



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**“Estudio Del Comportamiento Reológico De La Melaza De Caña  
De Azúcar”**

**TESIS DE GRADO**

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERA DE ALIMENTOS**

Presentada por:

Mónica Florencia Béhar Castro

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

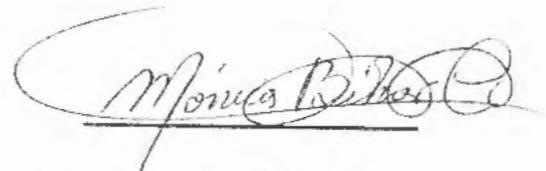
Año: 2002



## DECLARACIÓN EXPRESA

“ La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL ”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in cursive script, reading "Mónica Béhar C.", written over a horizontal line.

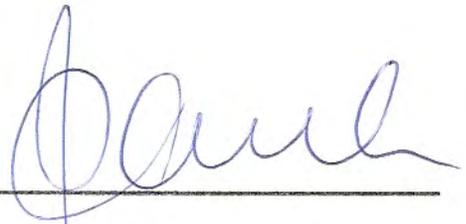
Q.F. Mónica Béhar C.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



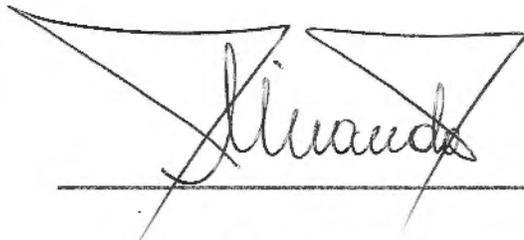
---

Ing. Eduardo Rivadeneira P.  
DECANO DE LA FIMCP



---

Dr. Raúl Castillo T.  
DIRECTOR DE TESIS



---

Ing. Luis Miranda S.  
VOCAL



---

Ing. Francisco Andrade S.  
VOCAL

## DEDICATORIA

A MI MADRE, NINA.

A LA MEMORIA DE MI  
PADRE.

A MIS HERMANOS.

A MARCOS ANTONIO Y  
LUIS AUHING.



## AGRADECIMIENTO

A mi familia y amigos quienes colaboraron en la realización del presente trabajo y especialmente al Ing. Luis Miranda y Dr. Raúl Castillo, Coordinador de la Carrera de Ingeniería en Alimentos y Director de Tesis respectivamente, por su valiosa cooperación y a todas las personas que contribuyeron de alguna forma.

## RESUMEN

El presente estudio se refiere a los meses de zafra del 2001: Junio, Julio y Agosto de producción de melaza del Ingenio la Troncal, estudio realizado a temperaturas de 25, 45, 55 y 65 °C, a fin de determinar el comportamiento reológico, como un estudio preliminar para optimizar las condiciones de bombeo de las melazas.

Esta tesis revisa las generalidades de la melaza de caña de azúcar, posteriormente desarrolla el procedimiento experimental que describe el criterio aplicado para la selección de muestras, el conocimiento y manejo del equipo utilizado en los ensayos (viscosímetro rotacional); seguido de la determinación de las variables esfuerzo de corte ( $T$ ), velocidades de corte ( $Dr$ ) y la consecuente aplicación de la ecuación de Potencia para determinar parámetros reológicos: Índices de consistencia ( $K$ ) e índices de comportamiento reológico ( $n$ ), finalmente con los índices de consistencia obtenidos se aplica la ecuación de Arrhenius para calcular las energías de activación de flujo a las temperaturas de 25, 45, 55 y 65 °C.

## ÍNDICE GENERAL

Pag.	
	RESUMEN.....II
	INDICE GENERAL.....III
	ABREVIATURAS.....IV
	SIMBOLOGÍA.....V
	ÍNDICES DE FIGURAS.....VI
	ÍNDICE DE GRAFICO.....VII
	ÍNDICE DE TABLAS.....VIII
	INTRODUCCIÓN.....1
	CAPÍTULO 1
	1. GERALIDADES.....3
	1.1. Características de la Melaza de Caña.....3
	1.1.1. Composición.....4
	1.1.2. Propiedades Químico – Físicas.....9
	1.2. Influencia de los Componentes de la Melaza
	Sobre su viscosidad.....12
	1.3. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad.....14

1.4.	Efecto de la viscosidad sobre el bombeo.....	15
1.5.	Propiedades Reológicas.....	16
1.5.1.	Ley de Potencia.....	16
1.5.2.	Fluidos que Cumplen la Ley de Potencia.....	18
1.5.3.	Curvas de Flujo.....	19

## CAPÍTULO 2

2.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	21
2.1.	Criterio Aplicado para la Selección de Muestras.....	21
2.2.	Equipo Utilizado.....	25
2.2.1.	Rheotest y sus Componentes.....	25
2.2.2.	Determinación de Variables Reológicas Con el Rheotest.....	27
2.2.3.	Preparación y Manejo del Equipo.....	31
2.3.	Cálculo de Variables y Aplicación de Curvas de Flujo a Temperaturas de 25, 45, 55 y 65 °C.....	33
2.4.	Aplicación de la ley de Potencia.....	41

## CAPÍTULO 3

3.	RESULTADOS.....	56
3.1.	Parámetros Reológicos Obtenidos.....	56

3.2. Gráficos de índices de Consistencia vs. Temperaturas.....	69
3.3. Cálculos de Energías de Activación.....	74

#### CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
--	----

#### ANEXOS

#### BIBLIOGRAFÍA.

## ABREVIATURAS

cP	Centipoise
$K_0$	Constante Dada por el Intercepto de la Recta Obtenida a través de Regresión Lineal Utilizando la Ecuación de Arrhenius.
Dyn/cm <sup>2</sup>	Dyna Sobre Centímetro Cuadrado
EA	Energía de Activación de Flujo
G/cm.s <sup>2</sup>	Gramos Sobre Centímetro Segundo Cuadrado
1/s	Inverso de Segundos
1/°K	Inverso de Grados Kelvin
J/g.mol	Joul Sobre Gramos Mol
Kg/m.s	Kilogramo Sobre Metro por Segundo
KJ/g.mol	Kilo Joul Sobre Gramos Mol
Ln	Logaritmo Neperiano
Pol	Polarización (Concentración de Sacarosa)
Pza	Pureza (Relación entre ° Brix/Pol)
Rpm	Revoluciones por Minuto
S	Semanas de Muestreo
TA	Temperatura Absoluta

## SIMBOLOGÍA

$\alpha$	Alfa (Medición en la Escala del Rheotest)
S	Area de la Superficie de Contacto Entre Capas
RG	Constante de Los Gases
$d$	Delta
$\delta$	Derivada, Delta ó Gradiente.
$db$	Delta Mínimo de la Escala del Eje de las Ordenadas, de los Gráficos de Linealización de las Curvas de Flujo
$\delta x$	Delta Mínimo de la Escala de las Abscisas, de los Gráficos de Linealización de las Curvas de Flujo.
$\delta y$	Delta Mínimo de la Escala del Eje de las Ordenadas, de los Gráficos de Linealización de las Curvas de Flujo
$\tau$	Esfuerzo de Corte ó de Cizalla
$\delta K$	Error Experimental del Indice de Consistencia.
$\delta n$	Error Experimental del Indice de Flujo
F	Fuerzas de Fricción Internas
°Brix	Grados Brix (% de Sólidos Solubles)
°C	Grados Centígrados
° K	Grados Kelvin
$dv / dr$	Gradiente de Velocidad de Deformación ó Velocidad de Corte ó Cizalla
Dr	Velocidad de Corte ó Cizalla (Dado por el Manual del Rheotest)
K	Indice de Consistencia
(n)	Indice de Comportamiento Reológico ó de Flujo
(m)	Pendiente de la Recta Obtenida a Través de Regresión Lineal
( $r^2$ )	Indice de Correlación
X	Logaritmo Neperiano de Dr
Y	Logaritmo Neperiano de T
$\mu_a$	Viscosidad Aparente (U)
Z	Valor de la Constante del Cilindro de Medición Utilizado en el Rheotest
LnK	Valor del Intercepto de la Curva de Flujo Linealizada, con el Eje de las Ordenadas (b)
(e)	Número Neperiano (2.718281).

## INDICES DE FIGURAS

	Pag
Figura 1.1. Curvas de Flujo Típicas.....	20
Figura 2.1. Determinación de Viscosidades Aparentes de Fluidos Seudoplásticos.....	30

## INDICES DE TABLAS

	Pag
Tabla 1 Composición Química Media Aproximada de Las Melazas de Caña.....	8
Tabla 2 Principales Propiedades Químico – Físicas de las Melazas de Caña.....	12
Tabla 3 Cronograma de Toma de Muestras de Melazas de Caña de Azúcar.....	22
Tabla 4 Selección de Muestras en Función del Porcentaje de Purezas .....	24
Tabla 5 Especificaciones del Rheotest.....	27
Tabla 6 Valores de la Constante (Z) en Función del Momento de Torsión Máximo y de los cilindros de medición del Rheotest.....	29
Tabla 7 Lecturas Tomadas y Variables Calculadas a 25°C de Muestra (1), Con 32.22 % de Pureza. ....	34
Tabla 8 Lecturas Tomadas y Variables Calculadas a 45 °C de Muestra (1), Con 32.22 % de Pureza.....	36
Tabla 9 Lecturas Tomadas y Variables Calculadas a 55 °C de Muestra (1), Con 32.22 % de Pureza .....	37
Tabla 10 Lecturas Tomadas y Variables Calculadas a 65 °C de Muestra (1), Con 32.22 % de Pureza.....	39
Tabla 11 Aplicación de Logaritmos Neperianos a las Variables Dr y T Calculadas a 25 °C, de Muestra (1) , A través de Regresión Lineal, Para Determinar Parámetros Reológicos de K, y n, Correspondientes a la Ecuación de Potencia.....	43

Tabla 12	Aplicación de Logaritmos Neperianos a las Variables Dr y T Calculadas a 45 °C, de Muestra (1) , A través de Regresión Lineal, Para Determinar Parámetros Reológicos de K, y n, Correspondientes a la Ecuación de Potencia.....	47
Tabla 13	Aplicación de Logaritmos Neperianos a las Variables Dr y T Calculadas a 55 °C, de Muestra (1) , A través de Regresión Lineal, Para Determinar Parámetros Reológicos de K, y n, Correspondientes a la Ecuación de Potencia.....	50
Tabla 14	Aplicación de Logaritmos Neperianos a las Variables Dr y T Calculadas a 65 °C, de Muestra (1) , A través de Regresión Lineal, Para Determinar Parámetros Reológicos de K, y n, Correspondientes a la Ecuación de Potencia.....	53
Tabla 15	Indices de Consistencia (K) Con 5 % de Error Experimental, Calculados a 25, 45, 55 y 65 °C, A partir de la Aplicación de la Ley de Potencia a las Variables de T y Dr a través de Regresión Lineal, (g/cm.s).....	58
Tabla 16	Indices de Comportamiento Reológico (n) calculados a 25, 45, 55 y 65 °C, A Partir de la Aplicación de la Ley de Potencia a las Variables de T y Dr a través de Regresión Lineal (Adimensionales).....	62
Tabla 17	Indices de Correlación ( $r^2$ ) de las variables calculadas (Esfuerzos de Corte T y Velocidad de Corte Dr), Obtenidas A partir de la Aplicación de la Ley de Potencia A través de Regresión Lineal.....	67
Tabla 18	Promedios del Porcentaje de Error Relativo de los Esfuerzos de Corte Calculados Experimentalmente a 25, 45, 55 y 65 °C, con respecto al Esfuerzo de Corte Teórico.....	68
Tabla 19	Energías de Activación de Flujo (EA), Requeridas por Muestras Seleccionadas.....	84

## INDICES DE GRÁFICOS

Pag.		
	Gráfico 2.1.	Curva de Flujo T vs. Dr (dv/dr) a 25 °C De muestra (1).....35
	Gráfico 2.2.	Curva de Flujo T vs. Dr (dv/dr) a 45 °C De muestra (1).....37
	Gráfico 2.3.	Curva de Flujo T vs. Dr (dv/dr) a 55°C De muestra (1).....38
	Gráfico 2.4.	Curva de Flujo T vs. Dr (dv/dr) a 65 °C De muestra (1).....40
	Gráfico 2.5.	Linealización de Curva de Flujo de Muestra (1) A 25 °C, .....45
	Gráfico 2.6.	Linealización de Curva de Flujo de Muestra (1) A 45 °C. ....49
	Gráfico 2.7.	Linealización de Curva de Flujo de Muestra (1) A 55 °C. ....52
	Gráfico 2.8.	Linealización de Curva de Flujo de Muestra (1) A 65 °C. ....55
	Gráfico 3.1.	Indices de Consistencias (K) vs. Temperaturas de Las Muestras 1,2, 3,4,5.....70
	Gráfico 3.2.	Indices de Consistencias (K) vs. Temperaturas de Las Muestras 6, 7, 8, 9, 10.....72
	Gráfico 3.3.	Indices de Consistencias (K) vs. Temperaturas de Las Muestras 11, 12, 13, 14, 15.....73

Gráfico 3.4. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (1).....	76
Gráfico 3.5. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (2).....	76
Gráfico 3.6. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (3).....	77
Gráfico 3.7. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De al Muestra (4).....	77
Gráfico 3.8. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (5).....	78
Gráfico 3.9. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (6).....	78
Gráfico 3.10. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (7).....	79
Gráfico 3.11. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (8).....	79
Gráfico 3.12. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (9).....	80
Gráfico 3.13. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (10).....	80
Gráfico 3.14. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (11).....	81
Gráfico 3.15. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (12).....	81
Gráfico 3.16. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (13).....	82
Gráfico 3.17. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia	
De la Muestra (14).....	82

Gráfico 3.18. Ecuaciones de Arrhenius Para Indices de Consistencia De la Muestra (15).....	83
Gráfico 3.19. Energías de Activación (EA) vs. Porcentajes de Purezas (% Pzas), de las 15 Muestras del Ingenio La Troncal.....	86
Gráfico 3.20. Energías de Activación (EA) vs. ° Brix, De las 15 Muestras Del Ingenio La Troncal.....	86

## INTRODUCCIÓN



Siendo las melazas fluidos no newtonianos, cuya composición química le otorga propiedades físico-químicas que influyen sobre el bombeo durante su transporte por tuberías, se hace necesario conocer sus viscosidades a las temperaturas que generalmente se bombean, ya que la fricción de una tubería aumenta proporcionalmente con la viscosidad de las mismas.

