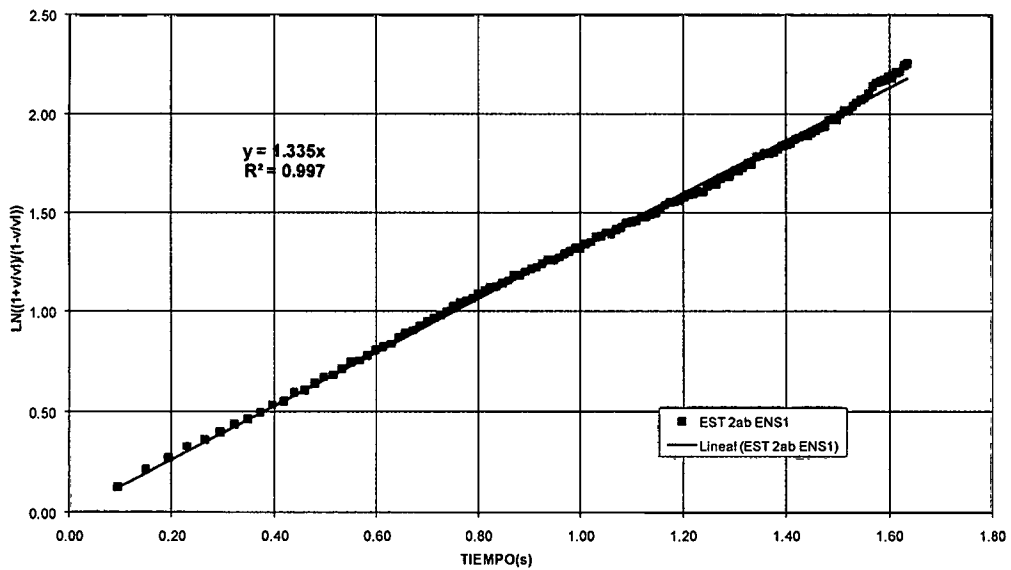
Agua: EXP 1

$\ln(1/(1-v/v_i))$  Vs TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

$\ln((1+v/v_i)/(1-v/v_i))$  Vs TIEMPO  
(REGIMEN TURBULENTO)



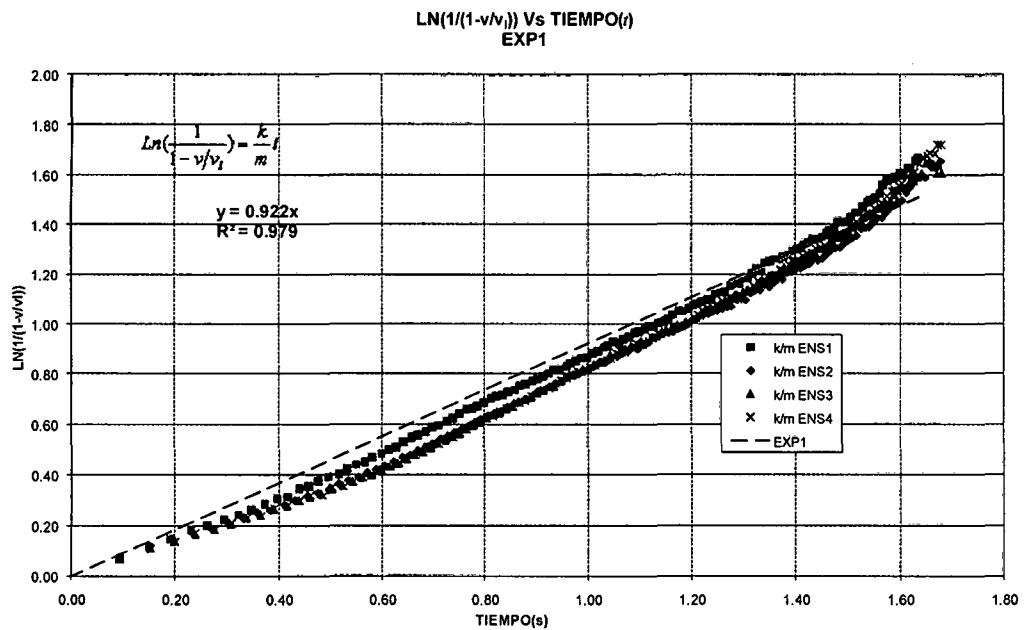
Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Agua: EXP 1



Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Aceite SAE 40

MUESTRA	EXPERIMENTO	ENSAYOS
1.- Aceite SAE 40	EXP1	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4
	EXP2	ENS5,ENS6,ENS7,ENS8
	EXP3	ENS9,ENS10,ENS11,ENS12
	EXP4	ENS13,ENS14,ENS15,ENS16
	EXP5	ENS17,ENS18,ENS19,ENS20
2.- Aceite SAE 40	EXP1	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4
	EXP2	ENS5,ENS6,ENS7,ENS8
	EXP3	ENS9,ENS10,ENS11,ENS12
	EXP4	ENS13,ENS14,ENS15,ENS16
	EXP5	ENS17,ENS18,ENS19,ENS20

**Nota:**

Solo se presenta el experimento EXP 3: ENS9.

Se adjunta en archivo digital la data, procesamiento y resultados de cada experimento realizado

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Aceite SAE 40: EXP 3

ENS 9									
	Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)	V <sub>limite</sub>	V/V <sub>limite</sub>	$\ln(1/(1-v/v_l))$	$\ln((1+v/v_l)/(1-v/v_l))$	Vel <sup>2</sup>	Fr
	0.00000	0.000		20.695					
1	0.049907	0.175	3.497	20.695	0.169	0.185109	0.341245	12.230	5581.725
2	0.081861	0.349	5.462	20.695	0.264	0.306428	0.540653	29.834	5921.579
3	0.108346	0.524	6.590	20.695	0.318	0.383354	0.659795	43.426	6210.309
4	0.131360	0.698	7.584	20.695	0.366	0.456423	0.768642	57.514	6464.452
5	0.152010	0.873	8.452	20.695	0.408	0.524934	0.867393	71.436	6693.850
6	0.170917	1.047	9.231	20.695	0.446	0.590692	0.959531	85.214	6904.180
7	0.188607	1.222	9.866	20.695	0.477	0.647682	1.037521	97.342	7100.610
8	0.205424	1.396	10.378	20.695	0.501	0.696134	1.102593	107.710	7286.540
9	0.221376	1.571	10.941	20.695	0.529	0.752228	1.176636	119.708	7461.799
10	0.236359	1.745	11.649	20.695	0.563	0.827540	1.274068	135.693	7625.126
11	0.250895	1.920	12.007	20.695	0.580	0.867943	1.325485	144.167	7782.141
12	0.264931	2.094	12.435	20.695	0.601	0.918427	1.388964	154.621	7932.200
13	0.278490	2.269	12.872	20.695	0.622	0.972838	1.456493	165.691	8075.532
14	0.291630	2.443	13.283	20.695	0.642	1.026733	1.522542	176.427	8212.758
15	0.304383	2.618	13.686	20.695	0.661	1.082645	1.590247	187.297	8344.235
16	0.316803	2.793	14.053	20.695	0.679	1.136414	1.654632	197.475	8470.552
17	0.328875	2.967	14.458	20.695	0.699	1.199339	1.729147	209.024	8591.602
18	0.340643	3.142	14.831	20.695	0.717	1.261085	1.801462	219.963	8707.881
19	0.352244	3.316	15.045	20.695	0.727	1.298174	1.844542	226.341	8820.775
20	0.363651	3.491	15.301	20.695	0.739	1.344514	1.898016	234.106	8930.036
21	0.374780	3.665	15.683	20.695	0.758	1.418000	1.982064	245.948	9034.912
22	0.385680	3.840	16.012	20.695	0.774	1.485995	2.059075	256.390	9135.933
23	0.396414	4.014	16.260	20.695	0.786	1.540324	2.120128	264.382	9233.733
24	0.407005	4.189	16.479	20.695	0.796	1.591091	2.176818	271.569	9328.556
25	0.417411	4.363	16.772	20.695	0.810	1.663121	2.256698	281.311	9420.071
26	0.427687	4.538	16.985	20.695	0.821	1.718731	2.317955	288.474	9508.809
27	0.437845	4.712	17.182	20.695	0.830	1.773370	2.377818	295.215	9594.908
28	0.447862	4.887	17.424	20.695	0.842	1.844696	2.455508	303.584	9678.213
29	0.457760	5.061	17.633	20.695	0.852	1.910873	2.527166	310.928	9758.952
30	0.467555	5.236	17.819	20.695	0.861	1.973343	2.594462	317.502	9837.292
31	0.477238	5.411	18.025	20.695	0.871	2.047692	2.674148	324.889	9913.199
32	0.486792	5.585	18.268	20.695	0.883	2.143256	2.775977	333.722	9986.587
33	0.496312	5.760	18.333	20.695	0.886	2.170506	2.804901	336.110	10058.216
34	0.505814	5.934	18.368	20.695	0.888	2.185321	2.820605	337.384	10128.212
35	0.515158	6.109	18.679	20.695	0.903	2.328583	2.971787	348.890	10195.579
36	0.524465	6.283	18.753	20.695	0.906	2.366105	3.011193	351.670	10261.232
37	0.533658	6.458	18.985	20.695	0.917	2.493642	3.144607	360.446	10324.662
38	0.542779	6.632	19.135	20.695	0.925	2.585388	3.240124	366.159	10386.200
39	0.551932	6.807	19.068	20.695	0.921	2.543391	3.196445	363.603	10446.559
40	0.561021	6.981	19.203	20.695	0.928	2.629543	3.285968	368.742	10505.113
41	0.570045	7.156	19.341	20.695	0.935	2.726808	3.386694	374.073	10561.891
42	0.578997	7.330	19.497	20.695	0.942	2.848845	3.512609	380.115	10616.881
43	0.587928	7.505	19.542	20.695	0.944	2.887848	3.552752	381.904	10670.424
44	0.596796	7.679	19.681	20.695	0.951	3.016191	3.684540	387.350	10722.293
45	0.605648	7.854	19.717	20.695	0.953	3.051911	3.721141	388.751	10772.786
46	0.614483	8.029	19.755	20.695	0.955	3.091467	3.761634	390.249	10821.913
47	0.623233	8.203	19.947	20.695	0.964	3.319737	3.994637	397.868	10869.326
48	0.631984	8.378	19.944	20.695	0.964	3.316695	3.991540	397.777	10915.519
49	0.640662	8.552	20.112	20.695	0.972	3.569656	4.248620	404.497	10960.125
50	0.649374	8.727	20.034	20.695	0.968	3.443324	4.120363	401.346	11003.715
51	0.658051	8.901	20.114	20.695	0.972	3.573640	4.252661	404.590	11045.954
52	0.666685	9.076	20.215	20.695	0.977	3.763045	4.444518	408.630	11086.831
53	0.675258	9.250	20.358	20.695	0.984	4.118878	4.803860	414.466	11126.294
54	0.683881	9.425	20.240	20.695	0.978	3.818218	4.500321	409.674	11164.870
55	0.692473	9.599	20.313	20.695	0.982	3.993333	4.677218	412.635	11202.206
56	0.701032	9.774	20.392	20.695	0.985	4.223066	4.908859	415.823	11238.321
57	0.709544	9.948	20.504	20.695	0.991	4.687145	5.375675	420.428	11273.184
58	0.718071	10.123	20.468	20.695	0.989	4.513881	5.201535	418.950	11307.071
59	0.726567	10.297	20.543	20.695	0.993	4.913455	5.602922	422.013	11339.817
60	0.735105	10.472	20.442	20.695	0.988	4.403855	5.090868	417.871	11371.719
61	0.743548	10.647	20.672	20.695	0.999	6.798192	7.490781	427.328	11402.289
62	0.752019	10.821	20.604	20.695	0.996	5.422182	6.113118	424.508	11432.001
63	0.760473	10.996	20.645	20.695	0.998	6.025850	6.717788	426.216	11460.714
64	0.768910	11.170	20.687	20.695	1.000	7.810559	8.503504	427.936	11488.449
65	0.777413	11.345	20.526	20.695	0.992	4.807990	5.497047	421.318	11515.491
66	0.785895	11.519	20.577	20.695	0.994	5.165776	5.856065	423.407	11541.573
67	0.794403	11.694	20.514	20.695	0.991	4.739029	5.427793	420.823	11566.858

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Aceite SAE 40: EXP 3

ENS 9									
	Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)	$V_{\text{limite}}$	$V/V_{\text{limite}}$	$\ln(1/(1-v/v_i))$	$\ln((1+v/v_i)/(1-v/v_i))$	Vel <sup>2</sup>	Fr
68	0.802876	11.868	20.599	20.695	0.995	5.370351	6.061169	424.307	11591.185
69	0.811366	12.043	20.557	20.695	0.993	5.013810	5.703628	422.610	11614.726
70	0.819780	12.217	20.743	20.695	1.002			430.279	11637.251
71	0.828304	12.392	20.475	20.695	0.989	4.546169	5.233998	419.245	11659.273
72	0.836744	12.566	20.679	20.695	0.999	7.181222	7.873989	427.632	11680.307
73	0.845230	12.741	20.567	20.695	0.994	5.086873	5.776927	423.008	11700.703
74	0.853706	12.915	20.591	20.695	0.995	5.297359	5.988001	424.007	11720.342
75	0.862166	13.090	20.630	20.695	0.997	5.768960	6.460544	425.612	11739.234
76	0.870635	13.265	20.608	20.695	0.996	5.476873	6.167927	424.708	11757.457
77	0.879113	13.439	20.587	20.695	0.995	5.251526	5.942050	423.807	11775.030
78	0.887617	13.614	20.524	20.695	0.992	4.793806	5.482804	421.219	11792.005
79	0.896166	13.788	20.416	20.695	0.986	4.304987	4.991360	416.797	11808.433
80	0.904690	13.963	20.475	20.695	0.989	4.546169	5.233998	419.245	11824.200
81	0.913233	14.137	20.430	20.695	0.987	4.357668	5.044391	417.382	11839.410
82	0.921852	14.312	20.250	20.695	0.978	3.839097	4.521430	410.054	11854.176
83	0.930385	14.486	20.454	20.695	0.988	4.452337	5.139641	418.361	11868.244
84	0.938944	14.661	20.392	20.695	0.985	4.223066	4.908859	415.823	11881.827
85	0.947536	14.835	20.313	20.695	0.982	3.993333	4.677218	412.635	11894.953
86	0.956102	15.010	20.375	20.695	0.985	4.169573	4.854960	415.144	11907.553
87	0.964672	15.184	20.366	20.695	0.984	4.140280	4.825436	414.756	11919.696
88	0.973244	15.359	20.361	20.695	0.984	4.125959	4.811000	414.563	11931.399
89	0.981815	15.533	20.363	20.695	0.984	4.133093	4.818191	414.660	11942.681
90	0.990440	15.708	20.236	20.695	0.978	3.807947	4.489935	409.484	11953.632
91	0.999014	15.882	20.356	20.695	0.984	4.111847	4.796772	414.369	11964.141
92	1.007589	16.057	20.354	20.695	0.984	4.104868	4.789735	414.273	11974.297
93	1.016217	16.232	20.229	20.695	0.977	3.792744	4.474560	409.199	11984.178
94	1.024867	16.406	20.177	20.695	0.975	3.688091	4.368649	407.120	11993.767
95	1.033493	16.581	20.233	20.695	0.978	3.802852	4.484783	409.389	12003.033
96	1.042105	16.755	20.266	20.695	0.979	3.876768	4.559502	410.721	12012.012
97	1.050739	16.930	20.215	20.695	0.977	3.763045	4.444518	408.630	12020.760
98	1.059403	17.104	20.145	20.695	0.973	3.627025	4.306786	405.805	12029.304
99	1.068118	17.279	20.027	20.695	0.968	3.432951	4.109820	401.070	12037.681
100	1.076761	17.453	20.194	20.695	0.976	3.720160	4.401118	407.780	12045.795
101	1.085453	17.628	20.080	20.695	0.970	3.515570	4.193740	403.195	12053.779
102	1.094149	17.802	20.070	20.695	0.970	3.500670	4.178613	402.824	12061.610
103	1.102873	17.977	20.006	20.695	0.967	3.402503	4.078865	400.243	12069.327
104	1.111614	18.151	19.967	20.695	0.965	3.347563	4.022969	398.687	12076.939
105	1.120342	18.326	19.997	20.695	0.966	3.389282	4.065419	399.876	12084.437
106	1.129091	18.500	19.949	20.695	0.964	3.322788	3.997744	397.959	12091.869
107	1.137850	18.675	19.926	20.695	0.963	3.292718	3.967115	397.050	12099.241
108	1.146587	18.850	19.976	20.695	0.965	3.360202	4.035833	399.053	12106.543
109	1.155354	19.024	19.908	20.695	0.962	3.269345	3.943294	396.326	12113.836
110	1.164156	19.199	19.829	20.695	0.958	3.173509	3.845506	393.181	12121.139
111	1.172934	19.373	19.883	20.695	0.961	3.238140	3.911474	395.333	12128.417
112	1.181692	19.548	19.928	20.695	0.963	3.295682	3.970134	397.141	12135.688
113	1.190471	19.722	19.881	20.695	0.961	3.235355	3.908633	395.243	12143.000
114	1.199244	19.897	19.894	20.695	0.961	3.252194	3.925807	395.784	12150.344
115	1.208021	20.071	19.885	20.695	0.961	3.240934	3.914324	395.424	12157.739
116	1.216570	20.246	20.416	20.695	0.986	4.304987	4.991360	416.797	12165.000
117	1.225114	20.420	20.428	20.695	0.987	4.348688	5.035352	417.285	12172.324
118	1.234082	20.595	19.462	20.695	0.940	2.820235	3.483133	378.760	12180.092
119	1.243250	20.769	19.037	20.695	0.920	2.524393	3.176662	362.414	12188.130
120	1.252090	20.944	19.744	20.695	0.954	3.079654	3.749545	389.808	12195.981
121	1.260628	21.118	20.442	20.695	0.988	4.403855	5.090868	417.871	12203.665
122	1.269231	21.293	20.287	20.695	0.980	3.927482	4.610734	411.581	12211.513
123	1.278196	21.468	19.468	20.695	0.941	2.825530	3.488590	379.013	12219.810
124	1.287273	21.642	19.228	20.695	0.929	2.646700	3.303762	369.718	12228.340
125	1.296046	21.817	19.894	20.695	0.961	3.252194	3.925807	395.784	12236.710
126	1.304779	21.991	19.985	20.695	0.966	3.373015	4.048870	399.418	12245.167
127	1.313651	22.166	19.672	20.695	0.951	3.007477	3.675605	387.001	12253.889
128	1.322781	22.340	19.116	20.695	0.924	2.573367	3.227629	365.438	12263.001
129	1.331952	22.515	19.031	20.695	0.920	2.520643	3.172756	362.177	12272.293
130	1.340857	22.689	19.599	20.695	0.947	2.938617	3.604939	384.138	12281.446
131	1.349730	22.864	19.670	20.695	0.950	3.005311	3.673385	386.913	12290.691
132	1.358818	23.038	19.205	20.695	0.928	2.630960	3.287438	368.823	12300.285
133	1.368072	23.213	18.860	20.695	0.911	2.422994	3.070801	355.710	12310.177
134	1.377106	23.387	19.320	20.695	0.934	2.711120	3.370471	373.245	12319.946
135	1.386102	23.562	19.401	20.695	0.937	2.772285	3.433674	376.405	12329.776