Debido a estas características, fue necesario realizar este estudio, que inicia describiendo brevemente las características de las melazas en términos de composición, propiedades químico-físicas, influencia de su composición sobre la viscosidad, propiedades reológicas, entre otras generalidades fundamentales, que ayudan a la investigación. Posteriormente desarrolla el Procedimiento Experimental que implica la descripción del criterio aplicado para la selección de las muestras en función de sus propiedades químicas; el conocimiento y manejo del equipo utilizado (viscosímetro rotacional); seguido del cálculo de variables y su consecuente aplicación de la Ley de Potencia, cuyo fin es obtener los parámetros reológicos: Índices de consistencia ( $K$ ) e Índices de comportamiento de flujo ( $n$ ) para caracterizar reológicamente las melazas a temperaturas de bombeos (25, 45, 55 y 65 °C), finalmente las  $K$  obtenidas nos permitirán utilizar la ecuación de Arrhenius para calcular las energías de activación de flujo.

Es decir la finalidad de la presente tesis, es determinar el Comportamiento Reológico de Melazas de Caña de Azúcar del Ingenio la Troncal, con purezas que oscilan entre 32 y 42 % de sacarosa, los ensayos se efectuaron a temperaturas de 25, 45, 55 y 65 °C, aplicando el modelo de la Ley de Potencia a través de regresión lineal a los datos obtenidos mediante el equipo utilizado (viscosímetro rotacional ó Rheotest); este trabajo se lo considera como un estudio preliminar para optimizar las condiciones de bombeo de las melazas para su transporte por sistemas de tuberías.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES



Para analizar el comportamiento reológico de la melaza se deben conocer aspectos básicos de la materia prima, tales como: definición de la melaza, su composición, principales propiedades químico-físicas, influencia de los componentes de la melaza sobre la viscosidad, efecto de la temperatura sobre la viscosidad, efecto de la viscosidad sobre el bombeo y propiedades reológicas que a continuación se describen brevemente.

### 1.1. Características de las Melaza de Caña.

La melaza, llamada también miel final o de purga, es un líquido denso, viscoso, de color oscuro que se obtiene como el principal subproducto durante la fabricación del azúcar de caña o remolacha, que resulta después de extraer la mayor cantidad de azúcar cristalizable de la centrifugación de la tercera masa

cocida proveniente del jugo de caña previamente purificado (2, 7), (jugo de caña, sometido a procesos de alcalinización, clarificación y eliminación de sedimentos).

### 1.1.1. Composición

Las magnitudes en la composición de las melazas obtenidas de la caña de azúcar varían según las localidades, la clase de caña, las condiciones del suelo, el clima y los métodos de fabricación puesto que durante el procesamiento hay formación de nuevos compuestos (7). Entre los componentes principales encontramos.

**Agua.-** El agua de las mieles, se presenta en mayor cantidad como agua libre, pero también se encuentra una pequeña cantidad como agua de hidratación (agua como parte molecular de carbohidratos) (2).

**Hidratos de carbono.-** Entre los principales se encuentran los azúcares como la sacarosa, glucosa, fructosa, manosa; y azúcares infermentables, estos últimos se forman a partir de la reacción entre aminoácidos y azúcares reductores (2).

**Azúcares reductores.-** Los principales azúcares reductores son la glucosa y fructosa, cuyas magnitudes a veces depende de la hidrólisis de la sacarosa bajo condiciones de altas temperaturas y bajo pH durante el procesamiento (2). Se encuentran en las mieles, entre 25 a 30 % como parte del contenido de sólidos totales, que es alrededor del 80 % (7).

**Sustancias nitrogenadas.-** El total de sustancias nitrogenadas que contienen las mieles fluctúan entre 0.4 y 2 %. Entre estos compuestos se encuentran, nitrógeno amoniacal, proteínas, ácido nítrico, aminoácidos como el aspártico, glutámico, alanina, valina y ciertas purinas (4).

**Materias colorantes.-** Se producen principalmente por la descomposición de la sacarosa y de las reacciones de los azúcares reductores con los aminoácidos, que combinados con la cal (se la usa durante la purificación del jugo de caña), formando principalmente los caramelos y las melanoidinas respectivamente (2).

**Vitaminas.-** Las vitaminas estables al calor y medio alcalino pasan a formar parte de las mieles finales, entre las vitaminas de mayor consideración se encuentran la biotina, niacina, riboflavina y ácido pantoténico (2).

**Acidos totales.-** Entre los principales ácidos volátiles hallados en pequeñas cantidades se encuentran el ácido acético, propiónico, butírico e isobutírico, los cuales pueden resultar perjudiciales en los procesos fermentativos, también se presentan el ácido láctico, cítrico, aconítico este último es el de mayor concentración y el ácido fórmico presente como producto de descomposición de la melaza (4).

**Lípidos.-** generalmente son ceras y grasas que escapan del proceso de fabricación y pasan a las mieles finales entre los cuales se encuentran, el fitoesterol, ácido linoleico, alcohol medicilico (7). El contenido de estos compuestos se hallan alrededor del 0.5 % (2).

**Cenizas.-** Son sustancias inorgánicas presentes como carbonatos, cloruros y sulfatos de metales alcalinos;

además se encuentran trazas de plomo, níquel, molibdeno, plata, cromo, zinc, cobre, y hierro este último principalmente hallado en concentraciones elevadas de 489 ppm (2, 7).

**Coloides y gomas.-** Están formados por pectinas, proteínas, azúcares, tierra y materiales en suspensión y dispersiones moleculares con alto grado de hidratación (4). Los coloides también tienen en su composición, grasas, ceras y materiales diversos proveniente de todo el proceso de fabricación. La concentración de los coloides y gomas son alrededor del 8 y 3 % respectivamente (2).

**TABLA 1**  
**COMPOSICIÓN QUÍMICA MEDIA APROXIMADA DE**  
**LAS MELAZAS DE CAÑA DE AZÚCAR (2,4).**

COMPONENTES	LÍMITES DE PORCENTAJES
Agua	20 – 25 %
Total de sólidos	75 – 80
Azúcares:	
Sacarosa	30 – 40
Glucosa	10 – 15
Fructosa	16
Sustancias nitrogenadas	0.4 – 2
Acidos Totales	0.5
Lípidos	0.5
Cenizas	12 – 15
Coloides y gomas	10 - 11
Vitaminas	Variables

### 1.1.2. Propiedades Químico-Físicas

El conocimiento de las propiedades químico-físicas de las mieles finales depende de su composición y tienen gran importancia desde el punto de vista de su

calidad y comportamiento industrial durante el transporte, almacenamiento y bombeo (2). Generalmente a las mieles se les valora propiedades físico-químicas principales como:

**Grados Brix.-** Los grados Brix ( $^{\circ}$ Brix) expresan el porcentaje de sólidos solubles en agua (10, 13), conformados en su mayor parte por los azúcares (sacarosa, glucosa y fructosa), ácidos totales y fracciones moleculares de otros compuestos solubles en agua (4).

**Pol.-** La determinación de la polarización en las mieles, nos permite determinar el porcentaje total de sacarosa presente como parte de los sólidos solubles; siendo los azúcares ópticamente activos, tienen la propiedad de girar el plano de la luz polarizada, cuyo ángulo de rotación varía según el tipo de azúcar y su concentración (13).

**Pureza.-** La pureza es la relación porcentual entre el porcentaje de sacarosa (% pol) y los sólidos solubles

(° Brix), generalmente varían entre el 30 y 40 %, cuando el porcentaje está por debajo de 30 %, indica un agotamiento o extracción de azúcar eficiente del jugo de caña durante su procesamiento (4).

**Expansión de las mieles.-** El coeficiente de expansión de las mieles, produce un cambio relativo de volumen por cada grado de aumento de temperatura (2), cuyas magnitudes se exponen en la tabla 2.

**Viscosidad.-** Es una propiedad física que va a depender específicamente de la composición química de las mieles, reviste mucha importancia durante el bombeo pues se ha hallado que la fricción en las tuberías aumenta aproximadamente en proporción directa con la viscosidad. La unidad de viscosidad en las mieles es el poise y centipoise, que es la fuerza de 1 dina para determinar un desplazamiento relativo a la velocidad de 1 cm por segundo de las superficies líquidas; También se utiliza el pascal por segundo, que se define como la fuerza requerida de un newton para

determinar un desplazamiento de un metro por segundo de los fluidos (2).

**Relación entre °Brix y viscosidad.-** No existe relación alguna entre el Brix de dos mieles diferentes y sus viscosidades; se ha encontrado que algunas mieles con un Brix mas bajo puede tener una viscosidad mas alta que la de otra miel de mayor Brix (2). La amplia variación entre las viscosidades de diferentes mieles del mismo grado procedentes de distintos ingenios y de mieles de grado diferente provenientes tanto del mismo como de diferentes ingenios resulta fácil de comprender debido a los diferentes constituyentes no azúcares (sustancias nitrogenadas, cenizas, etc.) de cada miel individual (4).

**TABLA 2**  
**PRINCIPALES PROPIEDADES QUÍMICO - FÍSICAS DE**  
**LAS MELAZAS DE CAÑA DE AZÚCAR ( 2, 4)**

PROPIEDADES QUÍMICO - FÍSICAS	LÍMITES PORCENTUALES
° Brix	75 - 85 % (Sólidos solubles)
Pol	30 - 40 % (Sacarosa)
Pureza	25 - 40 %
Expansión	1 - 4 ml/100 ml miel → 30 - 60 °C 8 - 10 ml/100 ml miel → 70 °C 14 - 44 ml → 80 - 90 °C
Viscosidad	Cantidades variables *(P, cP, Pa.s)

\* P: Poise; cP: centipoise; Pa.s. Pascal por segundo.

### 1.2. Influencia de los Componentes de la Melaza Sobre su viscosidad

Se ha determinado que ciertos componentes propios de la melaza influyen notablemente en la viscosidad de las mismas. Biart Y Serrano (2) en un estudio de las mieles finales de caña de

azúcar sobre sus derivados, demostraron las variaciones de la viscosidad en función, principalmente de:

- **°Brix.-** Las viscosidades de las melazas aumentan con el aumento de °Brix. Sin embargo se ha encontrado que melazas de igual °Brix o densidades, presentaban viscosidades completamente diferentes. Se atribuye éstas diferencias a que los °Brix expresan sólidos solubles compuestos por cantidades variables de azúcares, ácidos y fracciones moleculares de otros compuestos parcialmente solubles en agua que se forman durante el procesamiento y provenientes de materias primas diferentes, dicha variación en las magnitudes de sus componentes influyen por separado sobre la viscosidad de las mieles (2, 4).
- **Sustancias coloidales:** cuando éstas aumentan, aumenta la viscosidad (2).
- **Compuestos nitrogenados:** aun en pequeñas cantidades aumentan notablemente la viscosidad de las mieles (2).
- **Gomas:** Cuando su concentración aumenta se incrementa significativamente la viscosidad; cuya acumulación, durante

el proceso de fabricación de azúcar produce el aglutinamiento y gelificación de las mieles durante su transportación, reduciendo su calidad para la producción de alcohol (2, 7).

- **Ciertas sales inorgánicas que componen las cenizas.-** Hacen aumentar o disminuir la viscosidad de las mieles finales, las sales de calcio generan un aumento, las de potasio y sodio la disminuyen (2, 6).
- **Relación azúcares reductores/cenizas sobre la viscosidad.-** La mayoría de las sales inorgánicas (cenizas) aumentan la solubilidad de la sacarosa y los azúcares reductores la disminuyen, es decir que se ha encontrado una interrelación entre las viscosidad de las mieles y la relación reductores/cenizas que afecta a la concentración de sólidos totales (2).

### 1.3. Efecto de la Temperatura sobre la Viscosidad

Es bien conocido que el aumento de la temperatura disminuye la viscosidad de los fluidos, pero la magnitud de este efecto en las mieles es mucho mayor de lo que

generalmente se supone, se han realizado numerosos ensayos en Colombia y Cuba en donde se ha determinado el cambio de la viscosidad de las mieles con el cambio de temperatura y a concentraciones diferentes (2,4).

Estos ensayos han generado gráficas y tablas concernientes a la relación entre ° Brix ó purezas y viscosidad; temperaturas y viscosidad de muestras particulares de mieles de caña.

#### **1.4. Efecto de la Viscosidad sobre el Bombeo**

Se conoce que la fricción de una tubería aumenta proporcionalmente con la viscosidad. Por consiguiente es preciso conocer la viscosidad de la miel a la mínima temperatura a la que se va a bombear. Shaw suministra una gráfica muy extensa por medio de la cual es posible calcular la fricción de una tubería, dadas las dimensiones de la misma, los galones por minuto que se va a bombear, densidad relativa y la viscosidad en función de la temperatura, antes de llegar a

cualquier conclusión sobre presión y capacidad de la bomba  
(4).

## 1.5. Propiedades Reológicas

Desde el punto de vista reológico las mieles finales se pueden considerar como un fluido no newtoniano, que siguen el modelo de Ostwald de Waele, el cual se conoce también como Ley de Potencia (11).

### 1.5.1. Ley de Potencia

$$\tau = \kappa (\dot{\gamma})^n$$

$\tau$  = Esfuerzo de corte o cizalla

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de deformación o corte de cizalla

$(n)$ : Índice de flujo (medida del grado del comportamiento no newtoniano)

$(n)$ : < 1 el flujo es seudoplástico

$(n)$ : > 1 el flujo es dilatante

$(n)$ : = 1 el fluido es newtoniano

$(\kappa) = \mu$ : Índice de consistencia (medida del grado viscoso del material).

**Esfuerzo de Corte.-** Es la fuerza cortante o el esfuerzo de acizallamiento que se produce debido a las fuerzas de fricción internas ( $F$ ) que surgen entre capa y capa del fluido y que se oponen al deslizamiento relativo entre éstas, cuya magnitud dependen básicamente de la viscosidad del fluido. Las fuerzas de fricción actúan tangencialmente sobre la superficie de contacto entre capa y capa del fluido (11).

$$\tau = F / S$$

$\tau$  = Esfuerzo Cortante

$F$  = Fuerzas de fricción internas (actúan sobre capas del fluido)

$S$  = Area de la superficie de contacto entre capas.

**Velocidad de Corte ( $\delta v / \delta r$ ).**- Llamada también gradiente de velocidad de deformación o cizallamiento, es la variación de la velocidad entre capas adyacentes del fluido en movimiento (11), experimentalmente, está relacionada con el esfuerzo de corte mediante la ley de

Newton de la viscosidad, explicada anteriormente en el ANEXO A, de cuyo despeje se obtiene:

$$(-\delta v / \delta r) = \tau / \mu$$

$$(-\delta v / \delta r) =_{\text{en 1/s}}$$



### 1.5.2. Fluidos que Cumplen Ley de Potencia

Estos Fluidos son los no newtonianos independientes del tiempo, que se caracterizan porque las viscosidades son funciones de las velocidades de corte por lo tanto cambian con la variación del gradiente de velocidad aun manteniéndose constante la temperatura, la concentración y la presión; estos fluidos son:

**Fluidos Seudoplásticos.**- Son los que empiezan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que cero

(  $T > 0$  ), su viscosidad disminuye con el incremento del gradiente de velocidad de corte ( $dv/dr$ ), el inverso de la pendiente de la curva es la viscosidad aparente a infinitas velocidades de corte (11).

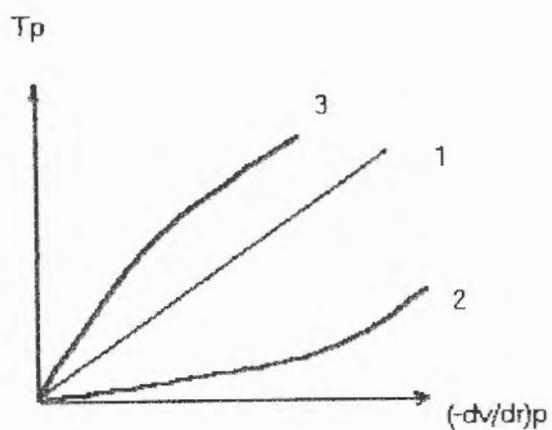
**Fluidos Dilatantes.-** Estos fluidos tienen un comportamiento contrario al comportamiento de los pseudoplásticos. La viscosidad aparente se incrementa con la velocidad de corte.

### 1.5.3. Curvas de Flujo

Las curvas de flujo nos permiten identificar el tipo de relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, de acuerdo a la ley de Newton, al representar en un gráfico la relación de  $T$  en función de  $(dv/dr)$  se obtiene una línea recta que pasa por el origen de coordenadas, cuya pendiente es la viscosidad.

Para los fluidos no Newtonianos, la relación de  $T$  en función de  $(dv/dr)$  presenta carácter no lineal, la curva de flujo de las sustancias pseudoplásticas y dilatantes pasan por el origen de coordenadas. Las curvas de flujo de fluidos no newtonianos se obtienen experimentalmente en viscosímetros que permiten determinar valores de  $T_p$  y  $(dv/dr)_p$ , cuyo subíndice  $(p)$  se refiere a la pared del

elemento móvil del viscosímetro (11). En la figura 2.1., se representan las curvas típicas de los fluidos de nuestro interés.



**FIGURA 1.1 CURVAS DE FLUJO TÍPICAS: 1.- Fluido Newtoniano; 2.- Dilatantes; 3.- Seudoplásticos (11).**

## **CAPÍTULO 2**

### **1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

El procedimiento experimental, empieza con la planificación del muestreo de las melazas de caña del Ingenio Azucarero "La Troncal", ubicado en el Km 2 ½ vía Troncal-Naranjal. Las muestras fueron tomadas por cada lote de producción de azúcar de caña, realizado cada 12 horas, las cuales se trasladaron al laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil donde se procedió a ejecutar el proyecto. A continuación se describen los pasos que se llevaron a cabo durante los ensayos en el laboratorio.

#### **2.1. Criterio Aplicado Para la Selección de Muestras**

El período de zafra ( tiempo que dura la cosecha de caña y la producción de azúcar), se inició a mediados del mes de Junio del 2001 y finalizó el 9 de Enero del 2002, la producción de

melaza empezó aproximadamente una semana después de iniciada la Zafra.

Para el presente estudio, la recolección de muestras se realizó en un período de 6 semanas a partir de la segunda semana del procesamiento de la caña de azúcar, por cada semana se tomaron 5 muestras hasta completar un número de 30. La siguiente tabla muestra el cronograma mencionado, donde (S) es la semana del mes correspondiente.

**TABLA 3**  
**CRONOGRAMA DE TOMA DE MUESTRAS DE MELAZAS DE**  
**CAÑA DE AZÚCAR.**

Período Parcial De Zafra (2001)	JUNIO				JULIO				AGOSTO			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
°N de Muestras Tomadas				5	5	5	5	5	5			Total 30

(S), SEMANAS.

Basados en la pureza se seleccionaron 15 muestras de 30 recolectadas. La pureza se determinó relacionando porcentualmente la polarización (% total de sacarosa) sobre los grados Brix (sólidos solubles) presentes en las muestras. Las

15 muestras seleccionadas presentan variaciones entre 0.12 y 1.61 % de pureza. La tabla 4 contiene las muestras seleccionadas (X) con sus valores de purezas, y sus respectivos °Brix y % de polarización. Las muestras recolectadas están ordenadas en forma ascendente en función de sus purezas.

**TABLA 4**  
**SELECCIÓN DE MUESTRAS EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE PUREZA**

<b>% PUREZAS</b>	<b>° Brix</b>	<b>POL</b>
1.- 32.22 (X)	84.40	27.19
2.- 32.62	84.30	27.50
3.- 33.18	86.00	28.54
4.- 33.41 (X)	79.80	26.66
5.- 33.42	79.90	26.70
6.- 33.51	85.20	28.55
7.- 33.53 (X)	88.20	29.57
8.- 35.40 (X)	83.00	29.38
9.- 35.80 (X)	84.90	30.39
10.- 35.83	85.50	30.64
11.- 36.13 (X)	85.50	30.89
12.- 36.54	84.50	30.88
13.- 36.55	84.40	30.84
14.- 36.66	85.70	31.42
15.- 36.73	77.40	28.43
16.- 36.89 (X)	85.30	31.47
17.- 36.90	85.50	31.54
18.- 36.97	85.40	31.57
19.- 38.50 (X)	84.90	32.69
20.- 38.61	88.70	34.25
21.- 38.86 (X)	85.70	33.31
22.- 38.88	86.00	33.43
23.- 39.36 (X)	77.20	30.38
24.- 39.89 (X)	87.90	35.07
25.- 40.11 (X)	83.20	33.37
26.- 40.44	84.70	34.25
27.- 40.75(X)	83.00	33.82
28.- 40.78	87.00	35.48
29.- 40.97 (X)	84.30	34.54
30.- 41.78 (X)	85.00	35.51

(X), MUESTRAS SELECCIONADAS DE MELAZAS DE CAÑA DE AZÚCAR

Las 15 muestras seleccionadas, fueron sometidas a las pruebas experimentales, cada una a temperaturas de ambiente 25 °C (temperatura de referencia) y temperaturas de bombeo

de 45, 55, y 65 °C. Es decir que se realizaron 60 ensayos en el laboratorio.

## **2.2. Equipo Utilizado**

Para la caracterización reológica de la melaza se utilizó un viscosímetro rotacional denominado Rheotest, cuyas características funcionales y especificaciones son las siguientes.

### **2.2.1. Rheotest y sus Componentes**

Conformado por un sistema de medición de cilindros (N, S1, S2, S3, H) y un dispositivo de lectura; en el cual la sustancia ensayada se encuentra durante la medición en la hendidura anular entre un cilindro interior rotatorio (rotor) y el cilindro exterior que forma el recipiente de medición. Este se rellena de la sustancia ensayada, la misma que está encerrada en un recipiente de templear que sirve para ajustar la temperatura mediante un termóstato. Este viscosímetro permite calcular el esfuerzo cortante que produce el rotor, y la viscosidad de las sustancias ensayadas (14).

La velocidad angular de los cilindros de medición se puede ajustar en 24 escalonamientos, bajo un sistema de engranaje de cambio de 12 escalonamientos. A cada escalonamiento le corresponde un valor determinado de velocidad de corte o angular, ya establecido y expuesto en el manual del Rheotest (ANEXO B). La curva de fluencia, se puede trazar en una amplia gama de tensión tangencial y de gradientes de cizallamiento, sin intercambiar los dispositivos de medición.

Los dispositivos de medición, constituyen los cilindros que son: cilindro N para viscosidades bajas; cilindros S (S1, S2, S3), para viscosidades medianas; y cilindro H para viscosidades altas, estos cilindros de medición permiten ajustar la temperatura mediante un recipiente de templar que los encierra (14). La siguiente tabla expone las especificaciones con las que cuenta el Rheotest.



**TABLA 5**  
**ESPECIFICACIONES DEL RHEOTEST**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DIMENSIONES</b>
Alcance de viscosidad	1 a 4. 10 <sup>6</sup> mPa.s (cP)
Tolerancia del instrumento	±3 a ±4 %, según el dispositivo de medición (líquidos newtonianos)
Tolerancia de medición	Máximo ± 1 % del valor final de la escala.
Alcance de tensión tangencial	1.6 a 2.10 <sup>5</sup> Pa (16 a 2.10 <sup>6</sup> dyn/cm <sup>2</sup> )
Alcance del gradiente de acizallamiento	0.2 a 4860 s <sup>-1</sup>
Gama de régimen	5/18 a 243 r.p.m. en 24 escalonamientos
Momento de torsión máximo	Alcance I: 100 p.cm Alcance II: 1000 p.cm
Alcance de temperatura	-60 a + 300 °C (+ 150 a + 300 °C con cámara de protección)
Cantidad necesaria de sustancia	0.1 a 50 ml, según el dispositivo de medición.

Fuente: Manual del Viscosímetro Rheotest, VEB MLW, Prüfgerate-Werk Medingen, Sitz Freital (14).

### 2.2.2. Determinación de Variables Reológicas con Rheotest

Las variables experimentales que corresponden al esfuerzo cortante, velocidad de corte y viscosidad aparente usando el Rheotest, se calcula de la siguiente manera:

### Determinación del Esfuerzo de Corte ( $\tau$ ) ó T.-

Experimentalmente mediante el manual del viscosímetro rotacional, ( $\tau$ ), está determinado por el valor leído de la escala del dispositivo de medición del Rheotest, dado en ( $\alpha$ ) y multiplicado por el valor de la constante ( $Z$ ) como se indica:

$$\tau = T = (\alpha)(Z)$$

Siendo:

$$\tau = T = \text{Dyn/cm}^2$$

( $\alpha$ )= Lectura del valor de la escala del instrumento de medición (skt)

( $Z$ )= Constante del cilindro de medición, ( $\text{Dyn/cm}^2 \cdot \text{Skt}$ )

La constante Z, depende del tipo de cilindro y estos a su vez dependen del alcance de tensión tangencial I y II como se indica en la Tabla 6.

**TABLA 6**  
**VALORES DE LA CONSTANTE (Z) EN FUNCIÓN DEL**  
**MOMENTO DE TORSIÓN MÁXIMO Y DE LOS CILINDROS**  
**DE MEDICIÓN DEL RHEOTEST**

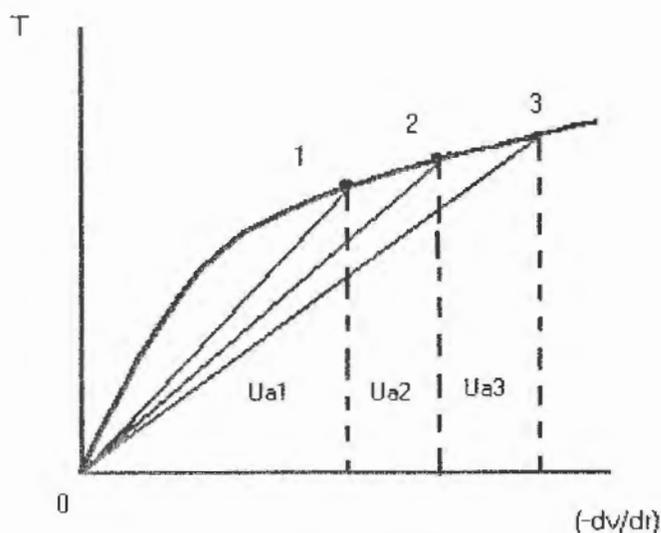
TIPO DE CILINDRO	ANCANCE I 100 p.cm	ALCANCE II 1000 p.cm
	Z (Dyn/cm <sup>2</sup> .Skt)	Z (Dyn/cm <sup>2</sup> .Skt)
N	3.11	31.2
S1	5.63	57.1
S2	5.93	58.8
S3	7.39	73.8
H	26.8	263.9

**Fuente: Manual del Viscosímetro Rheotest, VEB MLW,  
 Prüfgerate-Werk Medingen, Sitz Freital (14).**

#### **Determinación de la Velocidad de Corte ( $\delta v / \delta r$ ) ó**

Dr.- Los gradientes de la velocidad de corte se encuentran establecidos en la tabla de escalonamientos del manual del Rheotest y viene especificado para cada tipo de cilindro y frecuencia de la red eléctrica. En este caso se utilizó la tabla correspondiente a 60 Herzt, ver (ANEXO B).