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Aceite SAE 40: EXP 3

ENS 9

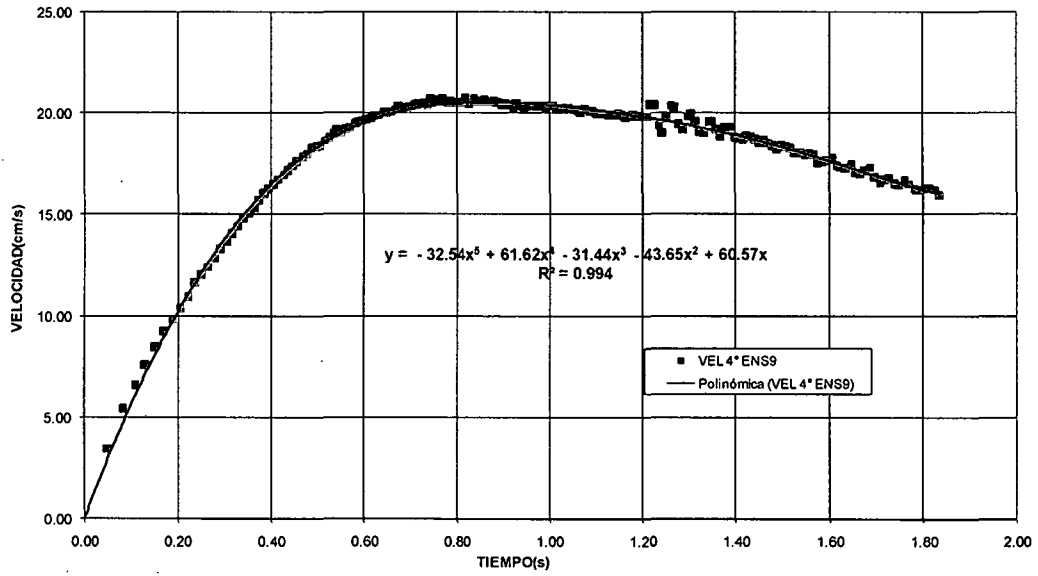
	Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)	V <sub>límite</sub>	V/V <sub>límite</sub>	$\ln(1/(1-v/v_l))$	$\ln((1+v/v_l)/(1-v/v_l))$	Vel <sup>2</sup>	Fr
136	1.395374	23.736	18.824	20.695	0.910	2.403234	3.050115	354.330	12340.003
137	1.404677	23.911	18.761	20.695	0.907	2.370265	3.015557	351.972	12350.348
138	1.413987	24.086	18.747	20.695	0.906	2.362998	3.007933	351.443	12360.772
139	1.423188	24.260	18.969	20.695	0.917	2.484032	3.134582	359.819	12371.127
140	1.432466	24.435	18.811	20.695	0.909	2.396751	3.043323	353.872	12381.606
141	1.441788	24.609	18.723	20.695	0.905	2.350687	2.995010	350.539	12392.151
142	1.451187	24.784	18.569	20.695	0.897	2.275795	2.916218	344.819	12402.778
143	1.460550	24.958	18.641	20.695	0.901	2.309960	2.952200	347.476	12413.337
144	1.469950	25.133	18.567	20.695	0.897	2.274866	2.915239	344.746	12423.884
145	1.479451	25.307	18.370	20.695	0.888	2.186152	2.821486	337.455	12434.462
146	1.489039	25.482	18.203	20.695	0.880	2.116914	2.747971	331.359	12445.020
147	1.498536	25.656	18.378	20.695	0.888	2.189485	2.825017	337.740	12455.330
148	1.508067	25.831	18.312	20.695	0.885	2.161587	2.795439	335.334	12465.494
149	1.517608	26.005	18.293	20.695	0.884	2.153565	2.786925	334.632	12475.447
150	1.527275	26.180	18.055	20.695	0.872	2.058927	2.686153	325.965	12485.265
151	1.536943	26.354	18.053	20.695	0.872	2.058220	2.685397	325.898	12494.771
152	1.546677	26.529	17.930	20.695	0.866	2.012937	2.636951	321.493	12503.979
153	1.556331	26.704	18.079	20.695	0.874	2.068177	2.696030	326.844	12512.703
154	1.566049	26.878	17.960	20.695	0.868	2.023672	2.648450	322.553	12521.022
155	1.575975	27.053	17.583	20.695	0.850	1.894758	2.509752	309.176	12528.982
156	1.585879	27.227	17.622	20.695	0.852	1.907390	2.523404	310.551	12536.324
157	1.595749	27.402	17.683	20.695	0.854	1.927346	2.544942	312.695	12542.979
158	1.605562	27.576	17.786	20.695	0.859	1.962044	2.582314	316.338	12548.876
159	1.615590	27.751	17.405	20.695	0.841	1.838871	2.449181	302.919	12554.089
160	1.625642	27.925	17.363	20.695	0.839	1.826321	2.435540	301.474	12558.415
161	1.635733	28.100	17.296	20.695	0.836	1.806381	2.413836	299.148	12561.772
162	1.645734	28.274	17.452	20.695	0.843	1.853254	2.464797	304.557	12564.041
163	1.655940	28.449	17.101	20.695	0.826	1.750630	2.352941	292.445	12565.183
164	1.666183	28.623	17.039	20.695	0.823	1.733588	2.334264	290.336	12565.043
165	1.676334	28.798	17.194	20.695	0.831	1.776749	2.381509	295.622	12563.536
166	1.686381	28.972	17.372	20.695	0.839	1.828918	2.438364	301.774	12560.604
167	1.696734	29.147	16.858	20.695	0.815	1.685253	2.281119	284.199	12555.978
168	1.707266	29.322	16.572	20.695	0.801	1.613233	2.201441	274.621	12549.484
169	1.717696	29.496	16.734	20.695	0.809	1.653330	2.245877	280.018	12541.155
170	1.728090	29.671	16.792	20.695	0.811	1.668070	2.262164	281.961	12530.850
171	1.738660	29.845	16.512	20.695	0.798	1.598888	2.185496	272.650	12518.186
172	1.749240	30.020	16.496	20.695	0.797	1.595164	2.181352	272.134	12503.166
173	1.759691	30.194	16.700	20.695	0.807	1.644878	2.236526	278.894	12485.884
174	1.770240	30.369	16.545	20.695	0.799	1.606777	2.194268	273.736	12465.830
175	1.780989	30.543	16.237	20.695	0.785	1.535221	2.114411	263.644	12442.539
176	1.791717	30.718	16.269	20.695	0.786	1.542377	2.122427	264.678	12416.254
177	1.802420	30.892	16.307	20.695	0.788	1.551000	2.132077	265.916	12386.834
178	1.813115	31.067	16.319	20.695	0.789	1.553783	2.135190	266.313	12354.071
179	1.823842	31.241	16.270	20.695	0.786	1.542720	2.122811	264.727	12317.650
180	1.834779	31.416	15.958	20.695	0.771	1.474493	2.046097	254.659	12276.651
181	1.845535	31.590	16.227	20.695	0.784	1.532854	2.111757	263.301	12232.326
182	1.856360	31.765	16.123	20.695	0.779	1.509971	2.086069	259.955	12183.506
183	1.867399	31.940	15.811	20.695	0.764	1.443840	2.011413	249.974	12129.150
184	1.878363	32.114	15.919	20.695	0.769	1.466232	2.036763	253.406	12070.371
185	1.889252	32.289	16.028	20.695	0.775	1.489455	2.062976	256.909	12007.039
186	1.900222	32.463	15.910	20.695	0.769	1.464410	2.034704	253.129	11938.005
187	1.911200	32.638	15.898	20.695	0.768	1.461990	2.031967	252.760	11863.420
188	1.922284	32.812	15.746	20.695	0.761	1.430784	1.996597	247.949	11782.278
189	1.933395	32.987	15.708	20.695	0.759	1.423082	1.987844	246.745	11694.784
190	1.945128	33.161	14.875	20.695	0.719	1.268659	1.810280	221.277	11595.400
191	2.020729	33.336	2.309	20.695	0.112	0.118281	0.224040	5.330	10759.646
192	2.066029	33.510	3.853	20.695	0.186	0.206006	0.376737	14.844	10068.798
193	2.167001	33.685	1.729	20.695	0.084	0.087219	0.167438	2.988	7873.641

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

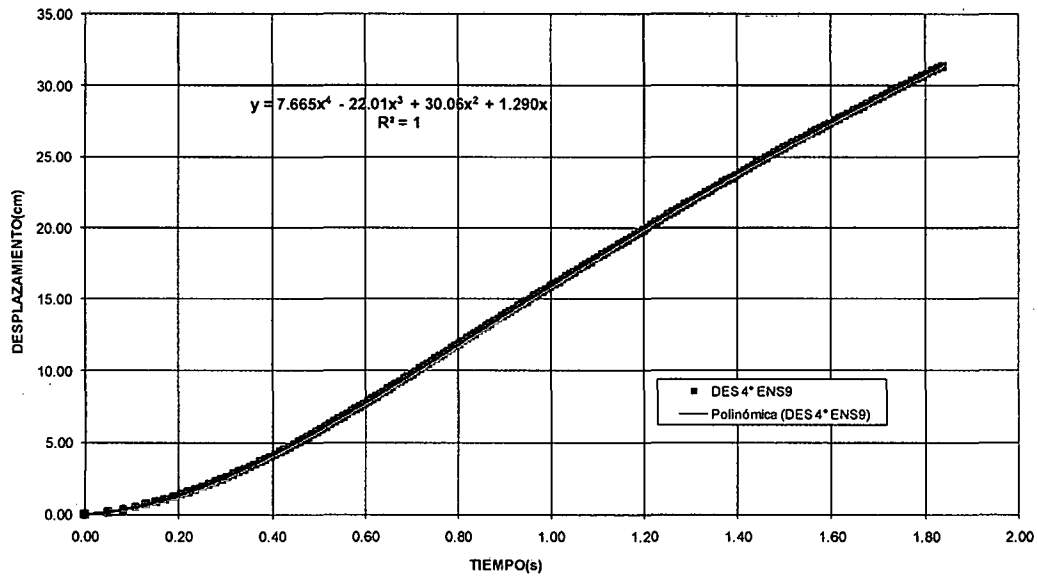
### Aceite SAE 40: EXP 3

VELOCIDAD Vs TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

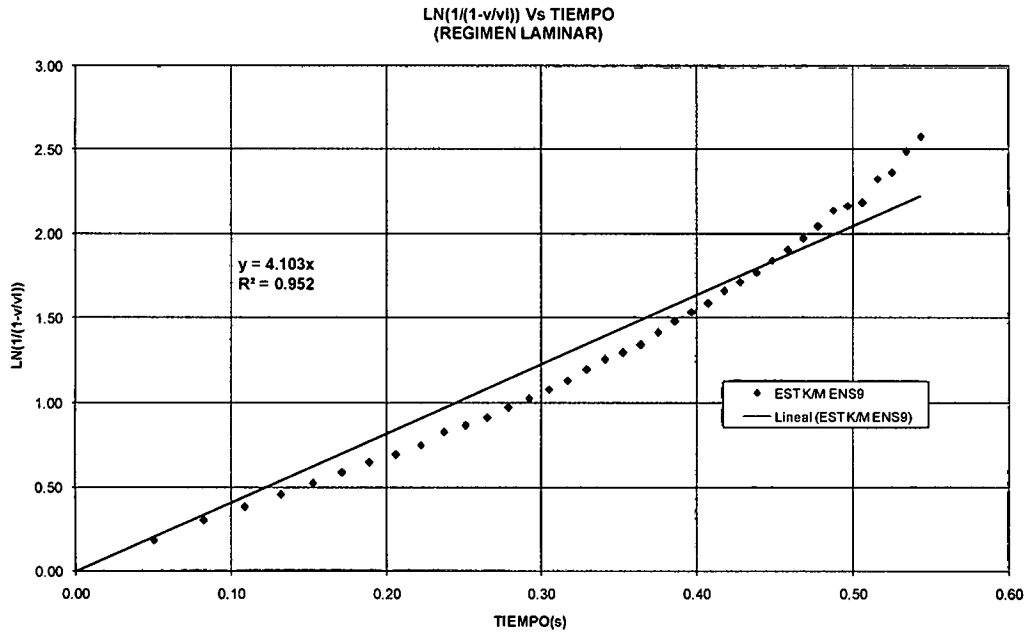
DESPLAZAMIENTO Vs TIEMPO



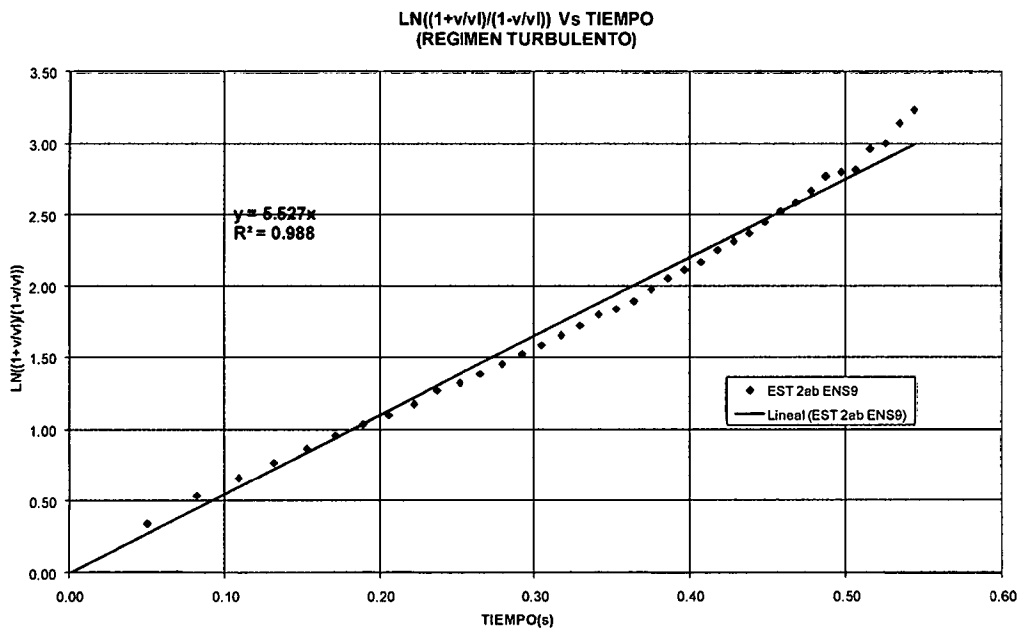
Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Aceite SAE 40: EXP 3



Fuente: Elaboración Propia



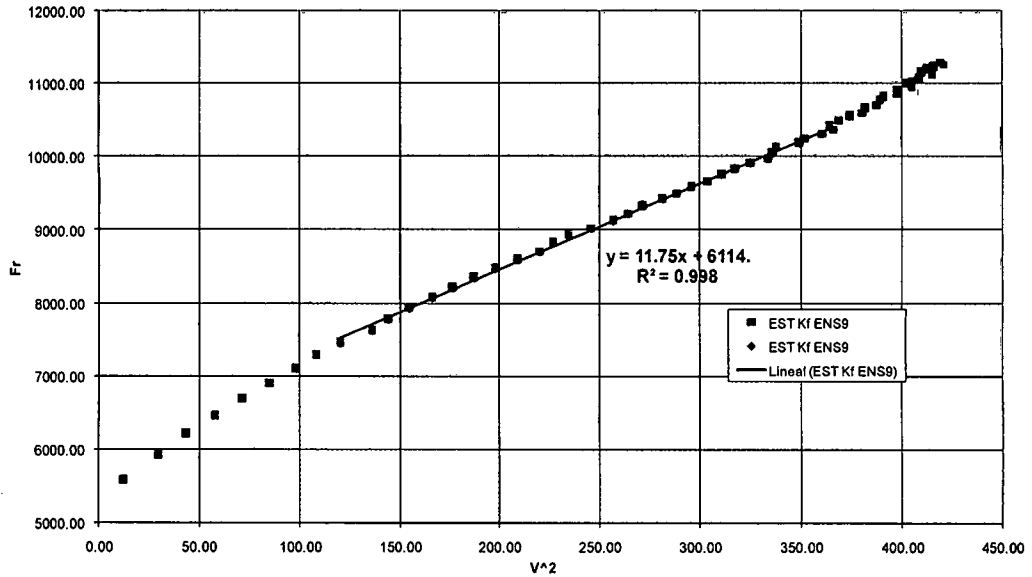
Fuente: Elaboración Propia



## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

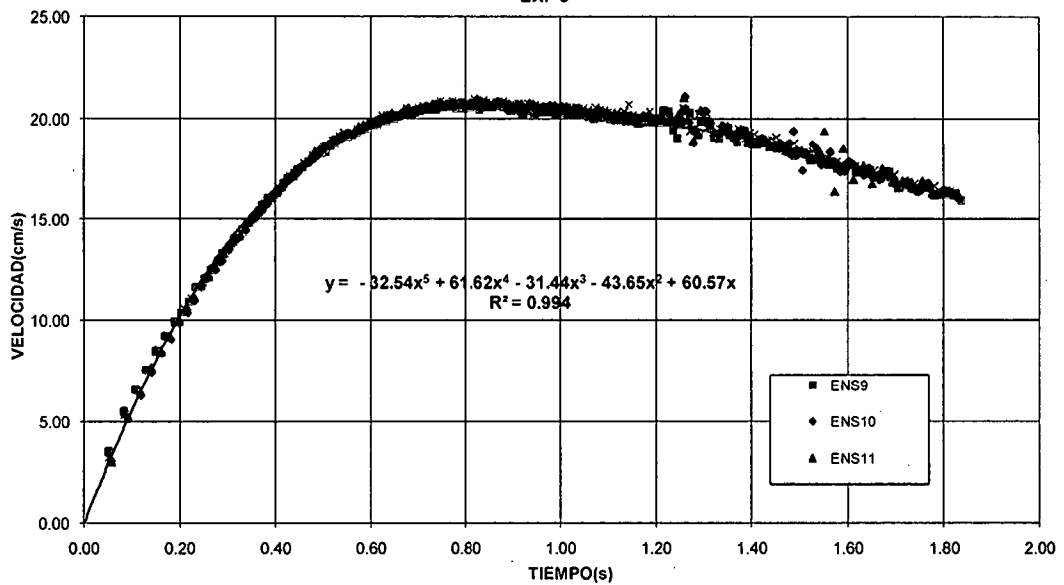
### Aceite SAE 40: EXP 3

FUERZA DE ROZAMIENTO Vs VELOCIDAD<sup>2</sup>



Fuente: Elaboración Propia

VELOCIDAD Vs TIEMPO  
 ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD LIMITE  $V_l$   
 EXP 3

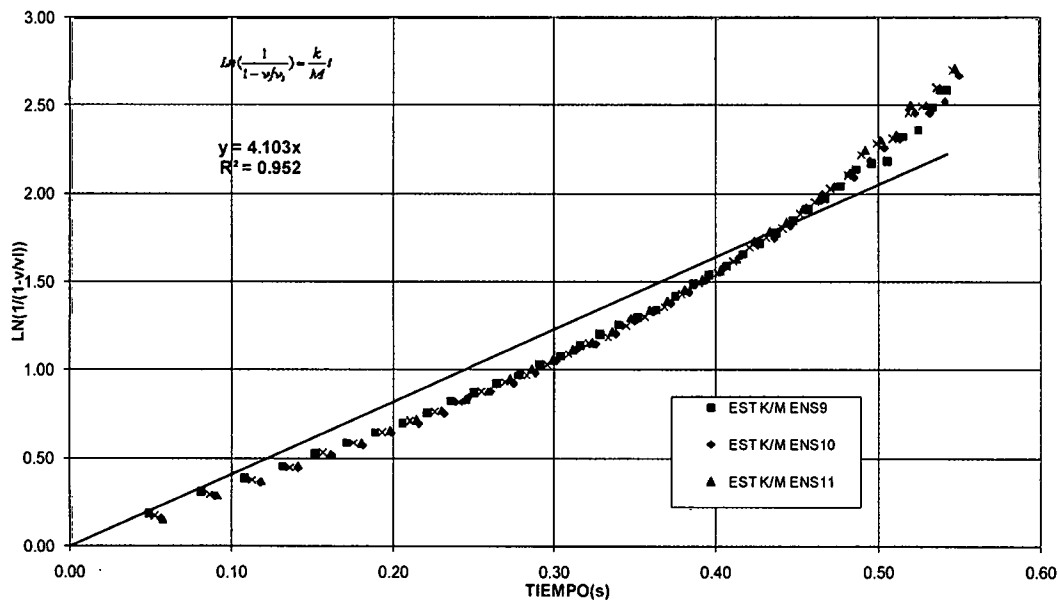


Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

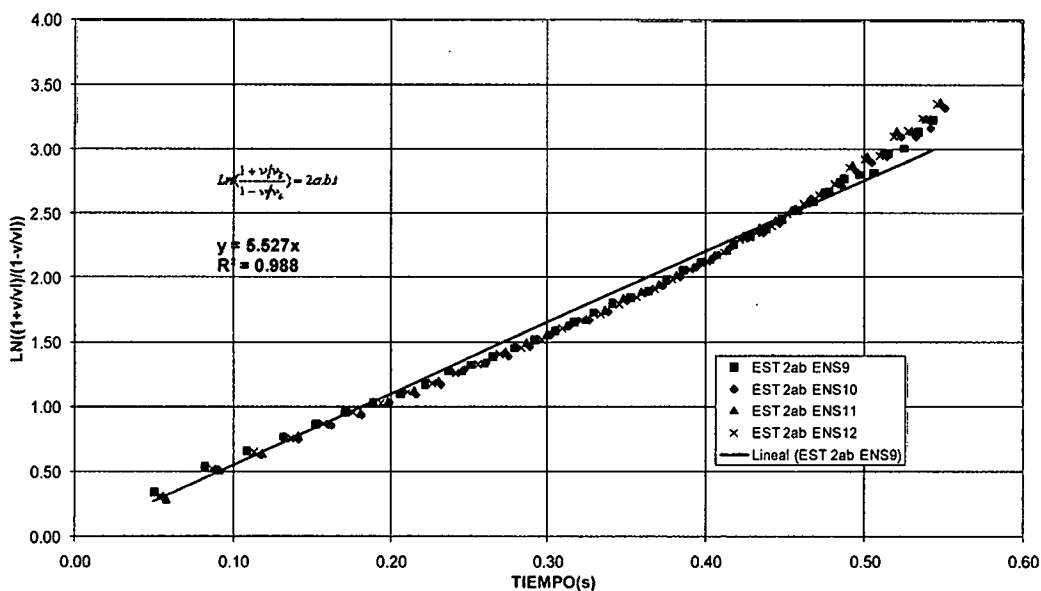
### Aceite SAE 40: EXP 3

LN(1/(1-v/v<sub>l</sub>)) Vs TIEMPO  
(REGIMEN LAMINAR "R<sub>e</sub><1")  
EXP 3



Fuente: Elaboración Propia

LN((1+v/vl)/(1-v/vl)) Vs TIEMPO  
(PARA R<sub>e</sub>>1)  
EXP 3



Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Harina – Agua (mazamorra)

MUESTRA	EXPERIMENTO	ENSAYOS
Harina - Agua	EXP1	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4
	EXP2	ENS5,ENS6,ENS7,ENS8
	EXP3	ENS9,ENS10,ENS11,ENS12
	EXP4	ENS13,ENS14,ENS15,ENS16
	EXP5	ENS17,ENS18,ENS19,ENS20

**Nota:**

Solo se presenta el experimento EXP 3: ENS 9.