**Viscosidad Aparente ( $\mu_a$ ) ó U.-** Para Determinar la viscosidad aparente de los fluidos no newtonianos, se utiliza la definición de viscosidad dinámica de la ley de Newton, en este caso la viscosidad se determina en cada punto de la curva de flujo usando los valores de  $(\tau_p)$  y  $(\delta v / \delta r)_p$  correspondientes al punto en cuestión como expone el ejemplo de la figura 2.1, el subíndice p indica que  $(\tau)$  y  $(\delta v / \delta r)$  son evaluados en una superficie sólida característica del viscosímetro empleado (11).



**FIGURA 2.1 DETERMINACIÓN DE VISCOSIDADES APARENTES DE FLUIDOS SEUDOPLÁSTICOS (11).**

**Determinación de Viscosidad Aparente.-** Se la obtiene experimentalmente mediante la relación entre el esfuerzo de corte entre el gradiente de velocidad de corte; en la descripción de las curvas de flujo típicas ya se ha mencionado las características decrecientes y crecientes de las mismas con el incremento de la velocidad de corte para fluidos seudoplásticos y dilatantes respectivamente.

$$(\mu_a) = \tau \cdot 100 / (\delta v / \delta r)$$

$$(\mu_a) = g/cm.s$$

### 2.2.3. Preparación y Manejo del Equipo

Las 15 muestras escogidas (tabla 4), fueron evaluadas en los ensayos que se realizaron a temperaturas de 25, 45, 55 y 65 °C, llevados a cabo en varias semanas, mediante los siguientes pasos.

- 1.- La calibración del equipo se efectúa mediante la verificación del punto cero mecánico y electrónicamente del dispositivo de medición del Rheotest .
- 2.- Se llena el recipiente de medición con la muestra, cuyo volumen va a depender del tipo de cilindro que se

seleccione según el grado viscoso de las muestras a ensayarse.

3.- Se fija la temperatura requerida en el termostato de circulación de líquidos, una vez alcanzada dicha temperatura puede iniciarse las mediciones.

4.- Las mediciones o lecturas alfa ( $\alpha$ ) del dispositivo de medición, se realizan a valores bajos de velocidad de corte.

5.- Se procede aumentar progresivamente la velocidad de corte, valiéndose del engranaje de cambio que tiene 12 escalonamientos o velocidades y cambiando el régimen del motor, de la posición (A) de 1500 rpm a la posición (B) de 750 rpm, tomando las lecturas en el orden respectivo.

6.- Con los datos obtenidos se procede a calcular las variables: esfuerzos de corte (T), velocidad de corte (Dr) y viscosidad aparente (U), así como graficar curvas de

flujo y la posterior aplicación de la Ley de Potencia, para determinar los parámetros reológicos de  $n$  y  $K$ .

### 2.3. Cálculo de Variables y Aplicación de Curvas de Flujo a Temperaturas de 25, 45, 55 y 65 °C.

Los datos de velocidad de corte  $\delta v / \delta r$  ( $D_r$  ó  $dv/dr$ ), valores de la constante  $Z$ , lecturas tomadas en el Rheotest (alfas,  $\alpha$ ), y los valores calculados de esfuerzos de corte  $\tau$  (T) con sus respectivos errores experimentales y viscosidades aparentes  $\mu_a$  (U) de la muestras consideradas, cuyos ensayos se realizó a 25, 45, 55 y 65°C; así como sus respectivas curvas de flujo T vs.  $D_r$ , se encuentran en las tablas y gráficos de los ANEXOS E, F, G Y H del reporte interno relacionado con la presente tesis; sin embargo como ejemplo representativo sólo se exponen las tablas y gráficos correspondientes a la muestra N°1 ensayadas a las temperaturas señaladas anteriormente, cuyos cálculos se realizaron como indica el numeral 2.2.2 (determinación de variables reológicas con el Rheotest). Los cálculos que se desarrollaron en este capítulo fueron realizados usando el programa EXCEL, Windows 2000.

TABLA 7

LECTURAS TOMADAS Y VARIABLES CALCULADAS A  
25°C DE MUESTRA (1) 32.22 % DE PUREZA.

Dr	Z	ALFA 1	ALFA 2	T $\pm$ 3.7	U = T/Dr*100
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> .s <sup>kt</sup> )	(s <sup>kt</sup> )	(s <sup>kt</sup> )	( g/cm .s <sup>2</sup> )	(cP)
0.20	7.39	5.0	4.0	37.0	18475.0
0.36	7.39	13.0	14.0	96.1	26686.1
0.40	7.39	20.0	16.0	147.8	36950.0
0.60	7.39	24.5	24.0	181.1	30175.8
0.72	7.39	35.0	30.0	258.7	35923.6
1.08	7.39	46.0	45.0	339.9	31475.9
1.20	7.39	55.0	51.0	406.5	33870.8
1.80	7.39	74.0	74.0	546.9	30381.1
2.16	7.39	91.5	89.0	676.2	31304.9

Elaborado por Mónica Béhar C

La tabla 7 expone valores relacionados con:

Dr ó  $\delta u / \delta r$  : Velocidades de corte en función del cilindro seleccionado y del régimen del motor, posición A (1500 rpm) o posición B (750 rpm) y de sus respectivos escalonamientos de velocidades.

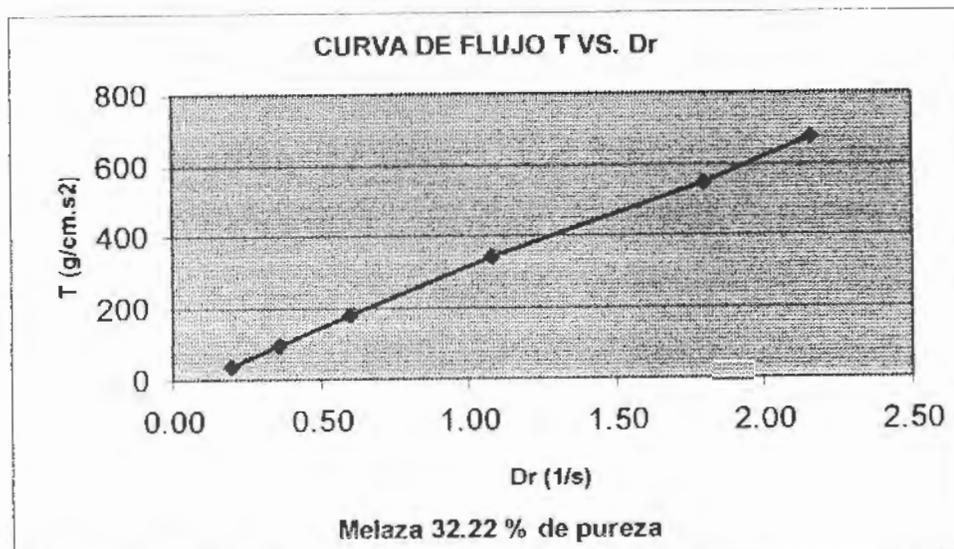
Z: Constante dada por el tipo de cilindro seleccionado

ALFA 1 y 2 ó ( $\alpha$ ): Lecturas tomadas con el Rheotest con dos muestras diferentes del mismo grado de pureza.

T ó ( $\tau$ ): Esfuerzo de corte calculado en función de los valores alfas 1 y 2, y su respectivo error experimental, un delta T =  $\pm$  3.7

U ó ( $\mu_a$ ) : Viscosidad aparente en función de T calculado.

GRÁFICO 2.1 CURVA DE FLUJO T vs. Dr (dv/dr) A 25 °C, DE MUESTRA (1)



Elaborado por Mónica Béhar C.

La curva de flujo (gráfico 2.1), presenta el esfuerzo de corte ( $T$ ) en función de la velocidad de corte ( $Dr$ ), esto permite caracterizar el tipo de fluido sugiriendo en este caso, que la muestra 1 puede ser un fluido seudoplástico o dilatante a 25 °C, por lo tanto se utilizó el modelo de la ley de potencia para determinar el valor de ( $n$ ) y ( $K$ ) e identificar su verdadero comportamiento reológico.

TABLA 8

LECTURAS TOMADAS Y VARIABLES CALCULADAS A 45°C, DE MUESTRA (1) 32.22 % DE PUREZA.

Dr	Z	ALFA 1	ALFA 2	T + - 3.7	U = T/Dr*100
(1/s)	(dyn/cm2.skt)	(skt)	(skt)	( g/cm s2)	(cP)
0.20	7.39	4.5°	5.00	35.10	17551.3
0.36	7.39	8.00	8.00	59.12	16422.2
0.40	7.39	9.50	10.00	72.05	18013.1
0.60	7.39	13.00	14.00	99.77	16627.5
0.72	7.39	17.50	18.00	131.17	18218.4
1.08	7.39	21.50	23.00	164.43	15224.8
1.20	7.39	23.00	24.00	173.67	14472.1
1.80	7.39	34.00	32.00	243.87	13548.3
3.60	7.39	64.00	62.50	467.42	12983.8
5.40	7.39	88.00	85.00	639.24	11837.7
6.48	7.39	100.0	100.0	739.00	11404.3

Elaborado por Mónica Béhar C

**Dr:** Velocidad de corte

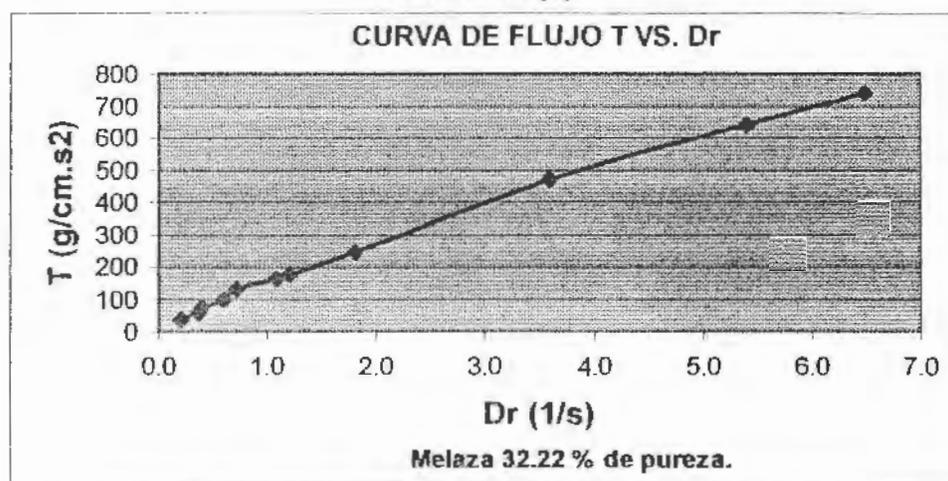
**Z:** Constante en función del cilindro utilizado.

**Alfas 1 y 2:** Lecturas tomas con dos muestras diferentes del mismo grado de pureza

**T:** Esfuerzo cortante, calculados promediando los valores de alfa 1 y 2, y su respectivo error experimental, un delta T = +- 3,7.

**U:** Viscosidad aparente.

GRÁFICO 2.2 CURVA DE FLUJO T vs. Dr (du/dr) A 45°C, DE MUESTRA (1)



Elaborado por Mónica Béhar C

TABLA 9

LECTURAS TOMADAS Y VARIABLES CALCULADAS A 55 °C, DE MUESTRA (1) 32.22 % DE PUREZA.

Dr (1/s)	Z (dyn/cm2.skt)	ALFA 1 (skt)	ALFA 2 (skt)	T +- 38.9 ( g/cm .s2)	U = T/Dr*100 (cP)
10.8	73.80	5.0	5.0	369.00	3416.67
19.44	73.80	9.0	9.0	664.20	3416.67
32.4	73.80	14.0	13.5	1014.75	3131.94
58.3	73.80	17.5	18.0	1309.95	2246.91
97.2	73.80	32.0	32.0	2361.60	2429.63
175.0	73.80	58.0	58.0	4280.40	2445.94

Elaborado por Mónica Béhar

Dr: Velocidad de corte

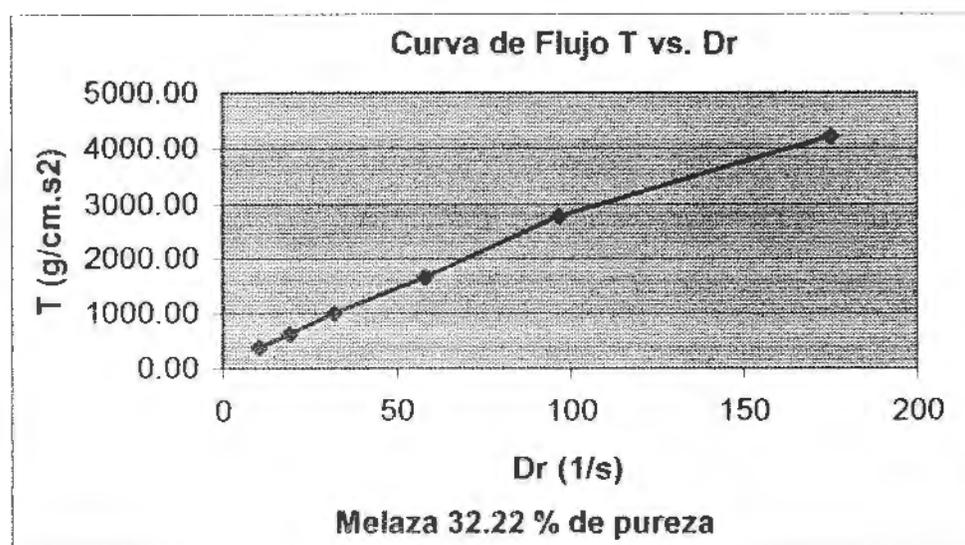
Z: Constante en función del cilindro utilizado.

Alfas 1 y 2: Lecturas tomas con dos muestras diferentes del mismo grado de pureza

T: Esfuerzo cortante, calculados promediando los valores de alfa 1 y 2, y su respectivo error experimental, un delta T= $\pm$ 36.9

U: Viscosidad aparente

GRÁFICO 2.3 CURVA DE FLUJO T vs. Dr (du/dr) A 55 °C, DE MUESTRA (1)



Elaborado por Mónica Béhar C.

TABLA 10

LECTURAS TOMADAS Y VARIABLES CALCULADAS A 65°C, DE MUESTRA (1) 32.22 % DE PUREZA.

Dr	Z	ALFA 1	ALFA 2	T ± 36.9	U = T/Dr <sup>100</sup>
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> .skt)	(skt)	(skt)	(g/cm .s <sup>2</sup> )	(cP)
29.16	73.8	1.0	0.50	55.4	189.8
32.40	73.8	1.5	1.00	92.3	284.7
48.60	73.8	3.0	3.00	221.4	455.6
58.30	73.8	5.0	5.00	369.0	632.9
87.50	73.8	12.0	10.00	811.8	927.8
97.20	73.8	15.0	14.00	1070.1	1100.9
175.00	73.8	54.0	52.00	3911.4	2235.1

Elaborado por Mónica Béhar C.

**Dr:** Velocidad de corte

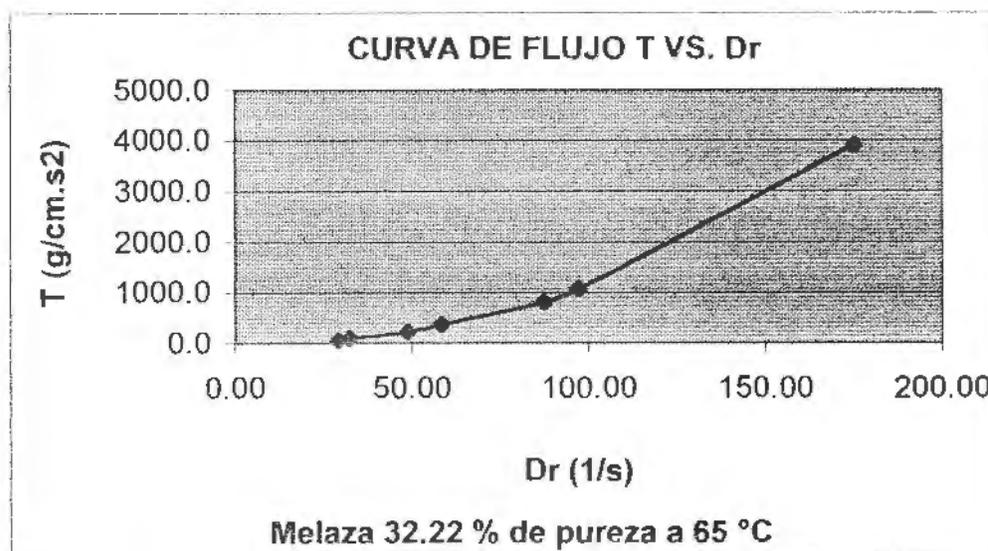
**Z:** Constante en función del cilindro utilizado.

**Alfas 1 y 2:** Lecturas tomadas con el Rheotest, con dos muestras diferentes del mismo grado de pureza

**T:** Esfuerzo cortante, calculados promediando los valores de alfa 1 y 2, y su respectivo error experimental, un delta T=±36.9

**U:** Viscosidad aparente

GRÁFICO 2.4 CURVA DE FLUJO T vs. Dr (dv/dr) A 65 °C, DE MUESTRA (1)



Elaborado por Mónica Béhar C.

Las tablas y curvas de flujo a 45, 55 y 65 °C correspondientes a la muestra 1, siguen una misma explicación que la mencionada a 25 °C, las cuales sugieren la aplicación de la ley de potencia para determinar su real comportamiento reológico (seudoplástico o dilatante).

Los errores experimentales de los esfuerzos de corte calculados (T prácticos) se obtuvieron mediante la fórmula:  $T=Z(\alpha)$ , dada por el manual del equipo utilizado ( Rheotest).

**Donde:**

$T$  = Esfuerzo de corte experimental o práctico

$Z$  = Valor constante dependiente del cilindro utilizado en las mediciones.

$(\alpha)$  = **Alfas** = Unidades de las lecturas ó mediciones realizadas en el Rheotest.

**Sí:**

$$T = Z(\alpha)$$

**Derivando  $T$**

$$dT = d\langle Z(\alpha) \rangle$$

$$dT = Zd\alpha + \alpha dZ$$

como:

$$Z = \text{constante}$$

$$dZ = 0$$

$$dT = Zd\alpha$$

$$d\alpha = 0.5$$

$d\alpha$  = mínima división de la escala del dispositivo de lectura, donde se observan las mediciones o lecturas del Rheotest.

#### 2.4. Aplicación de Ley de Potencia

De la aplicación de la Ley de Potencia  $\tau = \kappa(\delta v / \delta r)^n$ , a través de regresión lineal  $Ln \tau = Ln \kappa + n Ln(\delta v / \delta r)$ , a las variables calculadas de esfuerzo cortante ( $\tau$ ) ó  $T$  y velocidad

de corte ( $\delta v / \delta r$ ) ó Dr, se determinó los parámetros reológicos: índices de consistencia (K) e índices de comportamiento de flujo (n) para cada muestra seleccionada a las diferentes temperaturas de ensayo, cuyos gráficos y tablas de datos correspondientes a las muestras (2, 3,...15) se encuentran expuestos en los ANEXOS E, F, G, y H del reporte interno relacionado con la presente tesis. En las tablas 11, 12, 13 y 14 y los gráficos 2.5; 2.6; 2.7 y 2.8 se exponen la aplicación de la ley de Potencia de la muestra N° 1 a temperaturas de ensayo.

**TABLA 11**

**APLICACIÓN DE LOGARITMOS NEPERIANOS A LAS VARIABLES  $D_r$  y  $T$  a 25°C DE MUESTRA (1), A TRAVÉS DE REGRESIÓN LINEAL, PARA DETERMINAR PARÁMETROS REOLÓGICOS DE  $K$  y  $n$  CORRESPONDIENTES A LA ECUACIÓN DE POTENCIA.**

$D_r$ (1/s)	$T$ (g/cm .s <sup>2</sup> )	$\ln D_r$	$\ln T$	$T = K(D_r)^n$ $\ln T = \ln K + n \ln D_r$	$N$
0.20	37.0	-1.61	3.61	$Y = 1.1834x + 5.6742$ $R^2 = 0.9894$	1.1834
0.36	96.1	-1.02	4.57		
0.60	181.1	-0.51	5.20		
1.08	339.9	0.08	5.83		
1.80	546.9	0.59	6.30		
2.16	676.2	0.77	6.52		
$\ln K$	$K$	$D_r$ (1/s)	$T = K(D_r)^n$ práctico	$T = K(D_r)^n$ teórico	% de Error
5.6742	291.3	0.20	37.0	43.4	14.7
		0.36	96.1	86.9	10.5
		0.60	181.1	159.1	13.8
		1.08	339.9	319.0	6.6
		1.80	546.9	583.9	6.3
		2.16	676.2	724.5	6.7
				Promedio→	9.8

Elaborado por Mónica Béhan

$D_r$   $D_r$ : Velocidad de corte

$T$ : Esfuerzo cortante

$\ln D_r$ : Logaritmo neperiano de la velocidad de corte

$\ln T$ : Logaritmo neperiano del esfuerzo cortante.

$T = K(D_r)^n$  : Ley de Potencia.



**$\ln T = \ln K(Dr)^n$**  : Aplicación de Logaritmos Neperianos a la ley de potencia.

**(n)**: Índice del comportamiento de flujo

**$\ln k$** : Logaritmo neperiano del índice de consistencia

**K**: Índice de consistencia

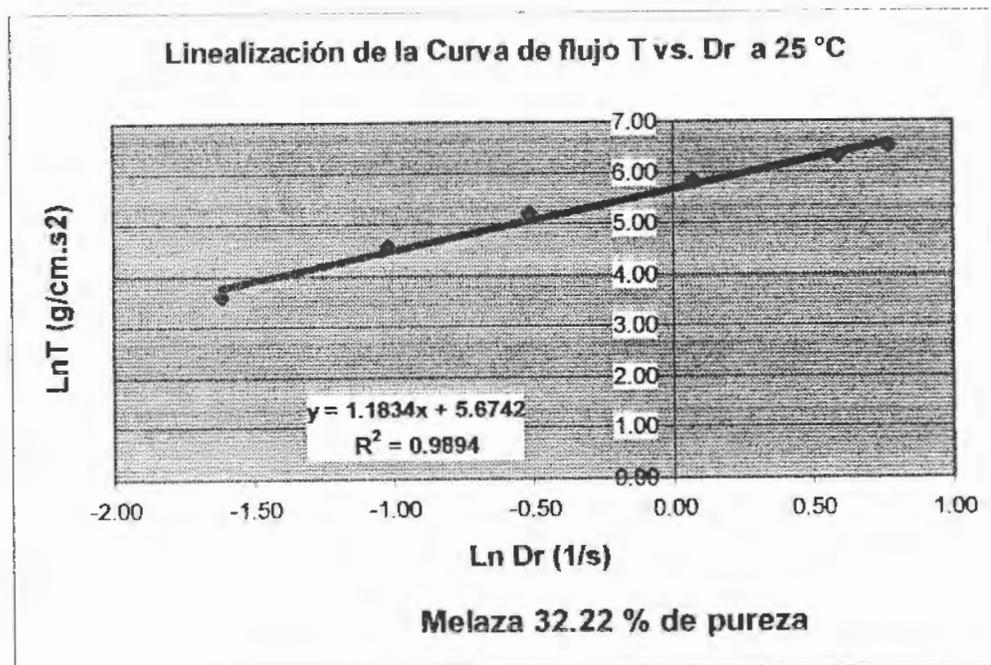
**T práctico**: Esfuerzo de corte calculado, mediante los ensayos experimentales.

**T teórico**: Calculado mediante la aplicación de la ley de potencia substituyendo los valores de n y k determinados por regresión lineal.

**% de Error**: Referente a T práctico con relación a T teórico.

La ley de Potencia ( $T = K(Dr)^n$ ), permite determinar valores de Indices de consistencia (K) e índices de comportamiento reológico (n), mediante la aplicación de regresión lineal convirtiendo a logaritmos neperianos los valores de T y Dr calculados en los ensayos experimentales, (Gráfico2.5).

GRÁFICO 2.5 LINEALIZACIÓN DE CURVA DE FLUJO DE LA MUESTRA (1) A 25 °C.



Elaborado por Mónica Béhar C.

El gráfico 2.5 muestra el modelo:  $Y = 1,1834x + 5.6742$ , cuya equivalencia con  $\ln T = n \ln Dr + \ln K$ , nos indica que  $n = 1.1834$  en este caso mayor que 1 corresponde al comportamiento de un fluido dilatante y que  $\ln 5.7503$  corresponde a  $\ln K$ , cuyo inverso en este caso  $e^{(5.7503)}$  es  $K = 291.3 \text{ g/cm.s}$ ; la tabla 11 también expone el promedio del porcentaje de error (9.8%) que presentan las variables de esfuerzos de corte (T) calculados con respecto a las (T) teóricas, valores que se obtuvieron a través de la aplicación de la ley de potencia que utiliza los valores de  $n$  y  $K$

correspondientes a la ecuación de linealización. Que a su vez son aplicadas a los valores de velocidades de corte ( $D_r$ ) establecidas por el cilindro (S3) utilizado en el ensayo, como lo muestra el ANEXO B.

TABLA 12

APLICACIÓN DE LOGARITMOS NEPERIANOS A LAS VARIABLES  $D_r$  y  $T$  CALCULADAS A 45 °C, DE MUESTRA (1), A TRAVÉS DE REGRESIÓN LINEAL, PARA DETERMINAR PARÁMETROS REOLÓGICOS DE  $K$  y  $n$  CORRESPONDIENTES A LA ECUACIÓN DE POTENCIA.

$D_r$ (1/s)	$T$ (1/s)	$\ln D_r$	$\ln T$	$T = K(D_r)^n$ $\ln T = \ln K + n \ln D_r$	$n$
0.20	35.10	-1.61	3.56	$y = 0,8903x + 5,0351$ $R^2 = 0,9577$	0.8903
0.36	59.12	-1.02	4.08		
0.40	72.05	-0.92	4.28		
0.60	99.77	-0.51	4.60		
0.72	131.17	-0.33	4.88		
1.08	164.43	0.08	5.10		
1.20	173.67	0.18	5.16		
1.80	243.87	0.59	5.50		
3.60	467.42	1.28	6.15		
5.40	639.24	1.69	6.46		
6.48	739.00	1.87	6.61		
$\ln K$	$K$	$D_r$ (1/s)	$T$ (1/s)	$T = K(D_r)^n$ teórico	% Error
5.0351	153.71	0.20	35.10	36.68	4.3
		0.36	59.12	61.90	4.5
		0.40	72.05	67.99	5.6
		0.60	99.77	97.54	2.2
		0.72	131.17	114.74	12.5
		1.08	164.43	154.62	0.1
		1.20	173.67	180.81	3.9
		1.80	243.87	259.41	6.0
		3.60	467.42	490.83	2.8
		5.40	639.24	669.87	7.3
		6.48	739.00	811.45	8.9
				Promedio →	5.3

Elaborado por Mónica Béhar C

$D_r$ : Velocidad de corte

$T$ : Esfuerzo cortante

**Ln Dr:** Logaritmo neperiano de la velocidad de corte

**Ln T:** Logaritmo neperiano del esfuerzo cortante.

**T = K(Dr)<sup>n</sup> :** Ley de Potencia.

**Ln T = LnK(Dr)<sup>n</sup> :** Aplicación de Logaritmos Neperianos a la ley de potencia.

**(n):** Índice del comportamiento de flujo

**Ln k:** Logaritmo neperiano del índice de consistencia

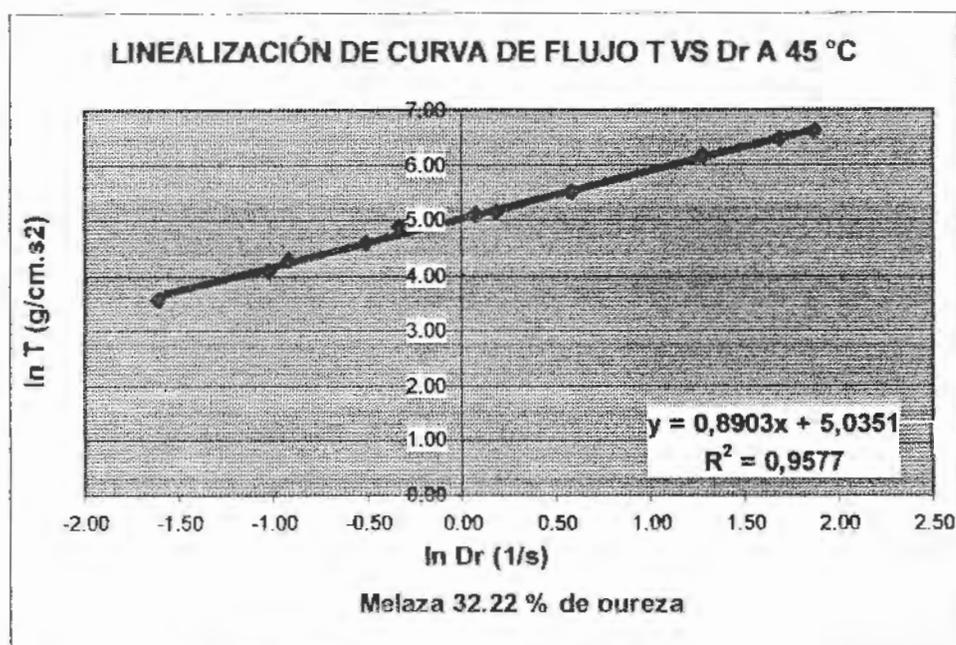
**K:** Índice de consistencia

**T práctico:** Esfuerzo de corte calculado, mediante los ensayos experimentales.

**T teórico:** Calculado mediante la aplicación de la ley de potencia substituyendo los valores de n y k determinados por regresión lineal.