Se adjunta en archivo digital la data, procesamiento y resultados de cada experimento realizado

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Harina – Agua: EXP 3

ENS 9									
	Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)	V <sub>limite</sub>	V/V <sub>limite</sub>	$\ln(1/(1-v/v_l))$	$\ln((1+v/v_l)/(1-v/v_l))$	Vel <sup>2</sup>	Fr
	0.00000	0.000		21.744					
1	0.050272	0.175	3.472	21.744	0.160	0.173956	0.322087	12.053	10176.265
2	0.081299	0.349	5.625	21.744	0.259	0.299351	0.529432	31.643	10492.922
3	0.104261	0.524	7.601	21.744	0.350	0.430114	0.729897	57.774	10732.790
4	0.124489	0.698	8.628	21.744	0.397	0.505527	0.839719	74.447	10946.684
5	0.142916	0.873	9.472	21.744	0.436	0.571984	0.933564	89.711	11142.819
6	0.160841	1.047	9.737	21.744	0.448	0.593835	0.963876	94.806	11334.140
7	0.177483	1.222	10.487	21.744	0.482	0.658392	1.051998	109.988	11511.732
8	0.193049	1.396	11.212	21.744	0.516	0.724962	1.140811	125.719	11677.421
9	0.208108	1.571	11.590	21.744	0.533	0.761464	1.188703	134.327	11837.009
10	0.222457	1.745	12.163	21.744	0.559	0.819600	1.263896	147.949	11988.167
11	0.236483	1.920	12.444	21.744	0.572	0.849273	1.301796	154.841	12134.844
12	0.250247	2.094	12.680	21.744	0.583	0.875071	1.334498	160.792	12277.547
13	0.263619	2.269	13.052	21.744	0.600	0.916948	1.387116	170.358	12414.843
14	0.276508	2.443	13.541	21.744	0.623	0.974866	1.458993	183.365	12545.780
15	0.288994	2.618	13.978	21.744	0.643	1.029620	1.526057	195.393	12671.189
16	0.301217	2.793	14.279	21.744	0.657	1.069120	1.573942	203.891	12792.479
17	0.313201	2.967	14.564	21.744	0.670	1.108015	1.620710	212.105	12909.884
18	0.324934	3.142	14.875	21.744	0.684	1.152376	1.673616	221.277	13023.293
19	0.336496	3.316	15.095	21.744	0.694	1.184930	1.712160	227.871	13133.486
20	0.347858	3.491	15.361	21.744	0.706	1.225717	1.760134	235.964	13240.195
21	0.358957	3.665	15.725	21.744	0.723	1.284434	1.828613	247.279	13342.866
22	0.369828	3.840	16.055	21.744	0.738	1.340788	1.893730	257.760	13441.874
23	0.380512	4.014	16.336	21.744	0.751	1.391443	1.951792	266.862	13537.637
24	0.391040	4.189	16.578	21.744	0.762	1.437234	2.003920	274.829	13630.466
25	0.401403	4.363	16.842	21.744	0.775	1.489680	2.063230	283.651	13720.316
26	0.411653	4.538	17.028	21.744	0.783	1.528293	2.106643	289.939	13807.671
27	0.421787	4.712	17.223	21.744	0.792	1.570496	2.153861	296.615	13892.526
28	0.431755	4.887	17.509	21.744	0.805	1.636031	2.226729	306.576	13974.503
29	0.441588	5.061	17.750	21.744	0.816	1.694473	2.291276	315.052	14053.904
30	0.451314	5.236	17.945	21.744	0.825	1.744596	2.346332	322.022	14130.990
31	0.460932	5.411	18.146	21.744	0.835	1.799095	2.405896	329.295	14205.786
32	0.470413	5.585	18.409	21.744	0.847	1.874777	2.488128	338.880	14278.109
33	0.479811	5.760	18.571	21.744	0.854	1.924750	2.542143	344.893	14348.409
34	0.489162	5.934	18.665	21.744	0.858	1.954612	2.574317	348.368	14416.974
35	0.498362	6.109	18.971	21.744	0.872	2.059397	2.686655	359.898	14483.079
36	0.507541	6.283	19.014	21.744	0.874	2.075173	2.703496	361.546	14547.691
37	0.516625	6.458	19.213	21.744	0.884	2.150812	2.784002	369.148	14610.309
38	0.525616	6.632	19.412	21.744	0.893	2.232594	2.870625	376.824	14670.985
39	0.534611	6.807	19.403	21.744	0.892	2.228899	2.866720	376.489	14730.393
40	0.543531	6.981	19.566	21.744	0.900	2.301147	2.942925	382.847	14788.025
41	0.552360	7.156	19.768	21.744	0.909	2.398335	3.044983	390.779	14843.814
42	0.561109	7.330	19.949	21.744	0.917	2.494277	3.145270	397.959	14897.868
43	0.569837	7.505	19.997	21.744	0.920	2.521379	3.173523	399.876	14950.575
44	0.578506	7.679	20.133	21.744	0.926	2.602479	3.257878	405.337	15001.727
45	0.587142	7.854	20.210	21.744	0.929	2.651411	3.308645	408.441	15051.499
46	0.595777	8.029	20.212	21.744	0.930	2.652938	3.310228	408.536	15100.090
47	0.604320	8.203	20.430	21.744	0.940	2.806212	3.468676	417.382	15147.010
48	0.612864	8.378	20.428	21.744	0.939	2.804394	3.466801	417.285	15192.798
49	0.621327	8.552	20.623	21.744	0.948	2.965167	3.632200	425.310	15237.036
50	0.629798	8.727	20.604	21.744	0.948	2.947941	3.614515	424.508	15280.212
51	0.638243	8.901	20.667	21.744	0.950	3.005171	3.673241	427.125	15322.165
52	0.646627	9.076	20.817	21.744	0.957	3.155551	3.827160	433.363	15362.746
53	0.654947	9.250	20.978	21.744	0.965	3.345278	4.020643	440.056	15401.976
54	0.663315	9.425	20.857	21.744	0.959	3.199457	3.872001	435.022	15440.394
55	0.671629	9.599	20.993	21.744	0.965	3.365227	4.040946	440.692	15477.546
56	0.679914	9.774	21.066	21.744	0.969	3.468144	4.145581	443.782	15513.568
57	0.688178	9.948	21.120	21.744	0.971	3.550409	4.229095	446.040	15548.515
58	0.696438	10.123	21.130	21.744	0.972	3.566926	4.245851	446.472	15582.478
59	0.704621	10.297	21.329	21.744	0.981	3.958143	4.641695	454.914	15615.181
60	0.712848	10.472	21.215	21.744	0.976	3.715443	4.396343	450.061	15647.127
61	0.720981	10.647	21.460	21.744	0.987	4.337576	5.024167	460.525	15677.801
62	0.729148	10.821	21.371	21.744	0.983	4.064192	4.748714	456.699	15707.709
63	0.737280	10.996	21.462	21.744	0.987	4.346906	5.033559	460.638	15736.613
64	0.745364	11.170	21.590	21.744	0.993	4.949631	5.639229	466.125	15764.494
65	0.753476	11.345	21.515	21.744	0.989	4.555120	5.242996	462.912	15791.630
66	0.761562	11.519	21.585	21.744	0.993	4.915560	5.605034	465.894	15817.856
67	0.769660	11.694	21.553	21.744	0.991	4.732709	5.421445	464.514	15843.312

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Harina – Agua: EXP 3

ENS 9

	Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)	V <sub>limite</sub>	V/V <sub>limite</sub>	$\ln(1/(1-v/v_l))$	$\ln((1+v/v_l)/(1-v/v_l))$	Vel <sup>2</sup>	Fr
68	0.777697	11.868	21.716	21.744	0.999	6.661278	7.353785	471.592	15867.790
69	0.785737	12.043	21.708	21.744	0.998	6.405667	7.097988	471.241	15891.509
70	0.793689	12.217	21.948	21.744	1.009			481.728	15914.228
71	0.801731	12.392	21.703	21.744	0.998	6.265664	6.957861	471.006	15936.470
72	0.809663	12.566	22.004	21.744	1.012			484.160	15957.701
73	0.817625	12.741	21.921	21.744	1.008			480.519	15978.321
74	0.825574	12.915	21.957	21.744	1.010			482.092	15998.233
75	0.833466	13.090	22.115	21.744	1.017			489.081	16017.350
76	0.841359	13.265	22.112	21.744	1.017			488.957	16035.837
77	0.849246	13.439	22.129	21.744	1.018			489.701	16053.693
78	0.857144	13.614	22.098	21.744	1.016			488.338	16070.972
79	0.865069	13.788	22.023	21.744	1.013			485.016	16087.721
80	0.872945	13.963	22.160	21.744	1.019			491.070	16103.799
81	0.880833	14.137	22.126	21.744	1.018			489.577	16119.349
82	0.888746	14.312	22.056	21.744	1.014			486.488	16134.411
83	0.896568	14.486	22.313	21.744	1.026			497.874	16148.787
84	0.904395	14.661	22.299	21.744	1.026			497.238	16162.677
85	0.912265	14.835	22.177	21.744	1.020			491.819	16176.161
86	0.920104	15.010	22.265	21.744	1.024			495.717	16189.127
87	0.927927	15.184	22.310	21.744	1.026			497.746	16201.621
88	0.935748	15.359	22.316	21.744	1.026			498.001	16213.683
89	0.943575	15.533	22.299	21.744	1.026			497.238	16225.342
90	0.951468	15.708	22.112	21.744	1.017			488.957	16236.696
91	0.959309	15.882	22.259	21.744	1.024			495.464	16247.592
92	0.967116	16.057	22.356	21.744	1.028			499.789	16258.077
93	0.974920	16.232	22.365	21.744	1.029			500.173	16268.212
94	0.982782	16.406	22.200	21.744	1.021			492.820	16278.088
95	0.990653	16.581	22.174	21.744	1.020			491.694	16287.655
96	0.998543	16.755	22.121	21.744	1.017			489.329	16296.940
97	1.006401	16.930	22.211	21.744	1.021			493.322	16305.900
98	1.014230	17.104	22.293	21.744	1.025			496.984	16314.557
99	1.022122	17.279	22.115	21.744	1.017			489.081	16323.027
100	1.029975	17.453	22.225	21.744	1.022			493.951	16331.214
101	1.037859	17.628	22.138	21.744	1.018			490.074	16339.208
102	1.045725	17.802	22.188	21.744	1.020			492.319	16346.972
103	1.053615	17.977	22.121	21.744	1.017			489.329	16354.565
104	1.061509	18.151	22.110	21.744	1.017			488.833	16361.979
105	1.069412	18.326	22.084	21.744	1.016			487.720	16369.235
106	1.077318	18.500	22.076	21.744	1.015			487.350	16376.340
107	1.085205	18.675	22.129	21.744	1.018			489.701	16383.290
108	1.093073	18.850	22.183	21.744	1.020			492.069	16390.099
109	1.100981	19.024	22.070	21.744	1.015			487.104	16396.831
110	1.108900	19.199	22.040	21.744	1.014			485.751	16403.475
111	1.116779	19.373	22.152	21.744	1.019			490.696	16410.001
112	1.124657	19.548	22.154	21.744	1.019			490.821	16416.454
113	1.132525	19.722	22.183	21.744	1.020			492.069	16422.839
114	1.140411	19.897	22.132	21.744	1.018			489.825	16429.192
115	1.148316	20.071	22.079	21.744	1.015			487.473	16435.524
116	1.156261	20.246	21.968	21.744	1.010			482.577	16441.863
117	1.164209	20.420	21.959	21.744	1.010			482.213	16448.190
118	1.172069	20.595	22.205	21.744	1.021			493.071	16454.443
119	1.179969	20.769	22.093	21.744	1.016			488.091	16460.736
120	1.187974	20.944	21.803	21.744	1.003			475.370	16467.128
121	1.196026	21.118	21.676	21.744	0.997	5.763527	6.455103	469.837	16473.584
122	1.204002	21.293	21.882	21.744	1.006			478.833	16480.015
123	1.211945	21.468	21.973	21.744	1.011			482.820	16486.462
124	1.219872	21.642	22.018	21.744	1.013			484.771	16492.947
125	1.227887	21.817	21.776	21.744	1.001			474.185	16499.563
126	1.236071	21.991	21.326	21.744	0.981	3.951887	4.635378	454.803	16506.387
127	1.244228	22.166	21.397	21.744	0.984	4.136919	4.822049	457.819	16513.264
128	1.252265	22.340	21.716	21.744	0.999	6.661278	7.353785	471.592	16520.120
129	1.260229	22.515	21.915	21.744	1.008			480.277	16526.997
130	1.268271	22.689	21.703	21.744	0.998	6.265664	6.957861	471.006	16534.030
131	1.276421	22.864	21.415	21.744	0.985	4.191287	4.876842	458.606	16541.252
132	1.284395	23.038	21.888	21.744	1.007			479.074	16548.414
133	1.292639	23.213	21.171	21.744	0.974	3.636038	4.315920	448.207	16555.922
134	1.301127	23.387	20.562	21.744	0.946	2.912396	3.577995	422.809	16563.763
135	1.309556	23.562	20.706	21.744	0.952	3.042277	3.711271	428.749	16571.663

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Harina – Agua: EXP 3

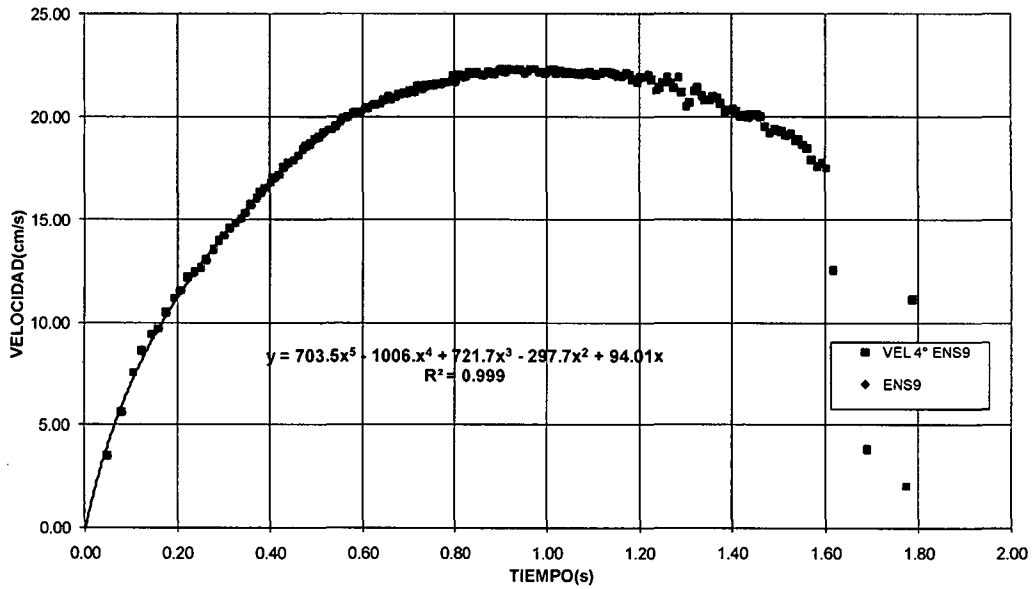
ENS 9									
Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)	$V_{\text{límite}}$	$V/V_{\text{límite}}$	$\ln(1/(1-v/v_i))$	$\ln((1+v/v_i)/(1-v/v_i))$	$Vel^2$	Fr	
136	1.317777	23.736	21.230	21.744	0.976	3.745129	4.426390	450.719	16579.477
137	1.325899	23.911	21.489	21.744	0.988	4.445476	5.132740	461.773	16587.302
138	1.334197	24.086	21.033	21.744	0.967	3.420606	4.097271	442.393	16595.405
139	1.342578	24.260	20.825	21.744	0.958	3.163625	3.835410	433.674	16603.698
140	1.350967	24.435	20.805	21.744	0.957	3.142250	3.813568	432.847	16612.104
141	1.359294	24.609	20.960	21.744	0.964	3.322532	3.997484	439.317	16620.550
142	1.367642	24.784	20.907	21.744	0.962	3.257454	3.931170	437.109	16629.114
143	1.376101	24.958	20.633	21.744	0.949	2.973905	3.641168	425.713	16637.885
144	1.384719	25.133	20.252	21.744	0.931	2.679313	3.337553	410.149	16646.910
145	1.393317	25.307	20.299	21.744	0.934	2.711399	3.370760	412.059	16655.996
146	1.401890	25.482	20.358	21.744	0.936	2.753235	3.414003	414.466	16665.127
147	1.410503	25.656	20.264	21.744	0.932	2.687225	3.345744	410.625	16674.361
148	1.419214	25.831	20.036	21.744	0.921	2.543970	3.197048	401.438	16683.752
149	1.427893	26.005	20.110	21.744	0.925	2.588182	3.243027	404.404	16693.145
150	1.436614	26.180	20.013	21.744	0.920	2.530609	3.183137	400.518	16702.607
151	1.445301	26.354	20.091	21.744	0.924	2.576914	3.231316	403.659	16712.038
152	1.453979	26.529	20.112	21.744	0.925	2.589601	3.244501	404.497	16721.448
153	1.462712	26.704	19.985	21.744	0.919	2.514848	3.166717	399.418	16730.889
154	1.471624	26.878	19.584	21.744	0.901	2.309246	2.951449	383.534	16740.472
155	1.480708	27.053	19.213	21.744	0.884	2.150812	2.784002	369.148	16750.163
156	1.489714	27.227	19.380	21.744	0.891	2.218825	2.856070	375.570	16759.668
157	1.498738	27.402	19.341	21.744	0.889	2.202608	2.838913	374.073	16769.063
158	1.507793	27.576	19.275	21.744	0.886	2.175426	2.810118	371.516	16778.330
159	1.516914	27.751	19.135	21.744	0.880	2.120480	2.751765	366.159	16787.473
160	1.526029	27.925	19.148	21.744	0.881	2.125320	2.756913	366.641	16796.382
161	1.535297	28.100	18.832	21.744	0.866	2.010422	2.634255	354.636	16805.173
162	1.544532	28.274	18.899	21.744	0.869	2.033800	2.659290	357.175	16813.625
163	1.553867	28.449	18.697	21.744	0.860	1.965055	2.585552	349.564	16821.815
164	1.563331	28.623	18.442	21.744	0.848	1.884740	2.498915	340.099	16829.711
165	1.573078	28.798	17.906	21.744	0.824	1.734470	2.335232	320.636	16837.362
166	1.583002	28.972	17.587	21.744	0.809	1.654533	2.247207	309.301	16844.596
167	1.592847	29.147	17.728	21.744	0.815	1.689071	2.285327	314.285	16851.158
168	1.602791	29.322	17.552	21.744	0.807	1.646060	2.237834	308.058	16857.101
169	1.616702	29.496	12.546	21.744	0.577	0.860395	1.315922	157.412	16864.132
170	1.643322	29.671	6.556	21.744	0.302	0.358862	0.622403	42.987	16872.751
171	1.688962	29.845	3.824	21.744	0.176	0.193427	0.355436	14.624	16868.924
172	1.772519	30.020	2.089	21.744	0.096	0.100995	0.192720	4.363	16774.428
173	1.788173	30.194	11.149	21.744	0.513	0.718995	1.132929	124.309	16740.020