**% de Error:** Referente a T práctico con relación a T teórico.

GRÁFICO 2.6 LINEALIZACIÓN DE CURVA DE FLUJO DE LA MUESTRA (1) A 45 °C.



Elaborado por Mónica Béhar

El gráfico 2.6 de linealización correspondiente a la muestra 1 a 45 °C, presenta el modelo  $y = 0.8903x + 5.0351$  ( $\ln T = n \cdot \ln Dr + \ln K$ ). Esto nos permite determinar valores de  $n$  y  $K$  como se expone en la tabla 11, donde  $n$  es 0.8903 menor que 1, correspondiente a un fluido seudoplástico y  $K$  es la base  $e = 2.718281$ , elevada a 5.0351 en este caso es 153.71 g/cm.s. Cuyo promedio del porcentaje de error de las  $T$  calculadas con relación a las  $T$  teóricas se encuentra en el 5.3%

TABLA 13

APLICACIÓN DE LOGARITMOS NEPERIANOS A LAS VARIABLES  $D_r$  y  $T$  CALCULADAS A 55 °C DE MUESTRA (1), A TRAVÉS DE REGRESIÓN LINEAL, PARA DETERMINAR PARÁMETROS REOLÓGICOS DE  $K$  y  $n$  CORRESPONDIENTES A LA ECUACIÓN DE POTENCIA.

$D_r$ (1/s)	$T$ (g/cm .s <sup>2</sup> )	$\ln D_r$	$\ln T$	$T = K(D_r)^n$ $\ln T = \ln K + n \ln D_r$	$N$
10.8	369.00	2.380	5.911	$y = 0.8434x + 3.9251$	0.8434
19.44	664.20	2.967	6.499	$R^2 = 0.9877$	
32.4	1014.75	3.478	6.922		
58.3	1309.95	4.066	7.178		
97.2	2361.60	4.577	7.767		
175.0	4280.40	5.165	8.362		
			<b>Práctico</b>	<b>Teórico</b>	<b>% de Error</b>
			$T$ (g/cm .s <sup>2</sup> )	$T = K(D_r)^n$ teórico	
			$D_r$ (1/s)		
			10.8	376.91	2.1
			19.44	618.78	6.8
			32.4	952.01	6.2
			58.3	1562.48	16.2
			97.2	2404.62	1.8
			175.0	3948.46	7.8
				Promedio →	6.8

Elaborado por Mónica Béhar C.

$D_r$ : Velocidad de corte

$T$ : Esfuerzo cortante

$\ln D_r$ : Logaritmo neperiano de la velocidad de corte

$\ln T$ : Logaritmo neperiano del esfuerzo cortante.

$T = K(D_r)^n$  : Ley de Potencia.

$\ln T = \ln K(Dr)^n$  : Aplicación de Logaritmos Neperianos a la ley de potencia.

(n): Índice del comportamiento de flujo

$\ln k$ : Logaritmo neperiano del índice de consistencia

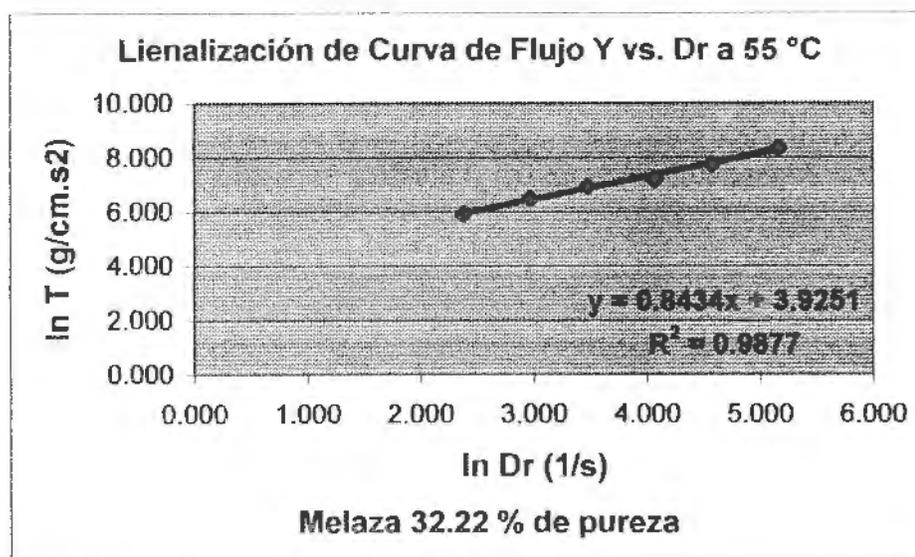
K: Índice de consistencia

T práctico: Esfuerzo de corte calculado, mediante los ensayos experimentales.

T teórico: Calculado mediante la aplicación de la ley de potencia substituyendo los valores de n y k determinados por regresión lineal.

% de Error: Referente a T práctico con relación a T teórico.

**GRÁFICO 2.7 LINEALIZACIÓN DE CURVA DE FLUJO DE LA MUESTRA (1) A 55 °C.**



Elaborado por Mónica Béhar C.

El gráfico 2.7 proporciona el modelo  $y = 0.8434x + 3.9251$ , cuya  $n$  es  $0.8434 < 1$ , indica comportamiento pseudoplástico de la melaza N°1 a 55 °C y su valor de  $K$  es 50.66 g/cm.s como lo expone la tabla 13, obteniéndose un promedio de 6.8 % de error relativo de las  $T$  calculadas con respecto a las  $T$  teóricas.

La aplicación de logaritmos neperianos (tabla 14) explica un contenido similar que las tablas Tablas 11, 12 y 13, indicando un comportamiento dilatante de la muestra 1 a 65 °C.

TABLA 14

APLICACIÓN DE LOGARITMOS NEPERIANOS A LAS VARIABLES  $D_r$  y  $T$  CALCULADAS A 65 °C DE LA MUESTRA (1), A TRAVÉS DE REGRESIÓN LINEAL, PARA DETERMINAR PARÁMETROS REOLÓGICOS DE  $K$  y  $n$  CORRESPONDIENTES A LA ECUACIÓN DE POTENCIA.

$D_r$ (1/s)	$T$ (g/cm .s <sup>2</sup> )	$\ln D_r$	$\ln T$	$T = K(D_r)^n$ $\ln T = \ln K + n \ln D_r$	$N$
29.16	55.4	3.373	4.014	$y = 2.3065x - 3.5891$	2.3065
32.40	92.3	3.478	4.525	$R^2 = 0.9955$	
48.60	221.4	3.884	5.400		
58.30	369.0	4.066	5.911		
87.50	811.8	4.472	6.699		
97.20	1070.1	4.577	6.976		
175.00	3911.4	5.165	8.272		
$\ln K$	$K$	$D_r$ (1/s)	$T$ (g/cm .s <sup>2</sup> )	$T = K(D_r)^n$ Teórico	% de Error
-3.5891	0.028	29.16	55.4	66.0	16.2
		32.40	92.3	84.2	8.7
		48.60	221.4	214.5	3.1
		58.30	369.0	326.4	11.5
		87.50	811.8	832.8	2.5
		97.20	1070.1	1061.3	0.8
		175.00	3911.4	4119.5	5.1
				PROMEDIO—>	6.8

Elaborado por Mónica Béhar C.

$D_r$ : Velocidad de corte

$T$ : Esfuerzo cortante

$\ln D_r$ : Logaritmo neperiano de la velocidad de corte

$\ln T$ : Logaritmo neperiano del esfuerzo cortante.

$T = K(D_r)^n$  : Ley de Potencia.

**$\ln T = \ln K(Dr)^n$**  : Aplicación de Logaritmos Neperianos a la ley de potencia.

**(n)**: Índice del comportamiento de flujo

**$\ln k$** : Logaritmo neperiano del índice de consistencia

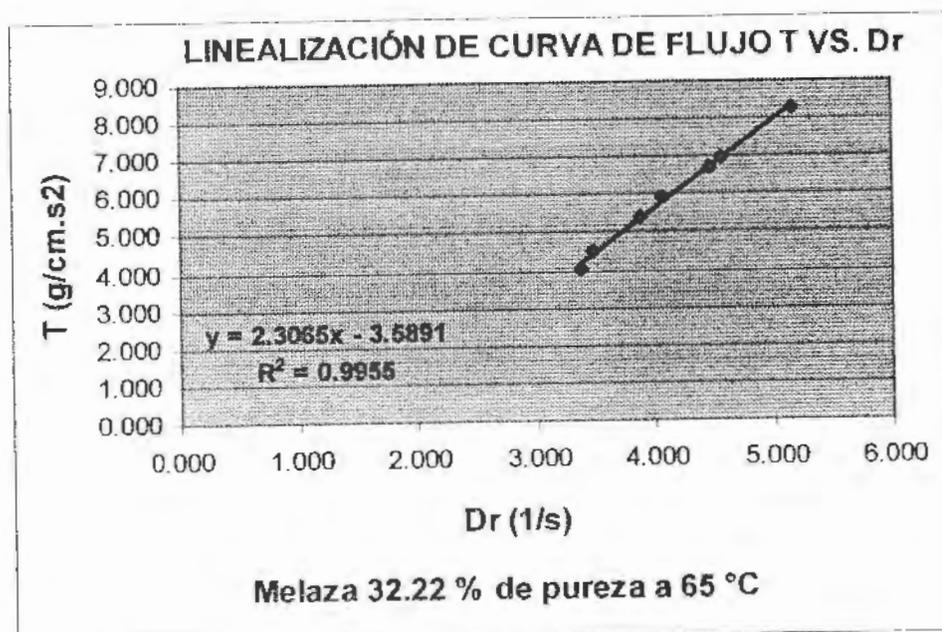
**K**: Índice de consistencia

**T práctico**: Esfuerzo de corte calculado, mediante los ensayos experimentales.

**T teórico**: Calculado mediante la aplicación de la ley de potencia substituyendo los valores de n y k determinados por regresión lineal.

**% de Error**: Referente a T práctico con relación a T teórico.

**GRÁFICO 2.8 LINEALIZACIÓN DE CURVA DE FLUJO DE LA MUESTRA (1) A 65 °C.**



Elaborado por Mónica Béhar C

La tabla 14 y el gráfico 2.8, indican el modelo potencial  $y = 2.3065x - 3.5891$ , el cual determina un valor de  $n > 1$  (2.3065), esto indica que la muestra 1 a 65 °C actúa como un fluido dilatante. Siendo  $K = 0.028$  g/cm.s y el promedio del porcentaje de error relativo de las T experimentales con relación a T teóricas es de 6.8 %.

## CAPÍTULO 3

### 2. RESULTADOS

Basados en el procedimiento experimental descrito en el capítulo 2, mediante la determinación de las variables reológicas con el Rheotest: Esfuerzos de corte ( $\tau$  ó T), velocidades de corte ( $\delta v / \delta r$  ó Dr) y sus respectivas curvas de flujo a temperaturas de ensayo 25, 45, 55 y 65 °C y adicionalmente, la aplicación de la ley de Potencia descrita en los anexos E, F, G y H, desarrollado en el reporte interno relacionado con la presente tesis, se obtuvieron los siguientes resultados.

#### 3.1. Parámetros Reológicos Obtenidos

La aplicación de la Ley de Potencia a las variables determinadas: T y Dr (anexos E, F, G, y H del reporte interno), a través de regresión lineal utilizando el programa EXCEL, WINDOWS 2000, permitió determinar los parámetros reológicos: índices de consistencia (K) e índices de comportamiento de

flujo (n) para las 15 muestras seleccionadas a temperaturas de ensayo ya mencionadas, cuyos resultados se resumen en las tablas 15, 16.

TABLA 15

INDICES DE CONSISTENCIA (K) CON 5 % DE ERROR EXPERIMENTAL, CALCULADOS A 25, 45, 55 Y 65 °C, A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE LA LEY DE POTENCIA A LAS VARIABLES DE T Y Dr A TRAVÉS DE REGRESIÓN LINEAL, (g/cm.s).

°N Muestra	%	% Brix	Pol	25°C		45°C		55 °C		65°C	
				K	Error Exp.	K	Error Exp.	K	Error Exp.	K	Error Exp.
1	32.22	84.40	27.19	291.30	14.57	153.71	7.69	50.66	2.54	0.028	0.001
2	33.41	79.80	26.66	237.98	11.90	77.39	3.87	0.91	0.05	0.019	0.002
3	33.53	88.20	29.57	324.24	17.11	255.78	12.79	25.73	0.13	0.725	0.037
4	35.40	83.00	29.38	420.02	21.00	221.92	11.10	15.06	0.08	0.217	0.022
5	35.80	84.90	30.39	300.76	15.04	34.46	1.73	9.03	0.45	0.023	0.001
6	36.13	85.50	30.89	355.28	17.77	70.90	3.55	9.33	0.10	1.492	0.015
7	36.89	85.30	31.47	162.21	8.11	82.08	4.10	0.64	0.07	0.011	0.001
8	38.50	84.90	32.69	107.98	5.40	103.03	5.15	1.45	0.15	0.115	0.012
9	38.86	85.70	33.31	557.74	27.89	414.30	20.72	1.50	0.15	1.211	0.012
10	39.36	77.20	30.38	57.33	2.87	9.59	0.48	0.26	0.03	0.00040	0.00002
11	39.89	87.90	35.07	475.90	23.80	312.37	15.62	3.02	0.15	1.005	0.010
12	40.11	83.20	33.37	172.52	8.63	158.10	7.91	2.91	0.29	1.418	0.014
13	40.75	83.00	33.82	164.37	8.22	16.79	0.84	0.99	0.05	0.117	0.006
14	40.97	84.30	34.54	893.73	44.69	198.62	9.93	17.28	0.02	0.219	0.011
15	41.78	85.00	35.51	314.13	15.71	250.86	12.55	0.16	0.02	1.143	0.001

Error Experimental ( Error Exp.) Equivalente a un +- 5% del Valor Total de K de cada muestra a 25, 45, 55 y 65 °C

Los valores calculados de índices de consistencia K (tabla 15), tienden a disminuir marcadamente a medida que aumenta la temperatura, siendo mucho mas baja a 65 °C en cada muestra analizada. Esto muestra que la resistencia al flujo disminuye notoriamente a medida que aumenta la temperatura. Para optimizar el transporte de melazas dentro de una fábrica procesadora de caña de azúcar, sería importante determinar el costo de la energía requerida durante el bombeo de las melazas a dichas temperaturas, para seleccionar la mas adecuada. Los errores experimentales que se muestran en la tabla 15 para cada índice de consistencia calculado a las temperaturas de los ensayos (25, 45, 55 y 65 °C), son de +- 5 % del valor total de K. Los cuales fueron obtenidos mediante la derivación de la siguiente función:

$$\ln K = b$$

Siendo :

$$K = e^b$$

Cuyo Delta

$$\delta K = (e^b) \delta b$$

Entonces :

$$(K \pm \delta K) = e^{b \pm \delta b}$$

Donde, a partir de la aplicación de la ley de Potencia a los valores de esfuerzos de corte (T) y velocidades de corte

experimentales ( $Dr$ ), a través de regresión lineal, se obtuvo la ecuación de potencia linealizada:

$\ln T = n \ln Dr + \ln K$  cuya analogía con  $Y = mX + b$  como lo indican los gráficos de linealización y sus correspondientes explicaciones en el subcapítulo 2.4 del presente trabajo, nos permite determinar los errores de  $K$ , siendo en este caso:

$b = \ln K$ , valor del intercepto de la curva de flujo ( $T$  vs.  $Dr$ ) linealizada con el eje de las ordenadas (eje  $y$ , ecuaciones de regresión lineal).

$\delta b = \text{Delta } b$ , división utilizada en la escala del eje de las ordenadas, del gráfico de linealización de las curvas de flujo.

$\delta b = 0.05$ , factor de escala mínima utilizada en todos los gráficos de linealización, que multiplica al valor total de  $K$ , lo que nos permite obtener el error experimental mediante:

$\delta K = e^b(\delta b)$ , esta fórmula se aplicó a todos los valores de  $K$  mostrados en las tablas 11, 12, 13, 14 y las contenidas en los anexos E, F, G y H del reporte interno.

Los valores de  $K$  son influenciados por concentraciones variables de otros componentes químicos propios de las melazas, como: sustancias nitrogenadas, coloidales; cenizas,

gomas, etc. que intervienen significativamente en los índices de consistencias, proporcionando mayor o menor resistencia al flujo de las melazas. Razón por la cual, dos melazas con similares concentraciones de °Brix y Pol no pueden tener las mismas viscosidades (2, 4).

TABLA 16

INDICES DE COMPORTAMIENTO REOLÓGICO (n) CALCULADOS A 25, 45, 55 Y 65 °C  
A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE LA LEY DE POTENCIA A LAS VARIABLES DE T Y Dr  
A TRAVÉS DE REGRESIÓN LINEAL (ADIMENSIONALES).

°N Muestra	% Pureza	% Brix	Pol	25 °C		45°C		55°C		65°C	
				n	Error Exp.						
1	32.22	84.40	27.19	1.1834	0.06	0.8903	0.04	0.8434	0.02	2.3065	0.01
2	33.41	79.80	26.66	0.6258	0.02	1.1319	0.09	1.2095	0.09	1.8483	0.08
3	33.53	88.20	29.57	0.7591	0.03	1.3117	0.06	1.0665	0.07	1.6457	0.02
4	35.40	83.00	29.38	0.6467	0.05	0.9984	0.08	1.0171	0.04	1.8427	0.08
5	35.80	84.90	30.39	1.1285	0.01	1.3506	0.08	1.1981	0.03	2.3019	0.06
6	36.13	85.50	30.89	1.1419	0.07	1.2697	0.01	1.1179	0.02	1.5332	0.08
7	36.89	85.30	31.47	1.3756	0.06	1.3213	0.03	1.6825	0.11	2.5561	0.02
8	38.50	84.90	32.69	0.8951	0.05	1.1537	0.02	1.3184	0.02	1.6233	0.02
9	38.86	85.70	33.31	0.9817	0.01	0.7623	0.02	1.5965	0.10	1.3699	0.04
10	39.36	77.20	30.38	0.9075	0.10	1.4794	0.01	1.5060	0.16	2.2271	0.01
11	39.89	87.90	35.07	0.9875	0.01	1.4302	0.03	1.3365	0.08	1.6822	0.08
12	40.11	83.20	33.37	0.9340	0.06	1.2069	0.08	1.2476	0.05	1.2570	0.07
13	40.75	83.00	33.82	1.3110	0.070	1.3184	0.19	1.3666	0.03	1.6805	0.07
14	40.97	84.30	34.54	1.1412	0.07	1.3213	0.08	2.0071	0.02	1.8572	0.02
15	41.78	85.00	35.51	0.5985	0.01	1.2738	0.03	2.3065	0.04	1.3922	0.07
PROMEDIOS				0.9745	0.0440	1.2147	0.0563	1.3880	0.0594	1.8083	0.0462

Promedios de los Errores Experimentales están entre 2.5 y 4.6 % del valor Promedio de sus Respectives (n) a 25, 45, 55 y 65°C

La tabla 16 expone los índices de comportamiento reológico ( $n$ ), calculados a 25, 45, 55 y 65 °C con sus respectivos errores experimentales ( $\pm \delta n$ ). Es importante destacar que a 25 °C, el ( $n$ ) promedio de las muestras estudiadas indican un índice de flujo de  $n = 0.9745$  donde  $n < 1$  indica comportamiento ligeramente pseudoplástico. Sin embargo el 65 % de las muestras ensayadas a 25 °C tienen un comportamiento ligeramente pseudoplástico y el restante 35 % corresponde a un comportamiento dilatante ( $n > 1$ ). A 45 °C el promedio de  $n$  es 1.2147, que indica comportamiento dilatante; a esta temperatura se observa que el 80 % de las muestras tienen comportamiento dilatante y el 20 % corresponden a fluidos pseudoplásticos; mientras que a 55 °C y 65 °C las muestras presentan un promedio de  $n = 1.388$  y 1.800 respectivamente. A 55 y 65 °C el 94 y 100 % de las muestras se comportan como fluidos dilatantes. Es importante destacar que el valor de  $n$  se incrementa de 0.9745, 1.2147, 1.3880 y 1.80 a medida que aumenta las temperaturas de ensayo de 25, 45, 55 a 65 °C respectivamente. Esto indica que a medida que aumenta la temperatura el comportamiento de las muestras son marcadamente dilatantes.

Los errores promedios de  $n$  (tabla 16) muestran, para 25°C el valor de  $\pm 0.044$  que corresponde al 4.5 % del valor promedio de  $n = 0.09745$  a dicha temperatura; a 45 °C es de  $\pm 0.056$  que es el 4.6 % de  $n$  promedio = 1.2147; a 55 °C es de  $\pm 0.059$  que representa el 4.3 % de  $n$  promedio = 1.3880 y a 65 °C el error experimental es de  $\pm 0.046$  que corresponde al 2.5 % del valor de  $n$  promedio = 1.8083.

Los errores experimentales se obtuvieron a partir de la derivación de la fórmula matemática de la pendiente, ya que ( $n$ ) es la pendiente de las curvas de flujo: Esfuerzos de Corte versus Velocidades de Corte ( $T$  vs.  $Dr$ ) linealizadas, mediante la aplicación de la ley de potencia ( $T=K(Dr)^n$ ) a través de regresión lineal donde:  $\ln T = n \ln Dr + \ln K$  cuya analogía con  $Y= m X + b$  nos permite obtener la pendiente  $m$  que en este caso es  $n$  (comportamiento de flujo). El desarrollo de la derivación de la fórmula de la pendiente se detalla a continuación:

*SI :*

$m =$  Pendiente de la ecuación de regresión lineal

*Donde*

$m = n$

$n =$  comportamiento de flujo.

**Entonces:**

$$n = y_2 - y_1 / x_2 - x_1$$

*Delta*(n):

$$\delta n = \delta y_2 - \delta y_1 / \delta x_2 - \delta x_1$$

*Siendo:*

$$\delta y_2 = \delta y_1 = \delta y$$

$$\delta x_2 = \delta x_1 = \delta x$$

$$\delta n = 2\delta y / 2\delta x = x_2\delta y - y_2\delta x / x^2$$

*si*

$$x = (x_2 - x_1)$$

$$y = (y_2 - y_1)$$

$$x^2 = (x_2 - x_1)^2$$

*Entonces:*

$$\delta n = (x_2 - x_1)2\delta y - (y_2 - y_1)2\delta x / (x_2 - x_1)^2$$

Para calcular los errores experimentales de n (+-  $\delta n$ ), de las 15 muestras seleccionadas a las temperaturas de ensayo, se seleccionaron 2 pares ordenados (x;y = lnDr;lnT) de las tablas 11,12,13, 14 y la de los anexos E, F, G y H del reporte interno, los que permiten obtener la linealización de las curvas de flujo y la ecuación de regresión lineal, los mismos que se reemplazan en:

**La fórmula derivada de la pendiente:**

$$\delta n = (x_2 - x_1)(2\delta y) - (y_2 - y_1)(2\delta x) / (x_2 - x_1)^2$$

*Siendo :*

$$x = \ln Dr$$

$$y = \ln T$$

$$\delta x = \delta y = 0.05$$

*Siendo :*

$\delta x$  = División utilizada en la escala de las abscisas (ejes x ó  $\ln Dr$ ), de los gráficos de linealización de las curvas de flujo T vs. Dr.

$\delta y$  = División utilizada en la escala de las ordenadas (ejes y ó  $\ln T$ ), de los gráficos de linealización de las curvas de flujo T vs. Dr.

**TABLA 17**  
**INDICES DE CORRELACIÓN ( $r^2$ ) DE LAS VARIABLES CALCULADAS**  
**(ESFUERZOS DE CORTE T Y VELOCIDAD DE CORTE Dr),**  
**OBTENIDOS A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE LA LEY DE POTENCIA**  
**A TRAVÉS DE REGRESIÓN LINEAL.**

°N Muestra	% Pureza	% Brix	Pol	25°C	45°C	55°C	65°C
1	32.22	84.40	27.19	0.9894	0.9571	0.9877	0.9955
2	33.41	79.80	26.66	0.9804	0.9877	0.9767	0.9903
3	33.53	88.20	29.57	0.9604	0.9960	0.9771	0.9965
4	35.40	83.00	29.38	0.9527	0.9979	0.9754	0.9641
5	35.80	84.90	30.39	0.9898	0.9615	0.9742	0.9108
6	36.13	85.50	30.89	0.9971	0.9590	0.9895	0.9038
7	36.89	85.30	31.47	0.9282	0.9119	0.9988	0.9857
8	38.50	84.90	32.69	0.9390	0.9827	0.9715	0.9857
9	38.86	85.70	33.31	0.9976	0.9409	0.9992	0.9695
10	39.36	77.20	30.38	0.9525	0.9439	0.9996	0.9984
11	39.89	87.90	35.07	0.9210	0.9491	0.9932	0.9972
12	40.11	83.20	33.37	0.9326	0.9837	0.9971	0.9903
13	40.75	83.00	33.82	0.9570	0.9479	0.9691	0.9557
14	40.97	84.30	34.54	0.9947	0.9584	0.9991	0.9967
15	41.78	85.00	35.51	0.9739	0.9656	0.9914	0.9941
<b>PROMEDIOS</b>				<b>0.9644</b>	<b>0.9629</b>	<b>0.9866</b>	<b>0.9756</b>

ELABORADO POR MÓNICA BÉHAR

La tabla 16 presenta el promedio de los coeficientes de correlación lineal ( $r^2$ ) para cada muestra ensayada a 25, 45, 55 y 65 °C. Los coeficientes de correlación obtenidos, se encuentran por encima del 96 %, indican que los esfuerzos de corte (T) calculados experimentalmente y velocidades de corte (Dr)

utilizadas en los ensayos a diferentes temperaturas, se ajustan muy bien con la ecuación de potencia. Esto indica que el modelo de la ley de potencia para fluidos pseudoplásticos y dilatantes es adecuado para describir el flujo de melazas.