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

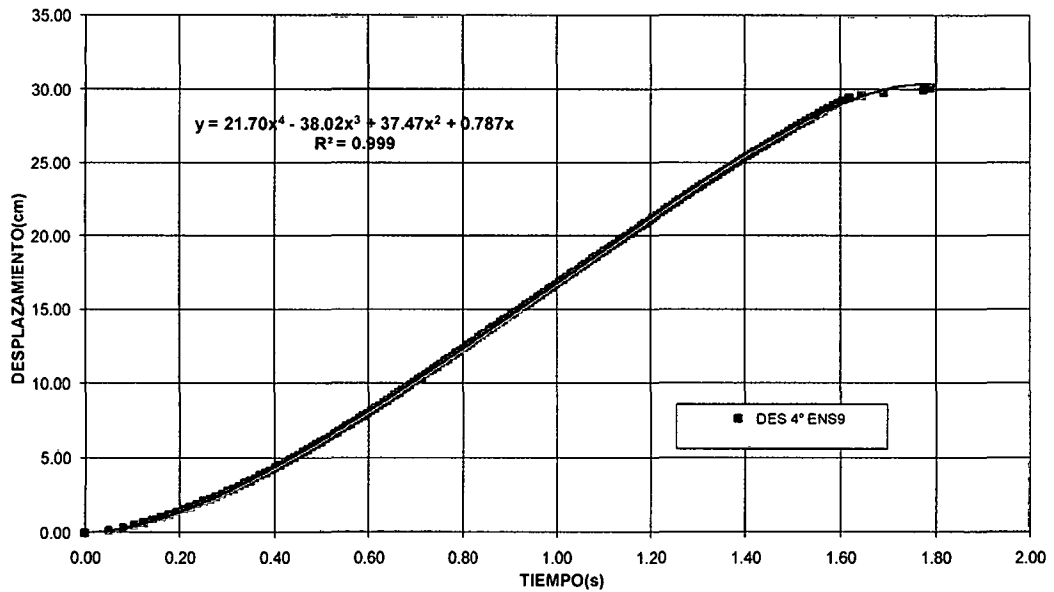
### Harina – Agua: EXP 3

VELOCIDAD Vs TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

DESPLAZAMIENTO Vs TIEMPO

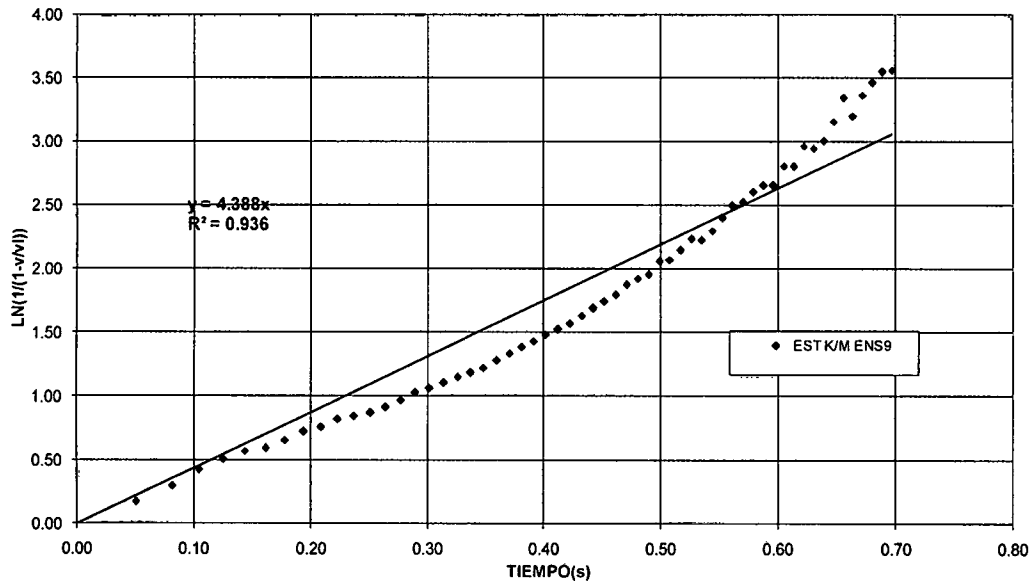


Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

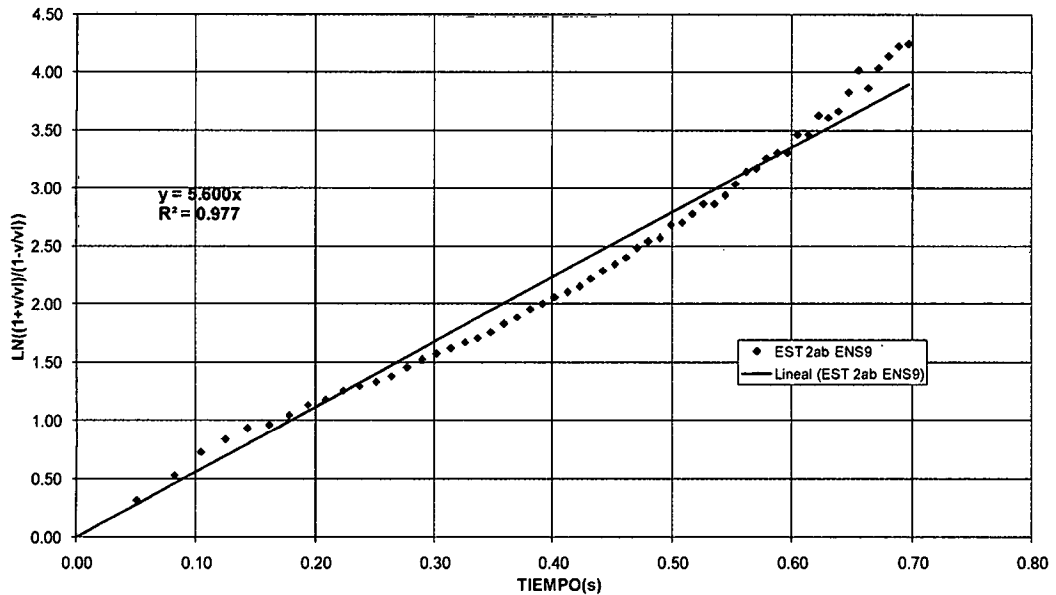
### Harina – Agua: EXP 3

LN(1/(1-v/v<sub>l</sub>)) Vs TIEMPO  
(REGIMEN LAMINAR)



Fuente: Elaboración Propia

LN((1+v/v<sub>l</sub>)/(1-v/v<sub>l</sub>)) Vs TIEMPO  
(REGIMEN TURBULENTO)

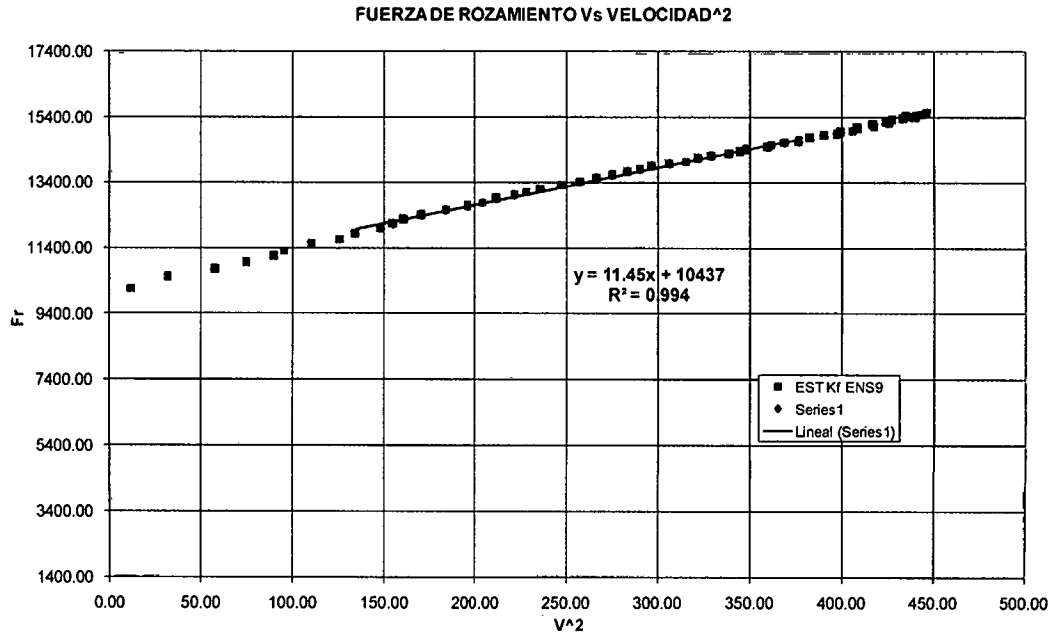


Fuente: Elaboración Propia

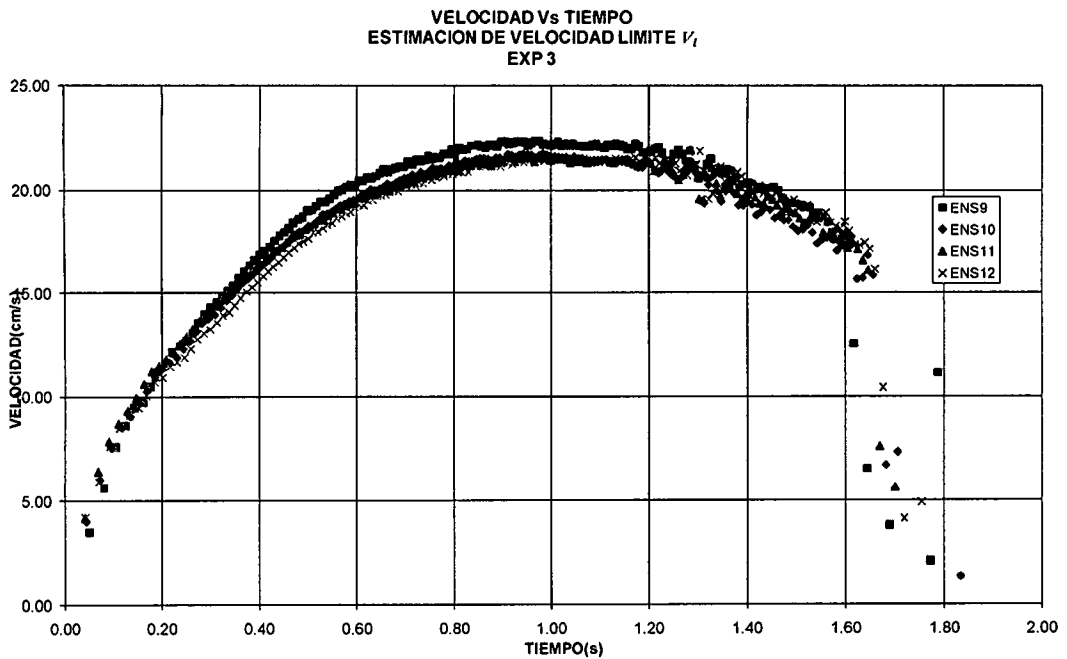


## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

### Harina – Agua: EXP 3



Fuente: Elaboración Propia

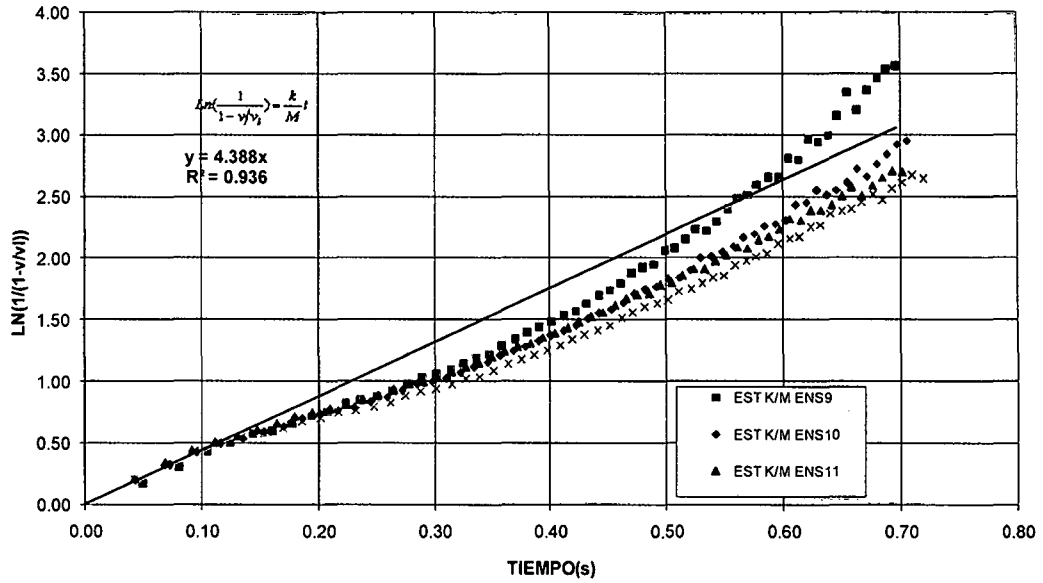


Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE ESFERA

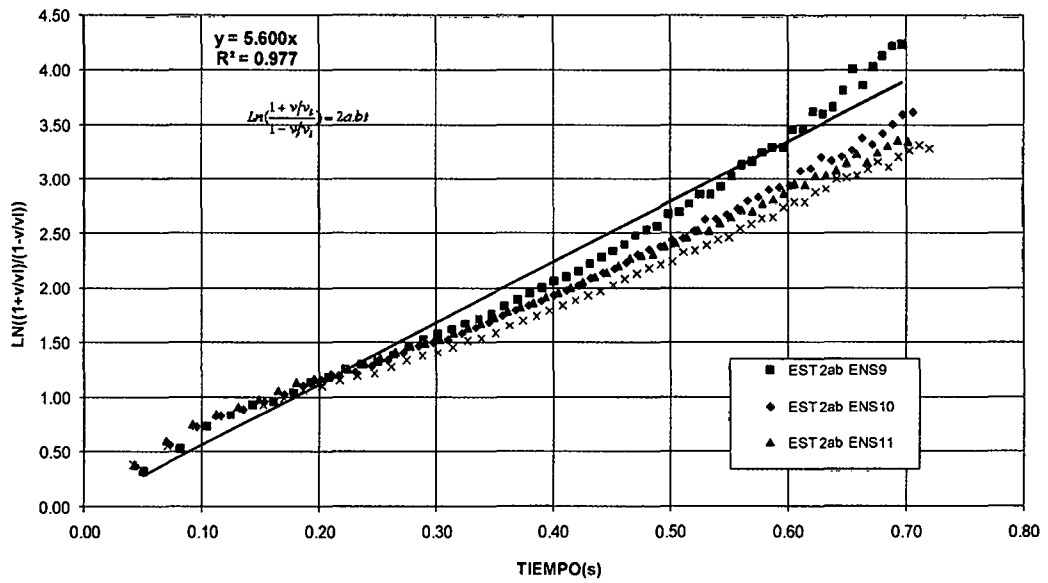
### Harina – Agua: EXP 3

LN(1/(1-v/vl)) Vs TIEMPO  
 (REGIMEN LAMINAR "R<sub>c</sub><1")  
 EXP 3



Fuente: Elaboración Propia

LN((1+v/vl)/(1-v/vl)) Vs TIEMPO  
 (PARA R<sub>c</sub>>1)  
 EXP 3



Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE VARILLA

### Relave Minero

MUESTRA	EXPERIMENTO	ENSAYOS
Relave Minero	EXP1	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4, ENS5, ENS6, ENS7, ENS8, ENS9
	EXP2	ENS1,ENS2,ENS3
	EXP3	ENS1,ENS2,ENS3
	EXP4	ENS1,ENS2,ENS3
	EXP5	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4, ENS5, ENS6, ENS7, ENS8
	EXP6	ENS1,ENS2,ENS3, ENS4
	EXP7	ENS1,ENS2,ENS3, ENS4
	EXP8	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4, ENS5, ENS6
	EXP9	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4, ENS5, ENS6, ENS7
	EXP10	ENS1,ENS2,ENS3,ENS4, ENS5, ENS6

**Nota:**

Solo se presenta el experimento EXP 5: ENS5, ENS6, ENS7, ENS8.

Se adjunta en archivo digital la data, procesamiento y resultados de cada experimento realizado

## REÓMETRO CAÍDA DE VARILLA

### RELAVE MINERO: EXP 5

Fecha: 26/10/07

En el experimento se ha efectuado 8 ensayos  
La designación del experimento esta dada por las iniciales EXP  
La designación de los ensayos esta dada por las iniciales ENS

Asi se tiene para EXP5:  
Los siguientes Ensayos:

ENS	m1	m2								mD	
ENS1	VA1.1	SV1.1	BR1.1	MO1.1	MO1.2	MO1.3	MO1.4	MO1.5		D1	D2
ENS2	VA1.1	SV1.1	BR1.1	MO1.1	MO1.2	MO1.3	MO1.4	MO1.5		D1	D2
ENS3	VA1.1	SV1.1	BR1.1	MO1.1	MO1.2	MO1.3	MO1.4	MO1.5		D1	D2
ENS4	VA1.1	SV1.1	BR1.1	PL1.1	PL1.2	PL1.3				D1	D2
ENS5	VA1.1	SV1.1	BR1.1	PL1.1	PL1.2	PL1.3				D1	D2
ENS6	VA1.1	SV1.1	BR1.1	PL1.1	PL1.2	PL1.3				D1	D2
ENS7	VA1.1	SV1.1	BR1.1	PL1.1	PL1.2	PL1.3				D1	D2
ENS8	VA1.1	SV1.1	BR1.1	PL1.1	PL1.2	PL1.3				D1	D2

Entonces, tenemos:

ENS	m1(gr)	m2(gr)								mD(gr)			Alt.Leida(h)(cm)		Temp. (°C)	HI	
ENS1	336.00	2.07	195.70	3.43	3.39	3.37	3.37	3.35		214.68	45.54	25.79	71.33	22.40	15.10	21.60	22.40
ENS2	336.00	2.07	195.70	3.43	3.39	3.37	3.37	3.35		214.68	45.54	25.79	71.33	20.30	17.40	21.60	20.30
ENS3	336.00	2.07	195.70	3.43	3.39	3.37	3.37	3.35		214.68	45.54	25.79	71.33	16.00	14.90	21.60	16.00
ENS4	336.00	2.07	195.70	9.77	9.76	9.53				226.83	45.54	25.79	71.33	12.60	7.40	21.60	12.60
ENS5	336.00	2.07	195.70	9.77	9.76	9.53				226.83	45.54	25.79	71.33	23.40	8.80	21.60	23.40
ENS6	336.00	2.07	195.70	9.77	9.76	9.53				226.83	45.54	25.79	71.33	24.00	9.30	21.60	24.00
ENS7	336.00	2.07	195.70	9.77	9.76	9.53				226.83	45.54	25.79	71.33	24.30	9.10	21.60	24.30
ENS8	336.00	2.07	195.70	9.77	9.76	9.53				226.83	45.54	25.79	71.33	24.60	8.20	21.60	24.60

Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE VARILLA

### Relave Minero: EXP 5

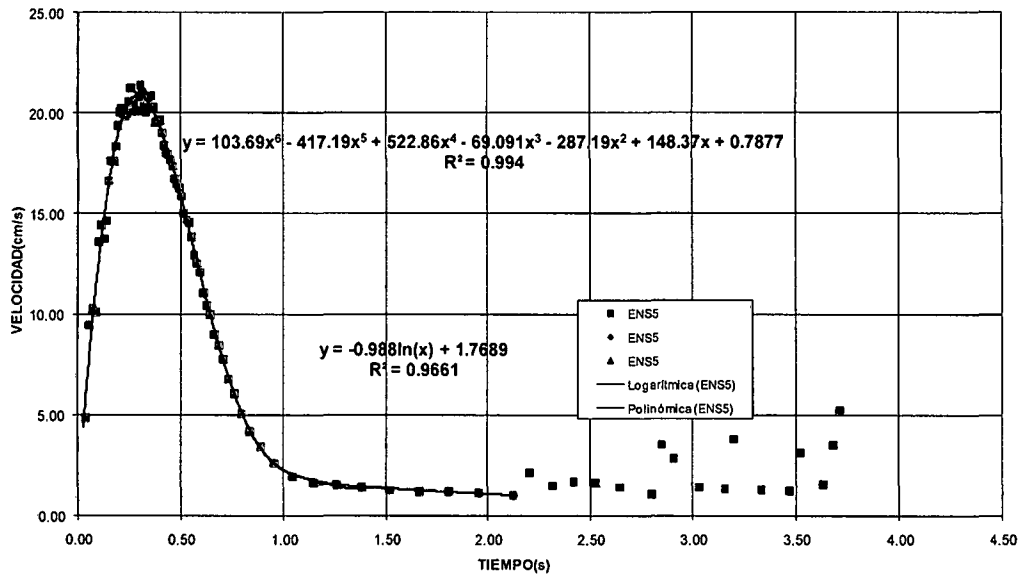
ENS 5											
Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)	dv/dt	Δdv/dt	ΔE <sub>0</sub>	ΔF <sub>0</sub>	2πRAL <sub>0</sub>	1.77	V <sub>0</sub>	V <sub>0</sub> /y	τ
			-0.99								
								-0.99			
0.000000	0.000	0.000	148.370	0.000	0.000	0.000	0.000		0.788	1.712	
1 0.035768	0.175	4.880	127.653	0.000	0.000	31564.714	0.000		5.725	12.445	
2 0.054141	0.349	9.499	116.979	-10.674	723.586	35998.814	0.866		7.972	17.331	41553.142
3 0.071094	0.524	10.295	107.187	-20.466	1447.172	40007.155	1.733		9.872	21.461	23089.969
4 0.088294	0.698	10.147	97.356	-30.297	2170.759	44034.023	2.599		11.631	25.285	16942.706
5 0.101101	0.873	13.628	90.131	-37.522	2894.345	46801.756	3.465		12.832	27.895	13505.723
6 0.113166	1.047	14.466	83.416	-44.237	3617.931	49323.085	4.332		13.878	30.170	11386.648
7 0.125843	1.222	13.768	76.470	-51.182	4341.517	51955.663	5.198		14.892	32.373	9995.334
8 0.137740	1.396	14.670	70.068	-57.585	5065.104	54325.888	6.064		15.763	34.268	8958.277
9 0.148219	1.571	16.655	64.530	-63.122	5788.690	56278.183	6.931		16.468	35.801	8120.182
10 0.158102	1.745	17.660	59.402	-68.251	6512.276	58032.850	7.797		17.081	37.132	7442.984
11 0.168909	1.920	17.617	54.358	-73.295	7235.862	59746.514	8.663		17.644	38.357	6896.492
12 0.177905	2.094	17.637	49.422	-78.230	7959.449	61407.951	9.530		18.158	39.473	6443.882
13 0.187404	2.269	18.374	44.786	-82.867	8683.035	62924.975	10.396		18.605	40.445	6052.816
14 0.196396	2.443	19.410	40.491	-87.162	9406.621	64276.656	11.262		18.988	41.279	5707.233
15 0.205098	2.618	20.057	36.425	-91.227	10130.207	65517.581	12.129		19.323	42.006	5401.887
16 0.213172	2.793	20.262	32.492	-95.161	10853.794	66694.917	12.995		19.620	42.651	5132.360
17 0.222438	2.967	20.001	28.601	-99.052	11577.380	67851.441	13.861		19.886	43.231	4895.023
18 0.231222	3.142	19.869	24.782	-102.870	12300.966	68973.079	14.728		20.120	43.740	4683.239
19 0.239942	3.316	20.015	21.091	-106.562	13024.552	70033.248	15.594		20.320	44.175	4491.045
20 0.248426	3.491	20.572	17.596	-110.057	13748.139	70998.353	16.460		20.484	44.531	4313.307
21 0.256634	3.665	21.264	14.308	-113.345	14471.725	71863.886	17.327		20.615	44.816	4147.595
22 0.264845	3.840	21.256	11.110	-116.543	15195.311	72685.459	18.193		20.720	45.043	3995.250
23 0.273336	4.014	20.555	7.902	-119.751	15918.897	73512.291	19.059		20.800	45.218	3857.029
24 0.282023	4.189	20.091	4.723	-122.929	16642.483	74324.460	19.926		20.855	45.337	3730.092
25 0.290700	4.363	20.114	1.655	-125.997	17366.070	75083.444	20.792		20.883	45.397	3611.176
26 0.299068	4.538	20.857	-1.202	-128.855	18089.656	75740.578	21.658		20.884	45.401	3497.070
27 0.307221	4.712	21.407	-3.889	-131.542	18813.242	76315.631	22.525		20.864	45.356	3388.097
28 0.315527	4.887	21.013	-6.529	-134.182	19536.828	76867.531	23.391		20.820	45.261	3286.206
29 0.324105	5.061	20.347	-9.150	-136.803	20260.415	77410.686	24.257		20.753	45.115	3191.233
30 0.332798	5.236	20.077	-11.698	-139.351	20984.001	77918.347	25.124		20.662	44.918	3101.397
31 0.341338	5.411	20.437	-14.095	-141.748	21707.587	78352.860	25.990		20.552	44.678	3014.736
32 0.349703	5.585	20.865	-16.340	-143.993	22431.173	78714.201	26.856		20.425	44.401	2930.941
33 0.358065	5.760	20.872	-18.484	-146.136	23154.760	79026.333	27.723		20.279	44.085	2850.608
34 0.366674	5.934	20.273	-20.585	-148.238	23878.346	79318.212	28.589		20.111	43.719	2774.436
35 0.375603	6.109	19.547	-22.652	-150.305	24601.932	79593.563	29.455		19.918	43.299	2702.183
36 0.384524	6.283	19.564	-24.604	-152.257	25325.518	79813.132	30.322		19.707	42.841	2632.191
37 0.393419	6.458	19.621	-26.438	-154.091	26049.105	79975.701	31.188		19.480	42.347	2564.314
38 0.402296	6.632	19.661	-28.157	-155.810	26772.691	80082.901	32.054		19.237	41.820	2498.353
39 0.411463	6.807	19.039	-29.818	-157.470	27496.277	80161.594	32.921		18.971	41.242	2434.997
40 0.420946	6.981	18.405	-31.413	-159.066	28219.863	80209.087	33.787		18.681	40.611	2373.967
41 0.430616	7.156	18.049	-32.914	-160.567	28943.449	80210.920	34.653		18.370	39.934	2314.671
42 0.440320	7.330	17.986	-34.295	-161.948	29667.036	80154.395	35.520		18.044	39.225	2256.624
43 0.450179	7.505	17.703	-35.570	-163.223	30390.622	80047.024	36.386		17.699	38.476	2199.944
44 0.460223	7.679	17.377	-36.740	-164.392	31114.208	79888.592	37.252		17.339	37.687	2144.529
45 0.470635	7.854	16.763	-37.817	-165.469	31837.794	79685.444	38.119		16.948	36.843	2090.461
46 0.481212	8.029	16.501	-38.773	-166.425	32561.381	79423.835	38.985		16.542	35.962	2037.295
47 0.491917	8.203	16.304	-39.602	-167.255	33284.967	79100.999	39.851		16.123	35.050	1984.905
48 0.502905	8.378	15.884	-40.312	-167.965	34008.553	78720.690	40.718		15.684	34.095	1933.333
49 0.514509	8.552	15.041	-40.912	-168.565	34732.139	78286.957	41.584		15.212	33.070	1882.625
50 0.526370	8.727	14.715	-41.371	-169.024	35455.726	77785.013	42.450		14.724	32.009	1832.360
51 0.538354	8.901	14.564	-41.682	-169.334	36179.312	77211.510	43.317		14.226	30.927	1782.493
52 0.550935	9.076	13.873	-41.849	-169.502	36902.898	76568.803	44.183		13.701	29.784	1732.995
53 0.564386	9.250	12.975	-41.856	-169.509	37626.484	75848.718	45.049		13.138	28.560	1683.684
54 0.578288	9.425	12.556	-41.687	-169.339	38350.071	75043.264	45.916		12.557	27.297	1634.374
55 0.592686	9.599	12.120	-41.333	-168.985	39073.657	74148.535	46.782		11.959	25.997	1584.983
56 0.606433	9.774	11.084	-40.751	-168.404	39797.243	73143.910	47.648		11.312	24.592	1535.081
57 0.620963	9.948	10.482	-39.932	-167.585	40520.829	72024.732	48.515		10.640	23.131	1484.599
58 0.642477	10.123	10.034	-38.874	-166.526	41244.416	70789.615	49.381		9.955	21.641	1433.542
59 0.661803	10.297	9.031	-37.480	-165.133	41968.002	69392.689	50.247		9.216	20.036	1381.025
60 0.682349	10.472	8.495	-35.781	-163.434	42691.588	67848.004	51.114		8.464	18.399	1327.397
61 0.704841	10.647	7.829	-33.725	-161.378	43415.174	66131.089	51.980		7.688	16.714	1272.243
62 0.730267	10.821	6.811	-31.149	-158.801	44138.760	64162.370	52.846		6.857	14.906	1214.133
63 0.758965	10.996	6.082	-28.074	-155.727	44862.347	61953.169	53.713		6.007	13.058	1153.420
64 0.793320	11.170	5.080	-24.260	-151.913	45585.933	59386.437	54.579		5.107	11.103	1088.084
65 0.834710	11.345	4.217	-19.677	-147.330	46309.519	56448.448	55.445		4.199	9.127	1018.094
66 0.885778	11.519	3.418	-14.383	-142.035	47033.105	53166.340	56.312		3.331	7.242	944.146
67 0.952187	11.694	2.628	-8.664	-136.317	47756.692	49679.457	57.178		2.575	5.598	868.858
68 1.040946	11.868	1.966	-3.892	-131.545	48480.278	46649.780	58.044		2.044	4.443	803.694
69 1.144946	12.043	1.678	-2.450	-130.103	49203.864	45229.309	58.911		1.747	3.797	767.762
70 1.257819	12.217	1.549	-2.573	-130.226	49927.450	44565.268	59.777		1.449	3.151	745.527
71 1.377789	12.392	1.452	5.661	-121.991	50651.037	39862.625	60.643		1.469	3.194	657.330
72 1.512786	12.566	1.293	-0.653	-128.306	51374.623	42190.382	61.510	1.36	1.360	2.956	665.916
73 1.658047	12.741	1.218	-0.597	-128.249	52098.209	41439.491	62.376	1.27	1.270	2.762	664.351
74 1.801337	12.915	1.201	-0.559	-128.201	52821.795	40692.650	63.242	1.19	1.187	2.581	643.441
75 1.953358	13.090	1.148	-0.51	-0.549	-128.159	53545.382	39948.435	64.109	1.11	1.107	623.137
76 2.120995	13.265										

## REÓMETRO CAÍDA DE VARILLA

Relave Minero: EXP 5

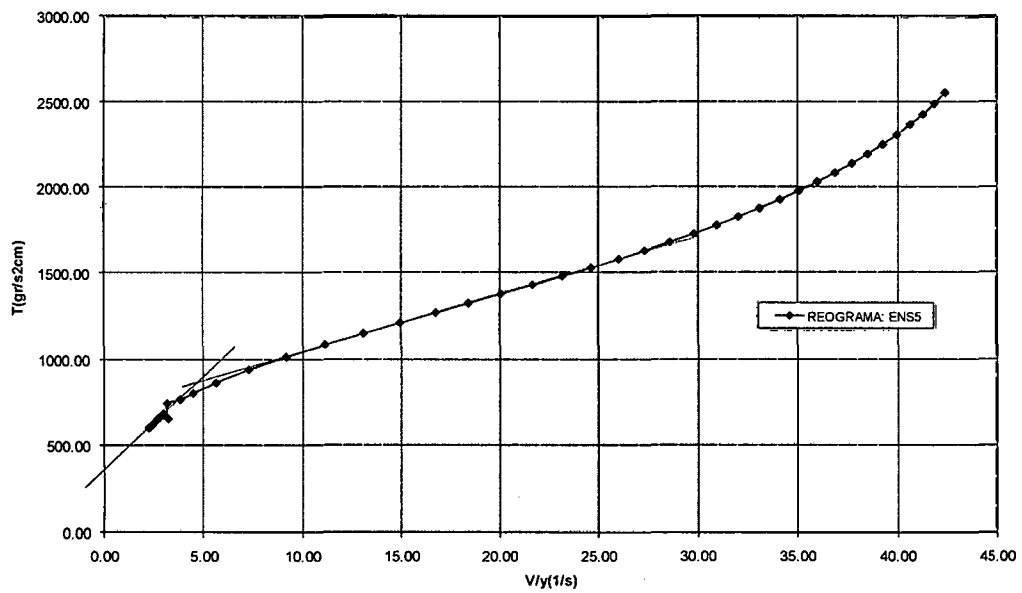
ENS 5

VELOCIDAD Vs TIEMPO  
 EXP5:Cw=74.41%



Fuente: Elaboración Propia

REOGRAMA  
 EXP5:Cw=74.41%



Fuente: Elaboración Propia

## REÓMETRO CAÍDA DE VARILLA

### Relave Minero: EXP 5

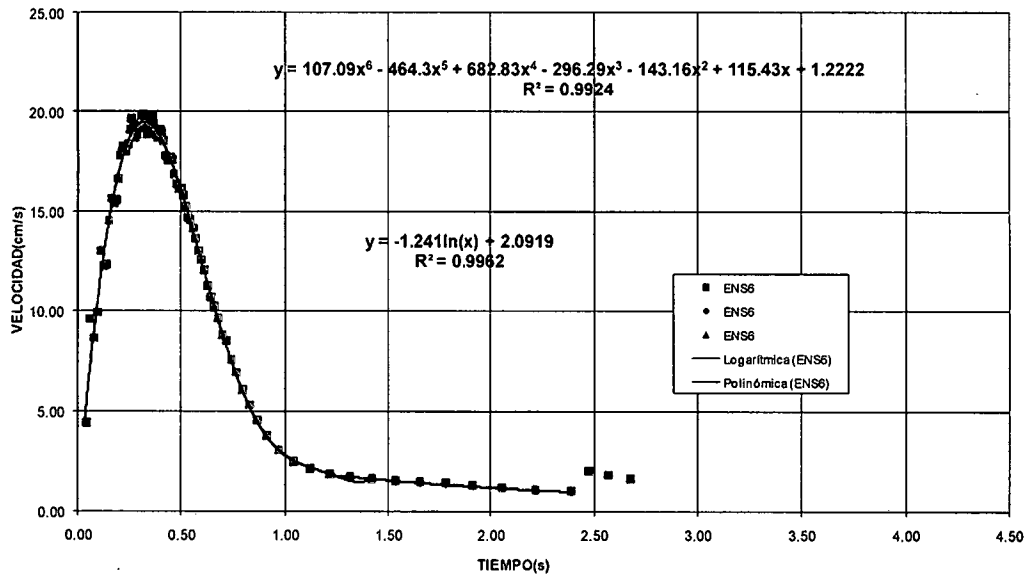
ENS 6													
Tiempo(s)	Dist.(cm)	Vel.(cm/s)	dv/dt	Δdv/dt	ΔE <sub>v</sub>	ΔF <sub>v</sub>	2πRΔL <sub>v</sub>	2.09	V <sub>v</sub>	V <sub>v</sub> /y	τ		
			-1.24										
	0.000000	0.000		127.860	0.000	0.000	0.000	0.000		0.441	0.958		
1	0.039401	0.175	4.430	110.868	0.000	0.000	40297.452	0.000		5.147	11.189		
2	0.057517	0.349	9.634	102.810	-8.058	723.586	43467.643	0.866		7.083	15.397	50174.351	
3	0.077614	0.524	8.685	93.790	-17.078	1447.172	47102.689	1.733		9.058	19.692	27185.128	
4	0.095119	0.698	9.970	85.920	-24.948	2170.759	50182.148	2.599		10.631	23.111	19308.283	
5	0.108498	0.873	13.045	79.926	-30.942	2894.345	52354.986	3.465		11.740	25.523	15108.235	
6	0.122716	1.047	12.275	73.599	-37.269	3617.931	54688.557	4.332		12.832	27.895	12625.312	
7	0.136842	1.222	12.355	67.378	-43.490	4341.517	56971.171	5.198		13.827	30.060	10960.227	
8	0.148832	1.396	14.557	62.162	-48.705	5065.104	58767.873	6.064		14.604	31.748	9690.755	
9	0.159957	1.571	15.688	57.387	-53.481	5788.690	60352.078	6.931		15.269	33.193	8707.990	
10	0.171279	1.745	15.415	52.598	-58.270	6512.276	61942.611	7.797		15.891	34.547	7944.429	
11	0.182466	1.920	15.601	47.945	-62.923	7235.862	63467.502	8.663		16.454	35.769	7326.003	
12	0.192932	2.094	16.676	43.669	-67.199	7959.449	64810.073	9.530		16.933	36.811	6800.886	
13	0.202719	2.269	17.833	39.743	-71.125	8683.035	65983.415	10.396		17.341	37.698	6347.010	
14	0.212251	2.443	18.310	35.992	-74.876	9406.621	67072.613	11.262		17.702	38.483	5955.491	
15	0.221831	2.618	18.218	32.297	-78.571	10130.207	68134.589	12.129		18.029	39.194	5617.658	
16	0.231491	2.793	18.068	28.651	-82.217	10853.794	69172.850	12.995		18.323	39.834	5323.044	
17	0.240983	2.967	18.387	25.149	-85.718	11577.380	70141.122	13.861		18.579	40.389	5060.208	
18	0.250098	3.142	19.148	21.866	-89.002	12300.966	71004.154	14.728		18.793	40.854	4821.148	
19	0.258969	3.316	19.675	18.747	-92.121	13024.552	71787.795	15.594		18.973	41.246	4603.560	
20	0.267958	3.491	19.416	15.665	-95.203	13748.139	72553.314	16.460		19.128	41.582	4407.774	
21	0.277266	3.665	18.751	12.560	-98.308	14471.725	73330.180	17.327		19.259	41.867	4232.222	
22	0.286500	3.840	18.901	9.568	-101.300	15195.311	74052.469	18.193		19.361	42.089	4070.389	
23	0.295558	4.014	19.268	6.720	-104.148	15918.897	74705.111	19.059		19.435	42.249	3919.614	
24	0.304350	4.189	19.851	4.039	-106.828	16642.483	75276.797	19.926		19.482	42.352	3777.887	
25	0.313112	4.363	19.919	1.452	-109.416	17366.070	75803.750	20.792		19.506	42.404	3645.819	
26	0.322180	4.538	19.247	-1.138	-112.006	18089.656	76331.466	21.658		19.507	42.407	3524.352	
27	0.331412	4.712	18.905	-3.680	-114.548	18813.242	76836.487	22.525		19.485	42.359	3411.221	
28	0.340524	4.887	19.154	-6.096	-116.964	19536.828	77280.264	23.391		19.440	42.262	3303.852	
29	0.349343	5.061	19.791	-8.345	-119.213	20260.415	77643.417	24.257		19.377	42.123	3200.828	
30	0.358129	5.236	19.868	-10.498	-121.366	20984.001	77960.065	25.124		19.294	41.943	3103.058	
31	0.367119	5.411	19.414	-12.610	-123.477	21707.587	78256.866	25.990		19.190	41.717	3011.042	
32	0.376363	5.585	18.881	-14.685	-125.552	22431.173	78535.971	26.856		19.064	41.443	2924.305	
33	0.385689	5.760	18.715	-16.679	-127.547	23154.760	78776.115	27.723		18.917	41.125	2841.582	
34	0.394811	5.934	19.133	-18.533	-129.401	23878.346	78948.699	28.589		18.757	40.775	2761.511	
35	0.403966	6.109	19.023	-20.303	-131.171	24601.932	79080.209	29.455		18.578	40.388	2684.754	
36	0.413389	6.283	18.561	-22.017	-132.885	25325.518	79184.969	30.322		18.379	39.955	2611.502	
37	0.423189	6.458	17.809	-23.697	-134.565	26049.105	79273.246	31.188		18.155	39.468	2541.791	
38	0.433118	6.632	17.578	-25.289	-136.157	26772.691	79318.994	32.054		17.912	38.939	2474.521	
39	0.442985	6.807	17.724	-26.760	-137.628	27496.277	79305.916	32.921		17.656	38.382	2409.005	
40	0.452877	6.981	17.608	-28.132	-138.999	28219.863	79245.266	33.787		17.384	37.790	2345.440	
41	0.463209	7.156	16.892	-29.448	-140.315	28943.449	79157.527	34.653		17.086	37.143	2284.272	
42	0.473851	7.330	16.400	-30.683	-141.550	29667.036	79030.767	35.520		16.766	36.448	2224.990	
43	0.484666	7.505	16.134	-31.815	-142.683	30390.622	78854.379	36.386		16.428	35.712	2167.166	
44	0.495452	7.679	16.186	-32.822	-143.690	31114.208	78617.568	37.252		16.079	34.955	2110.410	
45	0.506480	7.854	15.826	-33.730	-144.598	31837.794	78332.430	38.119		15.712	34.157	2054.966	
46	0.517909	8.029	15.271	-34.542	-145.410	32561.381	78001.247	38.985		15.322	33.308	2000.805	
47	0.529768	8.203	14.717	-35.250	-146.118	33284.967	77619.773	39.851		14.908	32.408	1947.737	
48	0.541743	8.378	14.575	-35.829	-146.697	34008.553	77176.270	40.718		14.482	31.483	1895.403	
49	0.554083	8.552	14.167	-36.288	-147.156	34732.139	76674.384	41.584		14.038	30.517	1843.846	
50	0.566840	8.727	13.660	-36.622	-147.490	35455.726	76111.969	42.450		13.572	29.504	1792.968	
51	0.580220	8.901	13.044	-36.822	-147.689	36179.312	75485.014	43.317		13.080	28.435	1742.635	
52	0.594083	9.076	12.590	-36.875	-147.743	36902.898	74787.079	44.183		12.569	27.325	1692.669	
53	0.608526	9.250	12.084	-36.771	-147.639	37626.484	74013.576	45.049		12.037	26.168	1642.948	
54	0.623991	9.425	11.286	-36.492	-147.359	38350.071	73154.711	45.916		11.471	24.936	1593.243	
55	0.640276	9.599	10.717	-36.020	-146.888	39073.657	72203.141	46.782		10.880	23.652	1543.398	
56	0.657283	9.774	10.262	-35.348	-146.216	39797.243	71154.855	47.648		10.273	22.332	1493.336	
57	0.675379	9.948	9.645	-34.449	-145.317	40520.829	69997.148	48.515		9.641	20.959	1442.806	
58	0.695194	10.123	8.808	-33.272	-144.139	41244.416	68704.380	49.381		8.970	19.499	1391.314	
59	0.715670	10.297	8.524	-31.868	-142.736	41968.002	67302.586	50.247		8.302	18.049	1339.428	
60	0.736658	10.472	7.592	-30.102	-140.970	42691.588	65725.722	51.114		7.590	16.500	1285.876	
61	0.763790	10.647	6.945	-27.988	-138.856	43415.174	63980.599	51.980		6.860	14.912	1230.872	
62	0.792626	10.821	6.053	-25.393	-136.261	44138.760	62002.958	52.846		6.090	13.238	1173.271	
63	0.825449	10.996	5.317	-22.313	-133.181	44862.347	59791.283	53.713		5.306	11.536	1113.171	
64	0.863794	11.170	4.552	-18.687	-129.555	45585.933	57315.540	54.579		4.520	9.827	1050.141	
65	0.910011	11.345	3.776	-14.494	-125.362	46309.519	54565.533	55.445		3.755	8.163	984.134	
66	0.966788	11.519	3.074	-9.943	-120.811	47033.105	51642.702	56.312		3.065	6.663	917.089	
67	1.037413	11.694	2.471	-5.622	-116.540	47756.692	48855.325	57.178		2.524	5.487	854.444	
68	1.119040	11.868	2.138	-2.997	-113.665	48480.278	46839.308	58.044		2.187	4.753	806.959	
69	1.212330	12.043	1.871	-1.024	-111.892	49203.864	45162.162	58.911	1.85	1.853	4.028	766.622	
70	1.311813	12.217	1.758	-0.946	-111.814	49927.450	44401.124	59.777	1.76	1.755	3.816	742.781	
71	1.418516	12.392	1.633	-0.888	-111.743	50651.037	43643.073	60.643	1.66	1.658	3.604	719.669	

## REÓMETRO CAÍDA DE VARILLA

Relave Minero: EXP 5

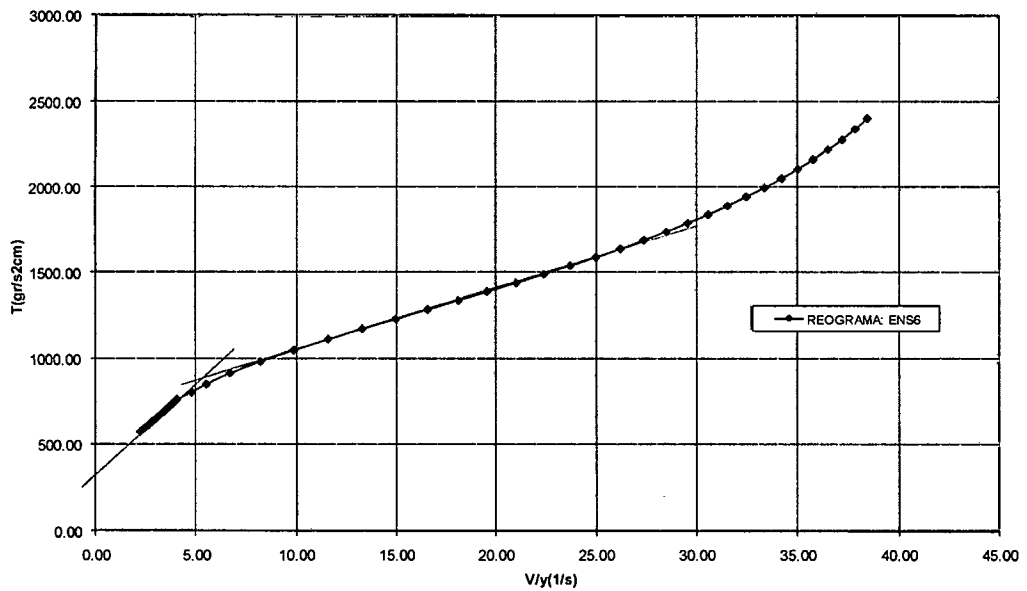
ENS 6

VELOCIDAD Vs TIEMPO  
 EXP5:Cw=74.41%



Fuente: Elaboración Propia

REOGRAMA  
 EXP5:Cw=74.41%



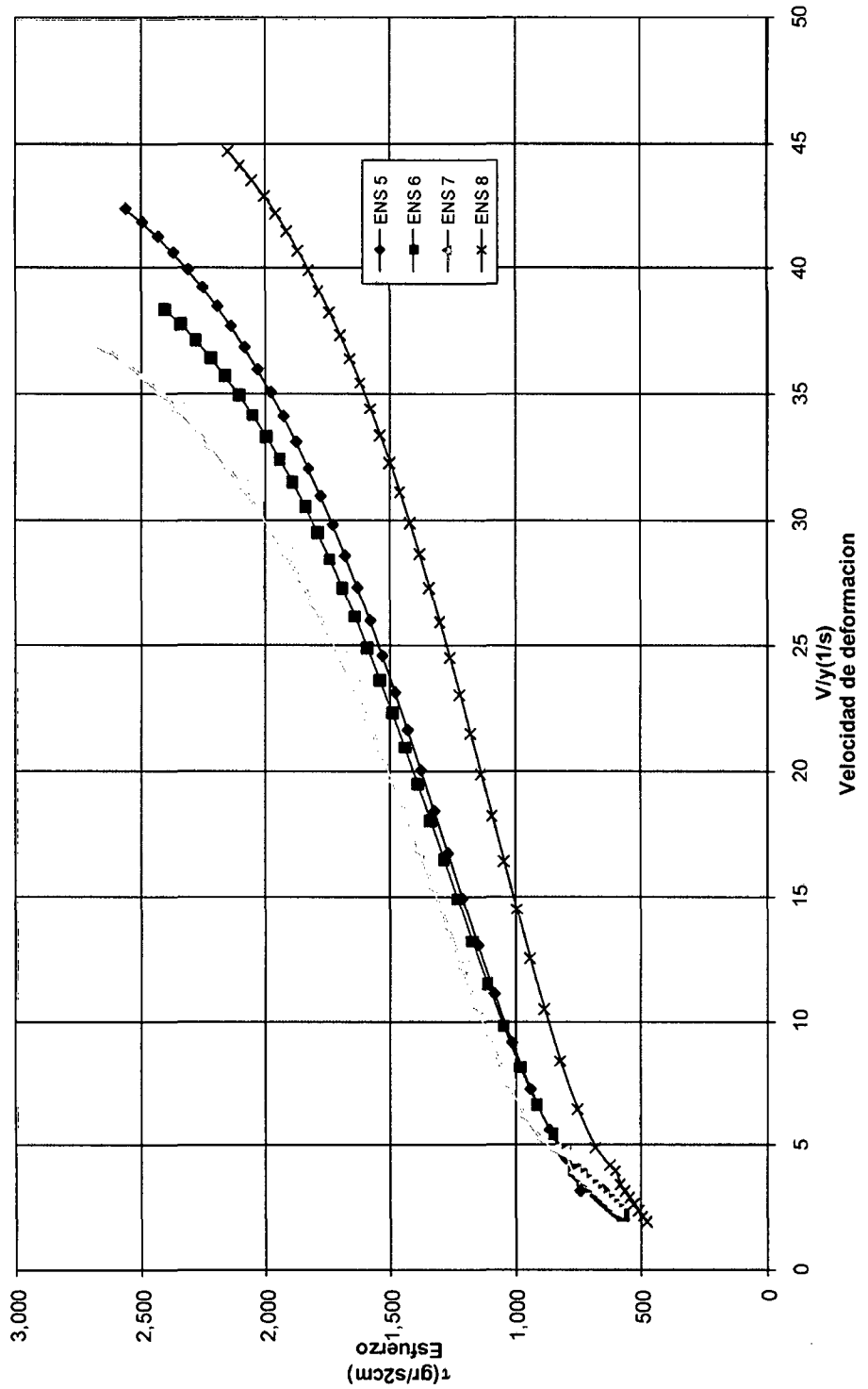
Fuente: Elaboración Propia



**REÓMETRO CAÍDA DE VARILLA**

REOGRAMA

EXP5:Cw=74.41%

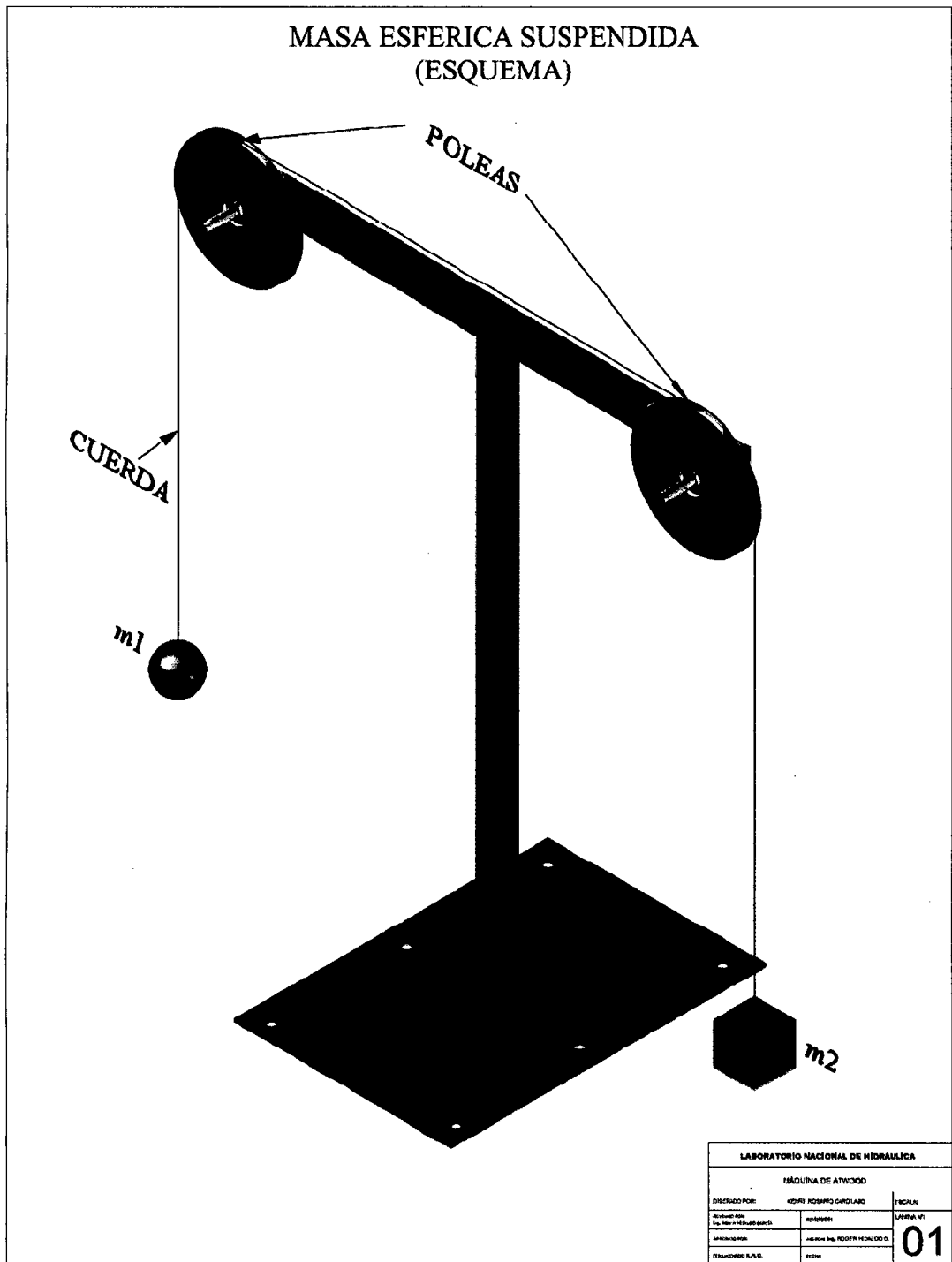


Fuente: Elaboración Propia

## A.3 PLANOS

### MÁQUINA DE ATWOOD

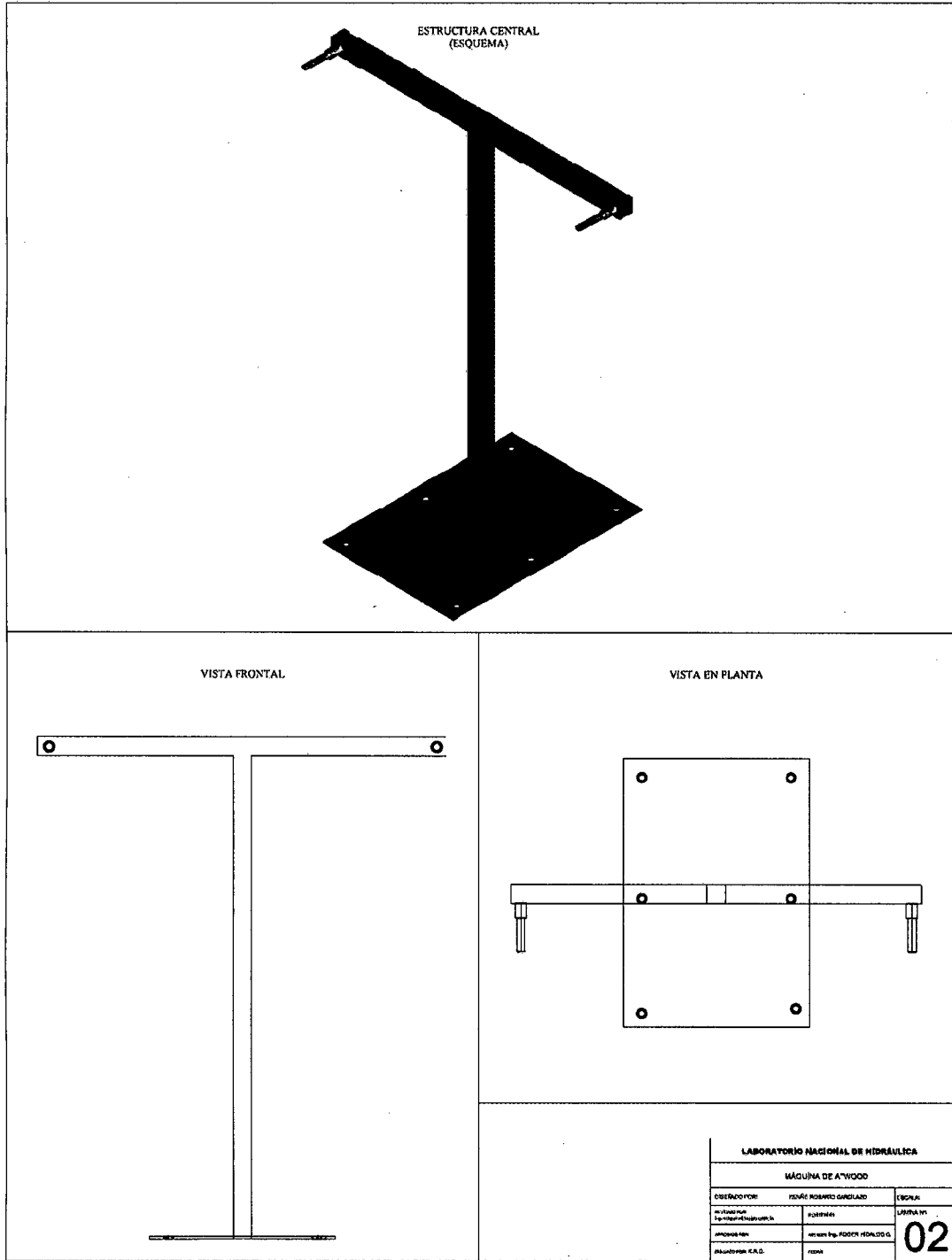
#### MASA ESFERICA SUSPENDIDA (ESQUEMA)



LABORATORIO NACIONAL DE HIDRÁULICA		
MÁQUINA DE ATWOOD		
DESARROLLADO POR:	RODRIGO JOSÉ GARCILAZO	ESCALA:
APROBADO POR:	RODRIGO JOSÉ GARCILAZO	UNIVERSIDAD:
LABORANDO POR:	RODRIGO JOSÉ GARCILAZO	01
OTRO NOMBRE:	RODRIGO JOSÉ GARCILAZO	

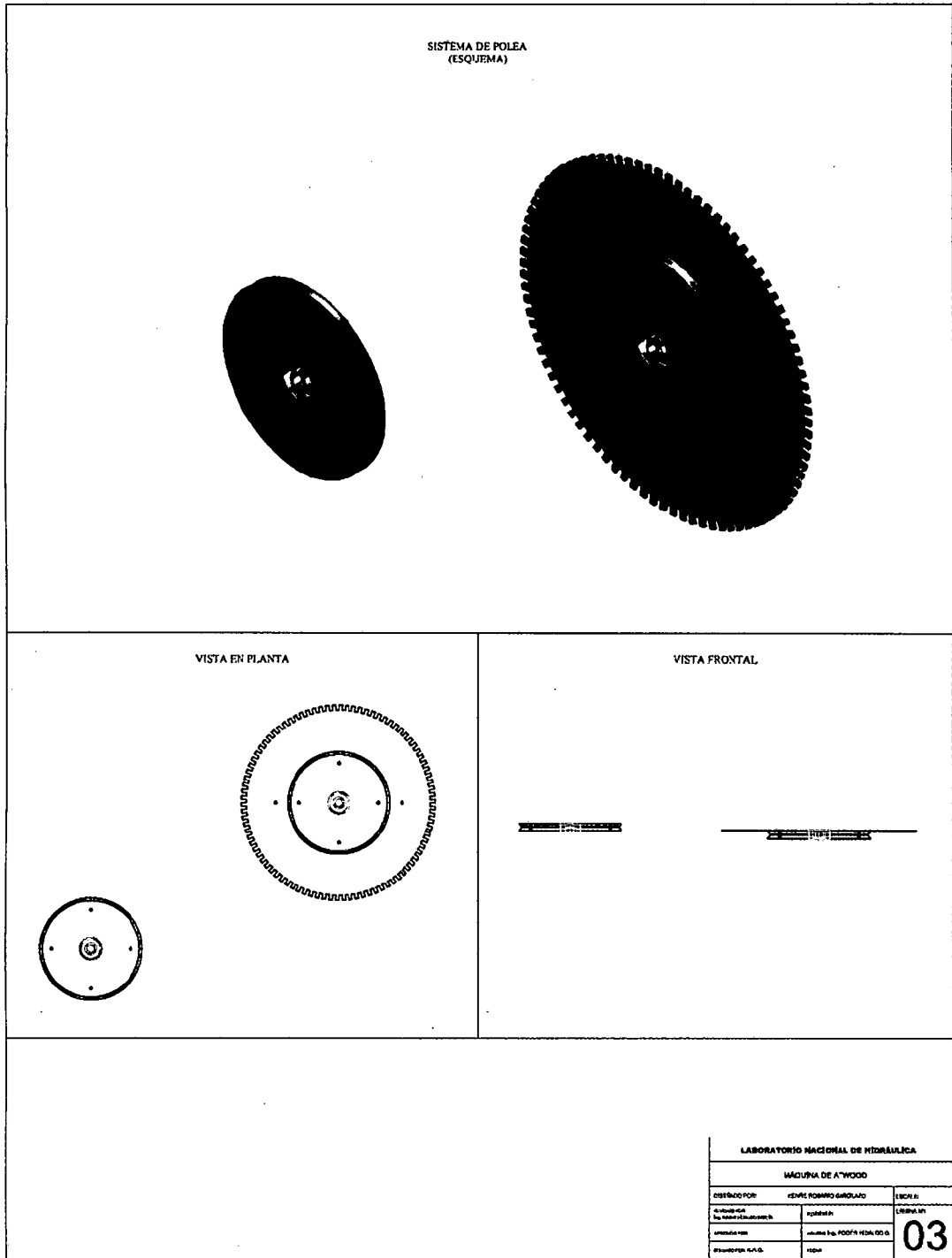
Fuente: Elaboración Propia

## MÁQUINA DE ATWOOD



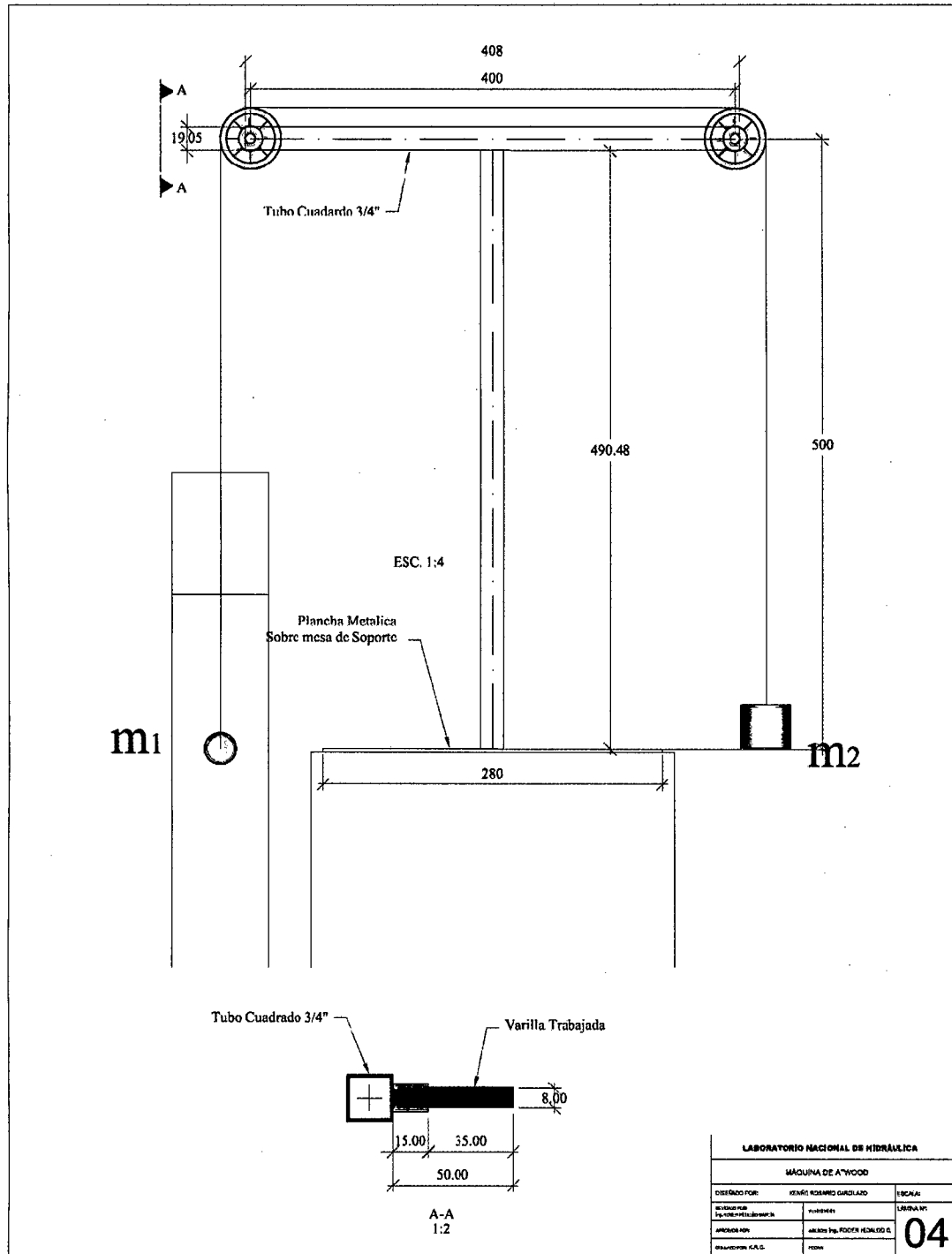
Fuente: Elaboración Propia

## MÁQUINA DE ATWOOD



Fuente: Elaboración Propia

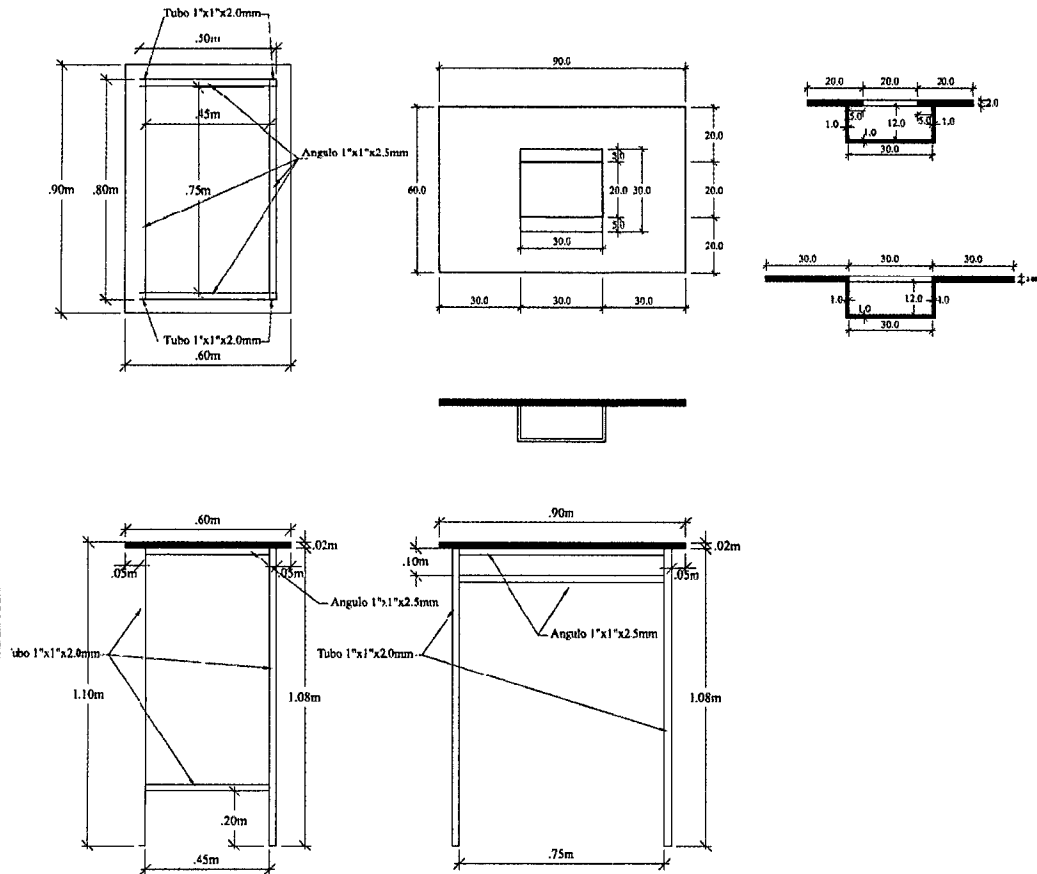
### MÁQUINA DE ATWOOD



Fuente: Elaboración Propia

## MÁQUINA DE ATWOOD

### MESA DE SOPORTE (ESQUEMA)

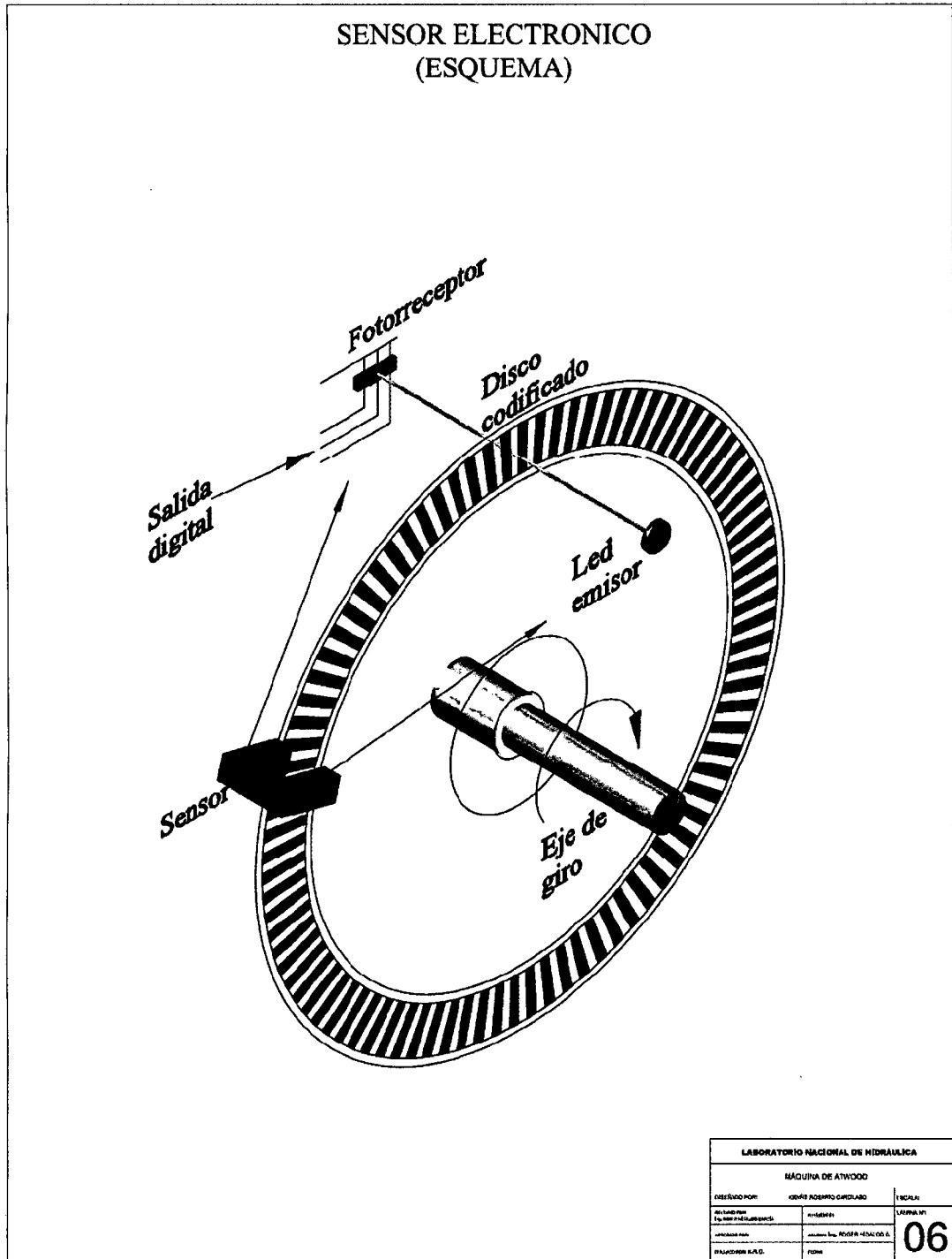


Fuente: Elaboración Propia

LABORATORIO NACIONAL DE HIDRÁULICA		
MÁQUINA DE ATWOOD		
DISEÑO POR:	REVISOR:	LIBRERO:
Kenfe Benito	Rosario Garcilazo	LIBRERÍA
PROYECTO:	FECHA:	05
PROYECTO:	FECHA:	

### MÁQUINA DE ATWOOD

#### SENSOR ELECTRONICO (ESQUEMA)

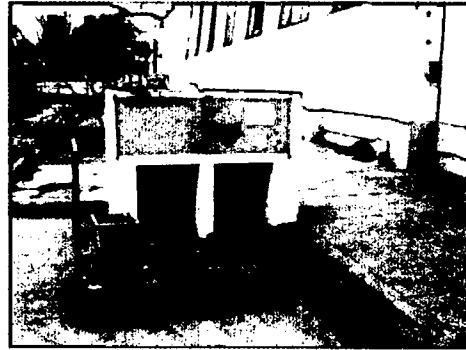


Fuente: Elaboración Propia

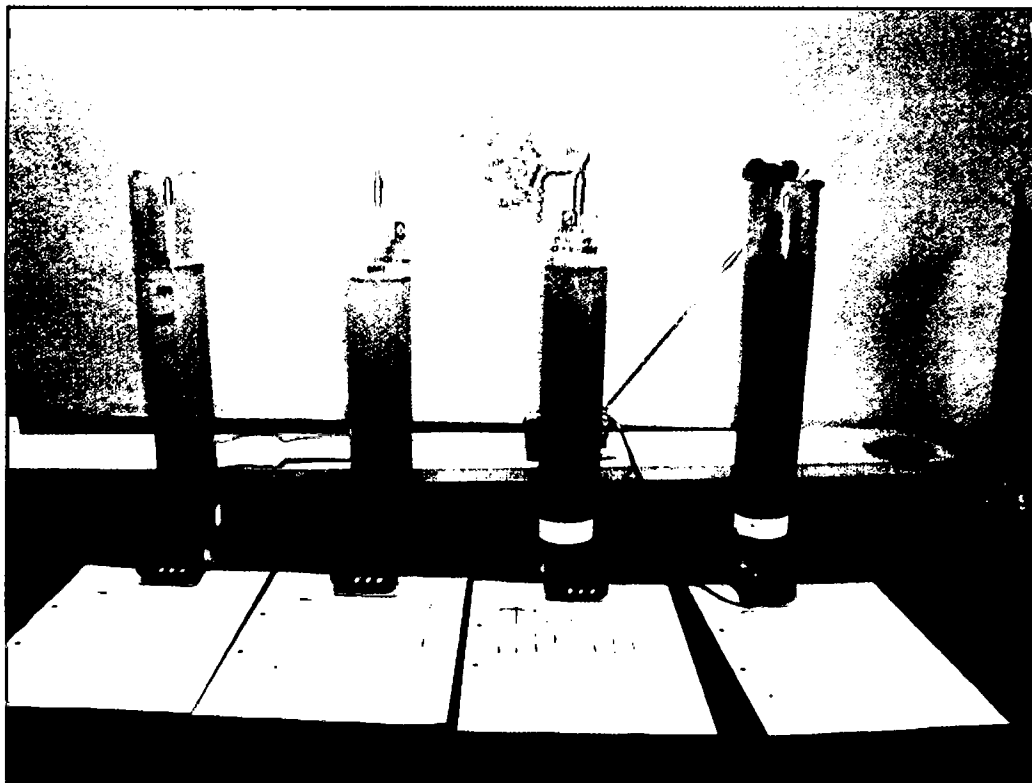


## **A.4 PANEL FOTOGRÁFICO**

## ENSAYO DE LABORATORIO Gravedad Específica



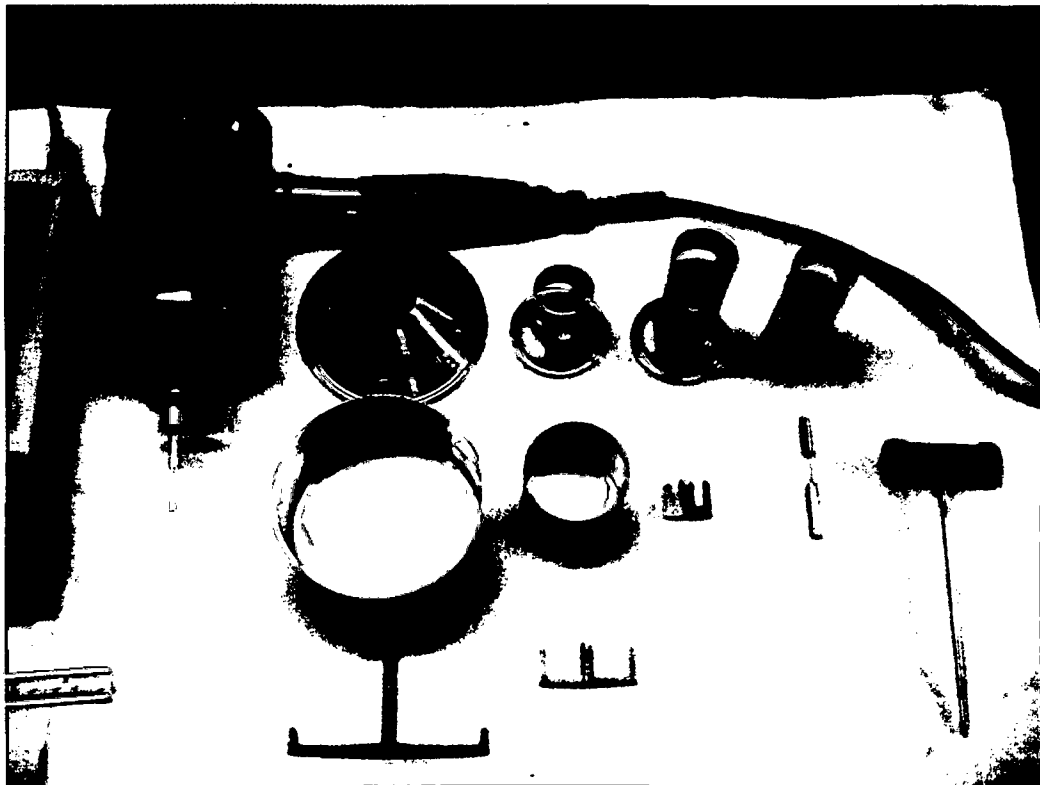
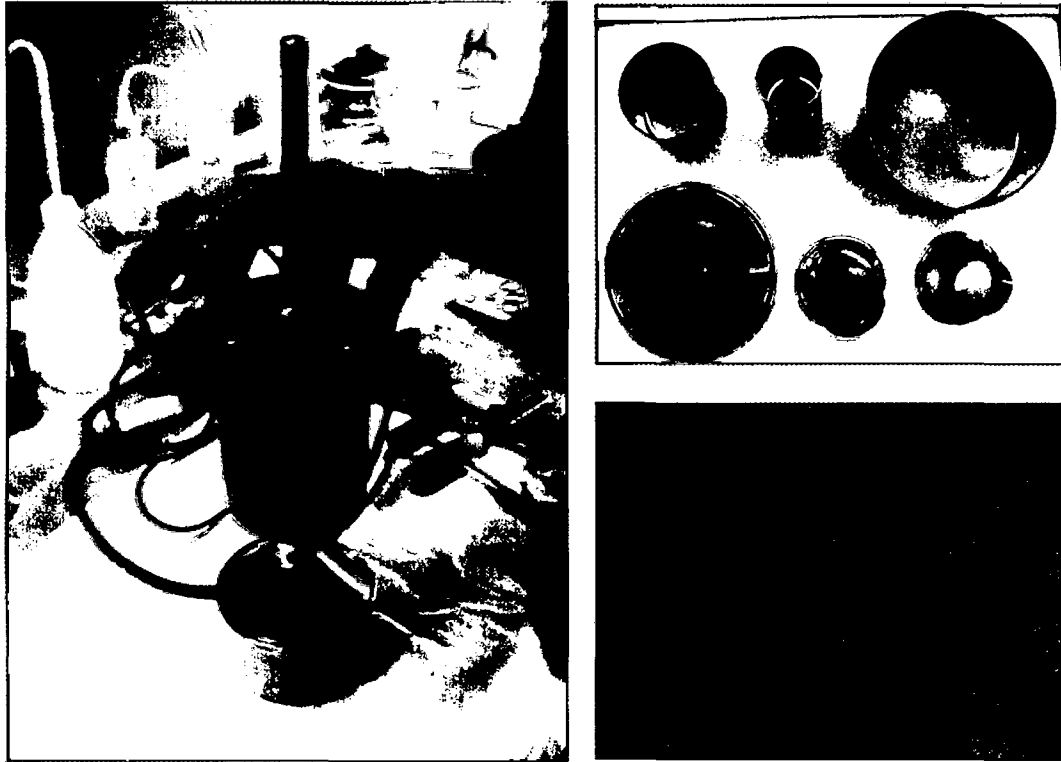
## Granulometría por Hidrómetro



Fuente: Elaboración Propia

## INSTRUMENTAL REOLÓGICO

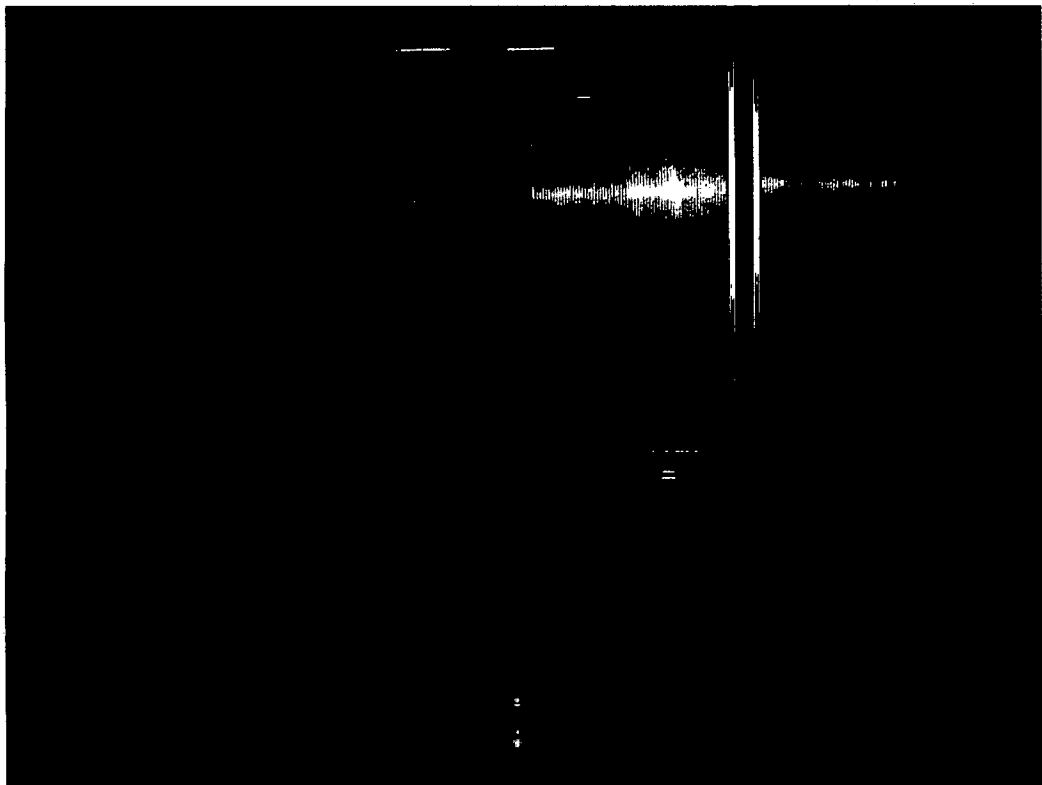
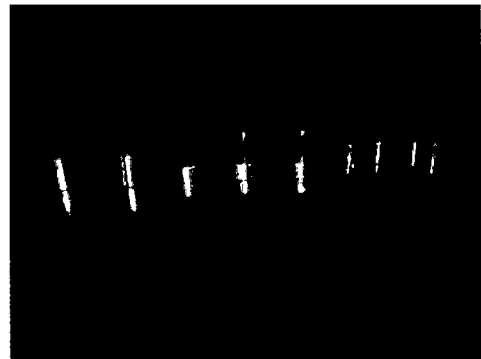
### Viscosímetro Tipo Drage



Fuente: Elaboración Propia

## INSTRUMENTAL REOLÓGICO

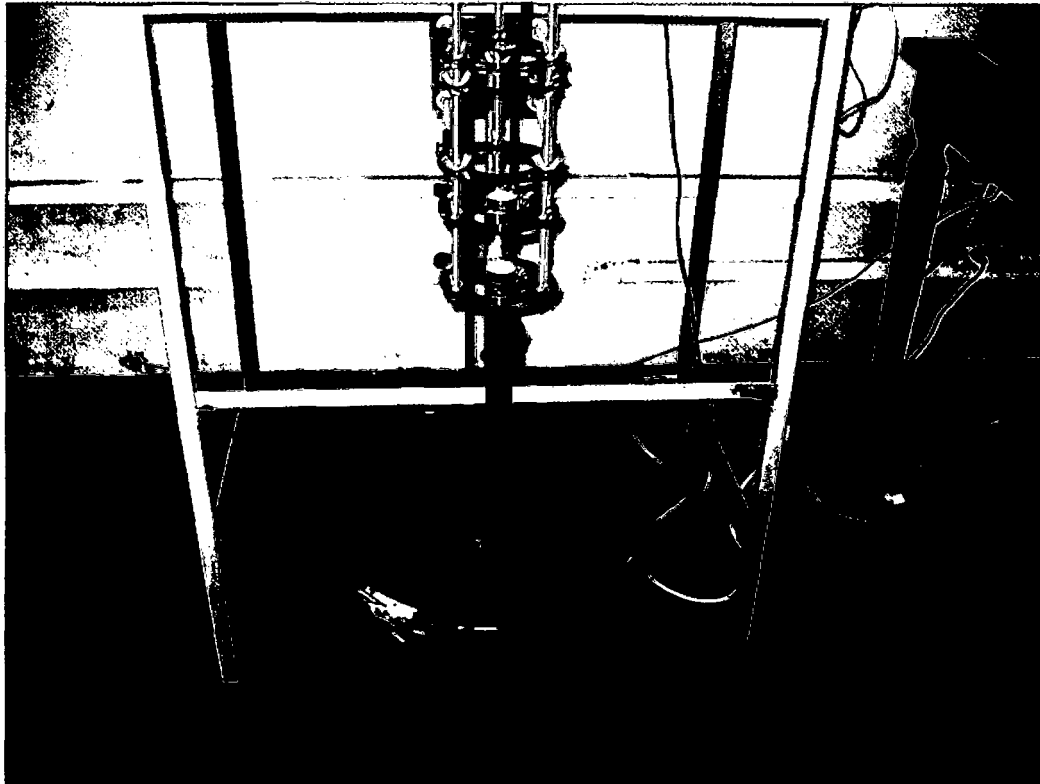
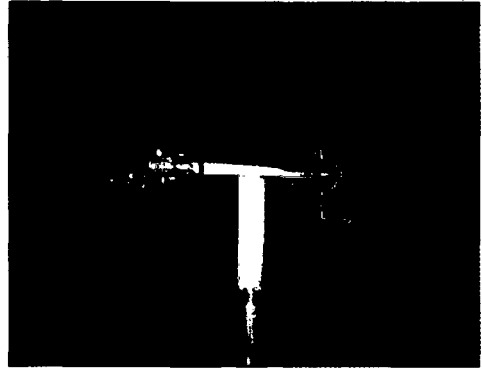
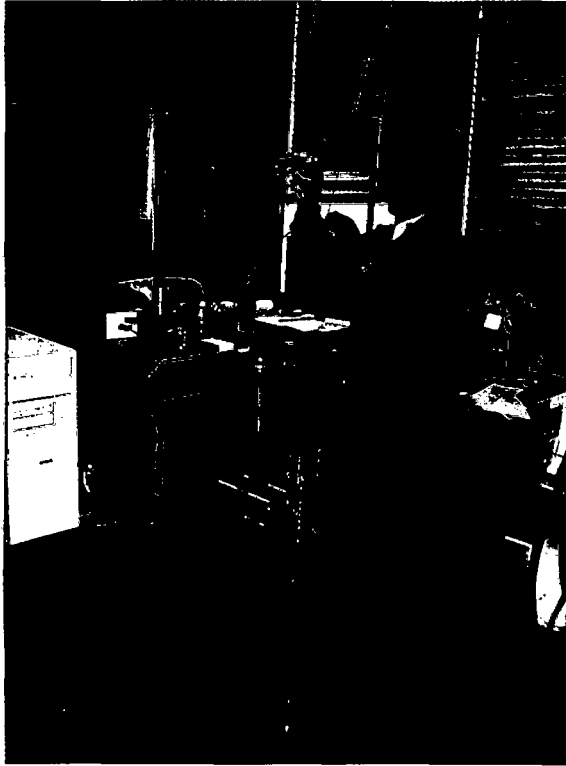
### Reómetro de Caída de Esfera



Fuente: Elaboración Propia

## INSTRUMENTAL REOLÓGICO

### Reómetro de Caída de Varilla



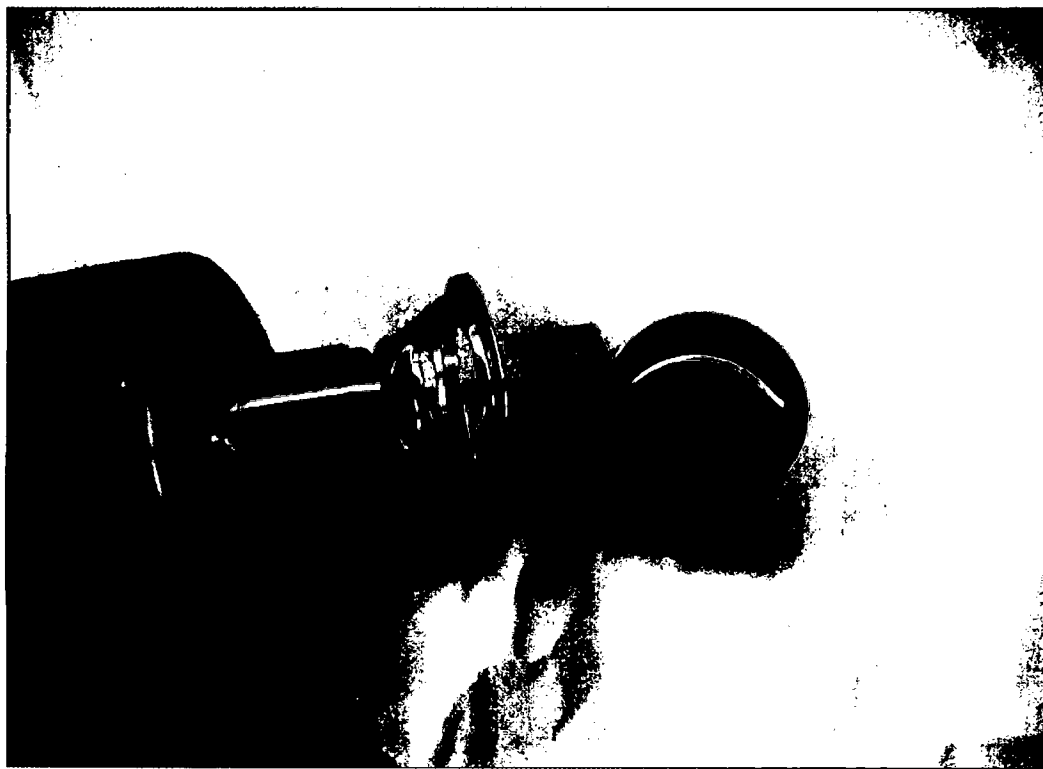
Fuente: Elaboración Propia

**ENSAYOS REOLÓGICOS**  
**VISCOSÍMETRO DRAGE**  
**Mezcla Azúcar – Agua**



Fuente: Elaboración Propia

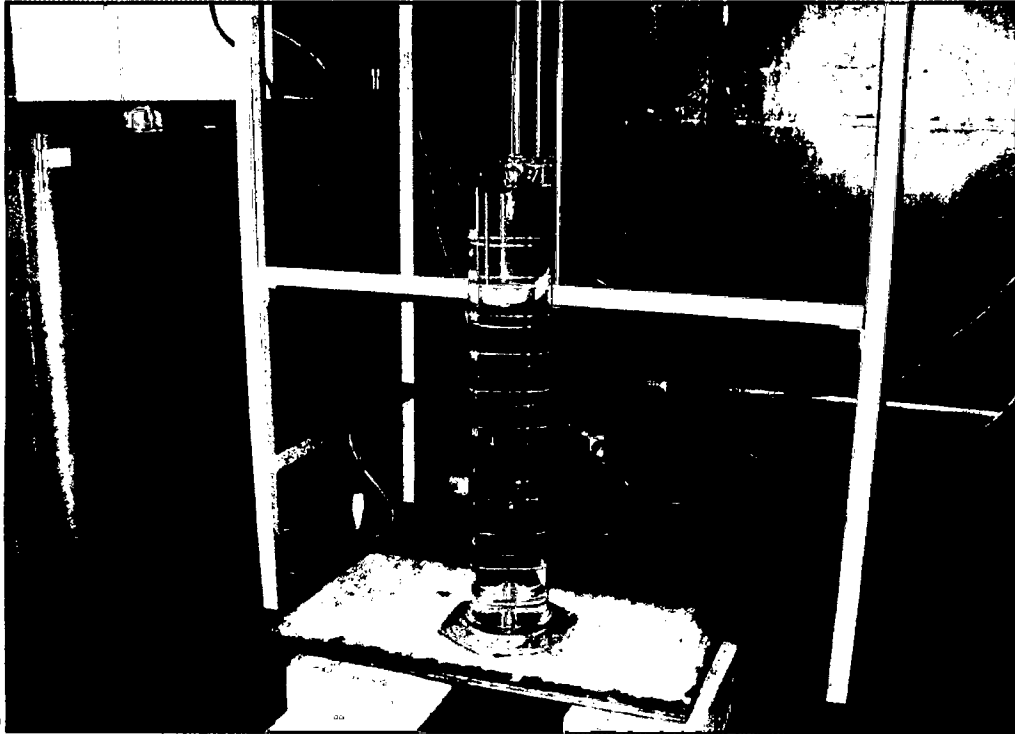
**ENSAYOS REOLÓGICOS**  
**VISCOSÍMETRO DRAGE**  
**Mezcla Relave – Agua**



Fuente: Elaboración Propia

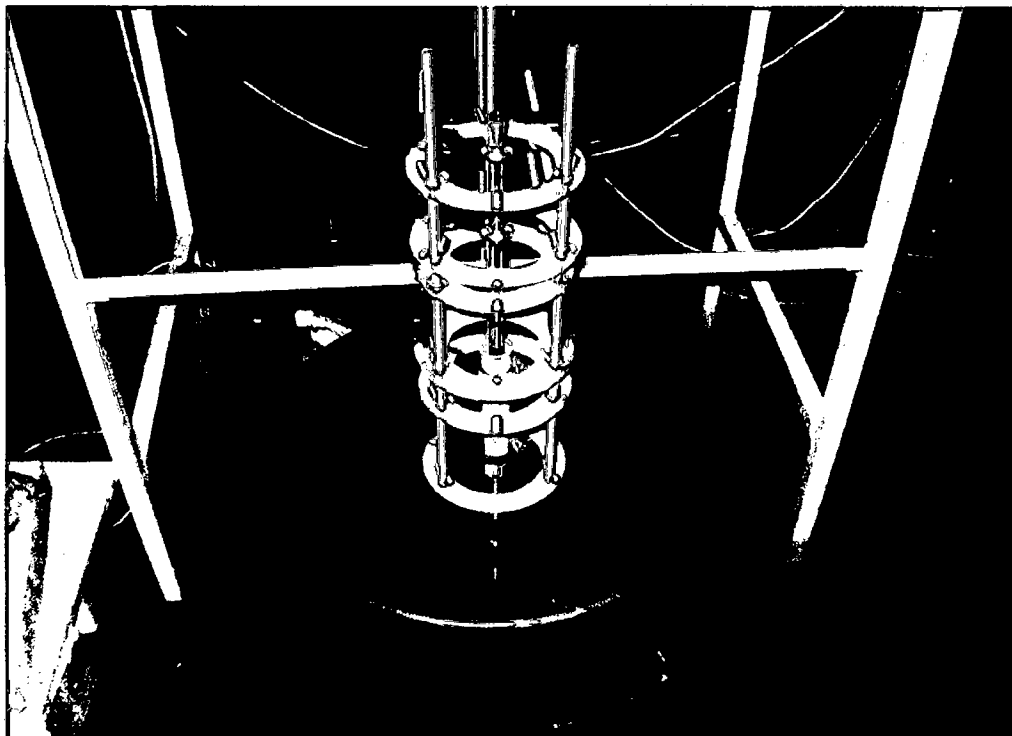
## ENSAYOS REOLÓGICOS REÓMETRO DE CAÍDA DE ESFERA

Agua



9

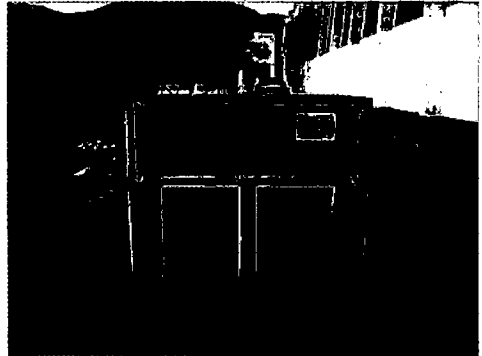
Aceite



Fuente: Elaboración Propia



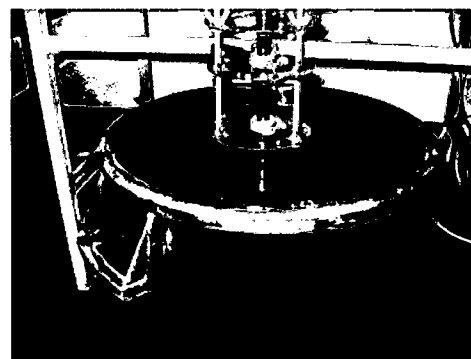
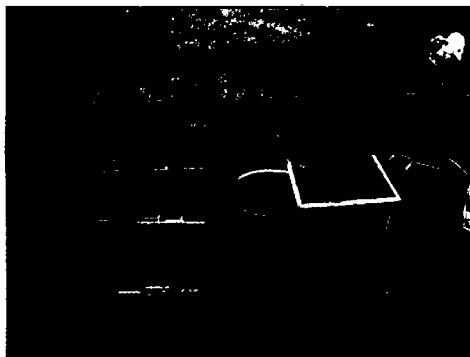
## ENSAYOS REOLÓGICOS REÓMETRO DE CAÍDA DE VARILLA Preparación de la Muestra: Relave Minero



Fuente: Elaboración Propia

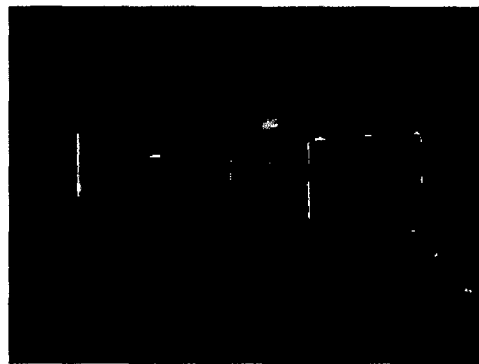
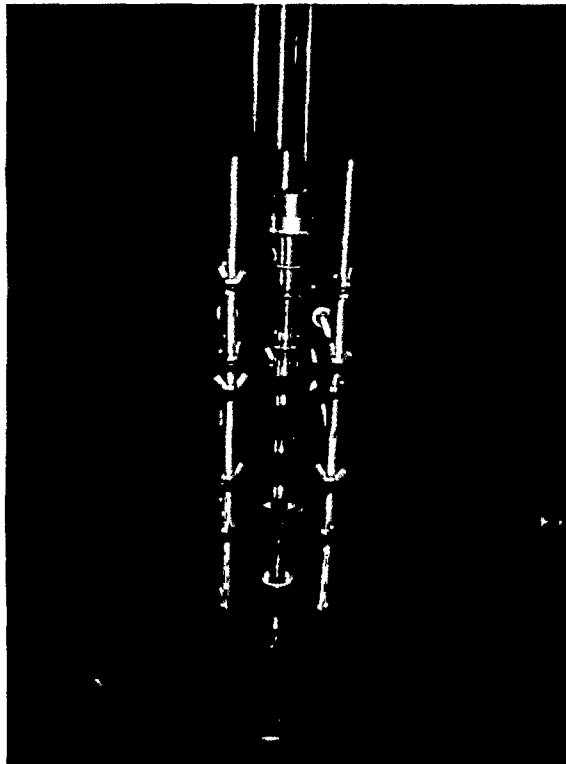
## ENSAYOS REOLÓGICOS REÓMETRO DE CAÍDA DE VARILLA

### Relave Minero



Fuente: Elaboración Propia

## ENSAYOS REOLÓGICOS REÓMETRO DE CAÍDA DE VARILLA Relave Minero



Fuente: Elaboración Propia