**TABLA 18**

**PROMEDIOS DEL PORCENTAJE DE ERROR RELATIVO DE  
LOS ESFUERZOS DE CORTE CALCULADOS  
EXPERIMENTALMENTE A 25, 45, 55 Y 65 °C, CON RESPECTO  
AL ESFUERZO DE CORTE TEÓRICO.**

N Muestras	% Pureza	% Brix	Pol	25°C	45°C	55°C	65°C
1	32.22	84.40	27.19	8.90	5.30	6.80	6.80
2	33.41	79.80	26.66	8.60	5.60	10.00	7.90
3	33.53	88.20	29.57	8.80	5.20	12.70	4.80
4	35.40	83.00	29.38	8.73	3.40	11.30	13.80
5	35.80	84.90	30.39	4.90	5.20	13.20	5.50
6	36.13	85.50	30.89	3.40	4.10	5.30	4.70
7	36.89	85.30	31.47	9.70	6.90	3.30	12.60
8	38.50	84.90	32.69	6.80	10.31	12.10	9.88
9	38.86	85.70	33.31	3.50	9.90	2.20	13.60
10	39.36	77.20	30.38	5.89	8.90	2.20	3.20
11	39.89	87.90	35.07	7.42	6.60	6.60	4.10
12	40.11	83.20	33.37	8.02	9.00	6.40	7.30
13	40.75	83.00	33.82	8.55	6.20	13.10	15.60
14	40.97	84.30	34.54	5.47	6.60	0.70	3.90
15	41.78	85.00	35.51	7.07	13.30	9.10	5.80
<b>PROMEDIOS</b>				<b>7.05</b>	<b>7.10</b>	<b>7.67</b>	<b>7.83</b>

ELABORADO POR MÓNICA BÉHAR

La tabla 18, expone el promedio del porcentaje del error relativo, de los esfuerzos de corte calculados experimentalmente mediante la ecuación dada por el manual  $T = Z(\alpha)$  a las

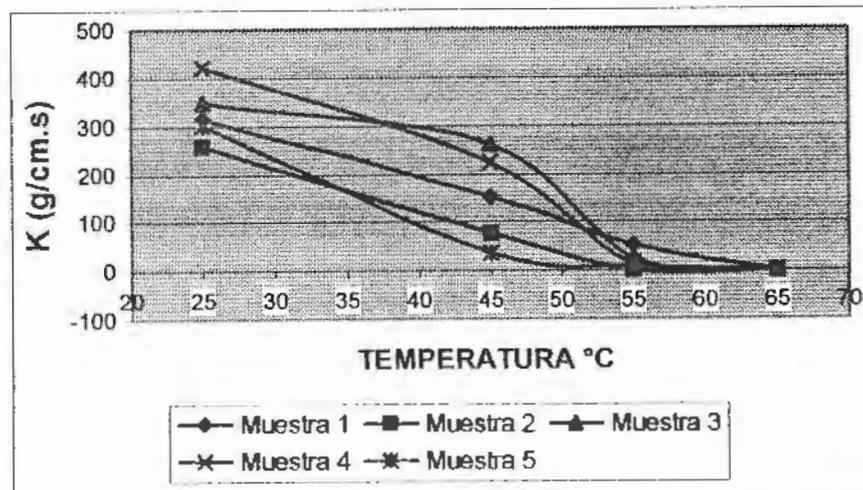
temperaturas de ensayo, con respecto a los T teóricos obtenidos mediante la ecuación de Potencia  $T = K (Dr)^n$ , reemplazando los valores de K y n calculados a través regresión lineal y los valores de velocidades de corte (Dr) utilizados en el ensayo.

Se presentan el promedio del porcentaje de error para cada muestra a las diferentes temperaturas (25, 45, 55 y 65 °C). En forma general se observa que a medida que aumenta las temperaturas de los ensayos, los valores del error se incrementan ligeramente.

### **3.3. Gráficos de Indices de Consistencia Versus Temperaturas**

Las curvas formadas por los índices de consistencia (K) versus temperaturas (°C) resumidas en grupos de 5, se presentan en los gráficos 3.1, 3.2 y 3.3.

GRÁFICO 3.1 INDICES DE CONSISTENCIA (K) VS. TEMPERATURAS, DE LAS MUESTRAS 1, 2, 3, 4, 5



Elaborado por Mónica Béhar C.

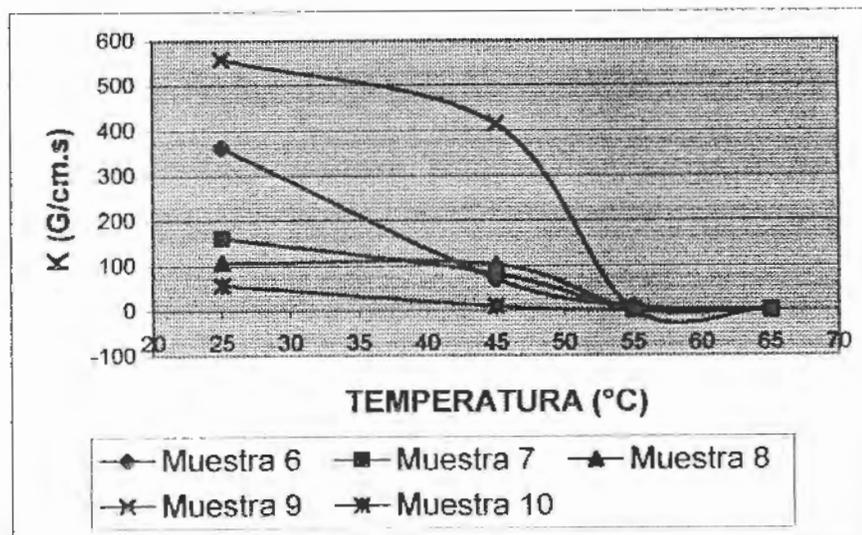
El gráfico 3.1 expone las curvas pertenecientes a las muestras:

- Muestra 1 (32.22 % Pureza/84.40 °Brix)
- Muestra 2 (33.41 % Pza/79.80 °Brix)
- Muestra 3 (33.53 % Pza/88.20 °Brix)
- Muestra 4 (35.40 % Pza/83. °Brix)
- Muestra 5 (35.80 % Prz/84.90 °Brix).

Las curvas en el gráfico 3.1, muestran que las pendientes son mayores entre 25 y 45 °C, disminuyendo entre 45 y 55 °C en cada una, sin embargo, entre 55 y 65 °C las diferencias entre ellas son mínimas. Esto indica que se produce una disminución

del índice de consistencia (K) conforme aumenta la temperatura. Las curvas no presentan una relación específica entre K y el porcentaje de pureza y sus respectivos °Brix, esto se puede justificar atendiendo a los estudios de la mieles finales de la caña de azúcar realizados por Biart y Serrano (2) en el Instituto Cubano de Investigación, cuyos estudios demuestran que las viscosidades de las melazas van a depender de los componentes que intervienen como parte de los sólidos (°Brix), es decir la cantidad de cenizas (sales minerales), gomas, coloides y sustancias no azucaradas tales como aminoácidos, entre otros. Estos se encuentran en proporciones variables e intervienen en el flujo de las melazas proporcionándoles mayor o menor viscosidad; es decir, melazas con iguales grados °Brix pueden presentar diferentes viscosidades; y éstas a su vez dependerán del tipo de variedad de caña y su estado de maduración, eficiencia del procesamiento, entre otros factores que intervienen en su composición como subproducto, durante la obtención de azúcar.

**GRÁFICO 3.2 INDICES DE CONSISTENCIA VS.  
TEMPERATURAS, DE LAS MUESTRAS 6, 7, 8, 9, 10**



Elaborado por Mónica Béhar C

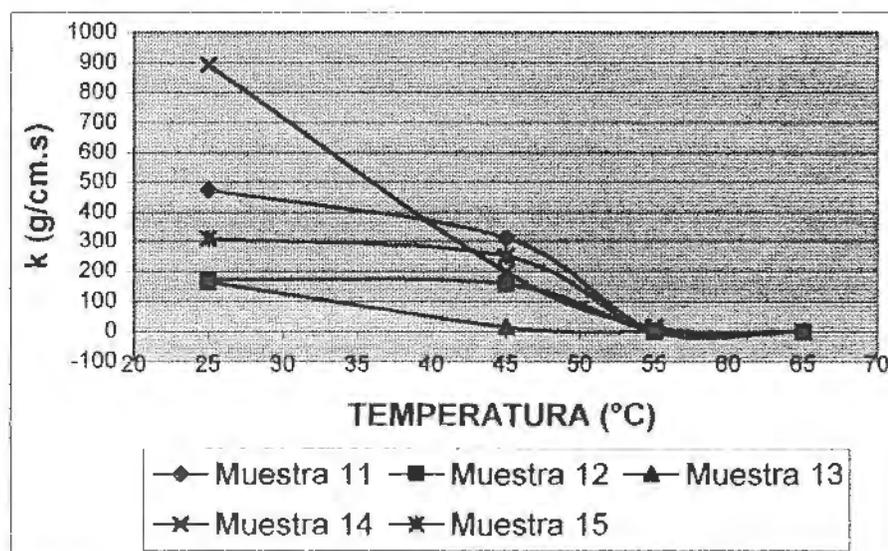
El gráfico 3.2 expone las curvas pertenecientes a las muestras:

- Muestra 6 (36.13 % Pureza/85.50 °Brix)
- Muestra 7 (36.89 % Pza/85.30 °Brix)
- Muestra 8 (38.50 % Pza/84.90 °Brix)
- Muestra 9 (38.86 % Pza/85.70 °Brix)
- Muestra 10 (39.36 % Pza/77.20 °Brix)

La muestra 9 con el valor más alto en °Brix (85.79%), presenta una curva con los valores de mayor índice de consistencia (K). Sin embargo el análisis general, muestra que todas las curvas presentan los mayores valores de K entre 25 y 45 °C; mientras

que entre 45 y 55 °C los índices de consistencia disminuyen. Estas curvas muestran claramente que conforme aumenta la temperatura entre 55 y 65 °C, han disminuido notablemente las diferencias de la pendiente, debido principalmente al porcentaje de purezas y sus respectivos °Brix.

**GRÁFICO 3.3 INDICES DE CONSISTENCIA VS. TEMPERATURAS DE LAS MUESTRAS 11, 12, 13, 14, 15.**



Elaborado por Mónica Béhar C

El gráfico 3.3 expone las curvas pertenecientes a las muestras:

- Muestra 11 (39.89 % Pureza/87.90 °Brix)
- Muestra 12 (40.11 % Pza/83.20 °Brix)
- Muestra 13 (40.75 % Pza/83.0 °Brix)
- Muestra 14 (40.97 % Pza/84.30 °Brix)
- Muestra 15 (41.78 % Pza/85.0 °Brix).

Se observa que los valores mayores de K están entre 25 y 45 °C. La tendencia a disminuir está entre temperaturas de 45 y 55 °C, sin que se observen diferencias notables entre 55 y 65 °C, debido a su pureza y °Brix. Sin embargo, la curva de la muestra 4 presenta los valores mas altos de índices de consistencia a 25 y 40 °C.

### 3.1. Cálculos de Energías de Activación

En la mayoría de casos analizados se ha establecido que el efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia, es descrito por la ecuación de Arrhenius la cual permite calcular la energía de activación (EA) que se requiere para producir el flujo de numerosas sustancias alimenticias (Principios de Ingeniería Aplicados a los Alimentos, Alvarado, (1). En el presente estudio se utiliza este mismo modelo para calcular las energías de activación que se requiere para generar flujo en las melazas, en función de las temperaturas usadas en el estudio, que a su vez son las utilizadas en la Industria para el bombeo de las melazas durante su transporte. La ecuación se aplicó a los valores de índices de consistencias (K), mediante regresión lineal, cambiando las unidades de  $K = \text{g/cm.s}$  a  $\text{Kg/m.s}$  y la

temperatura de °C a su equivalente inverso de temperatura absoluta ( $1/^\circ\text{K}$ ).

**Ecuación de Arrhenius:**

$$K = K_0 e^{(EA/RT)}$$

**K:** Índice de consistencia

**K<sub>0</sub>:** Constante dada por el intercepto de la línea con el Eje (Y)

**EA:** Energía de Activación para generar flujo

**RG:** Constante de los Gases (8.314 J/g.mol.°K)

**TA:** Temperatura Absoluta.

En los gráficos (3.4 a 3.18) se presentan la linealización de la ecuaciones de Arrhenius y sus respectivos modelos matemáticos correspondientes a:

$\ln K : \ln K_0 + EA/RT$ , aplicados a las 15 muestras estudiadas.



GRÁFICO 3.4. ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (1)

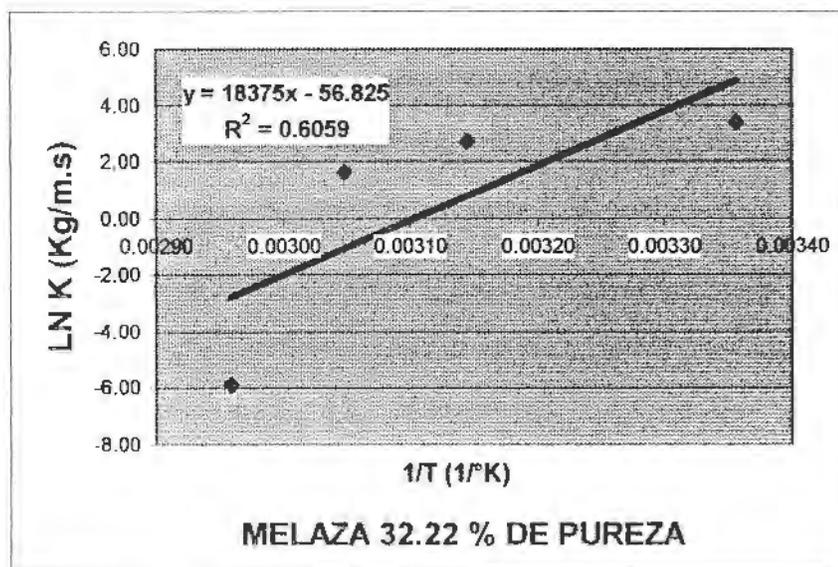


GRÁFICO 3.5. ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (2)

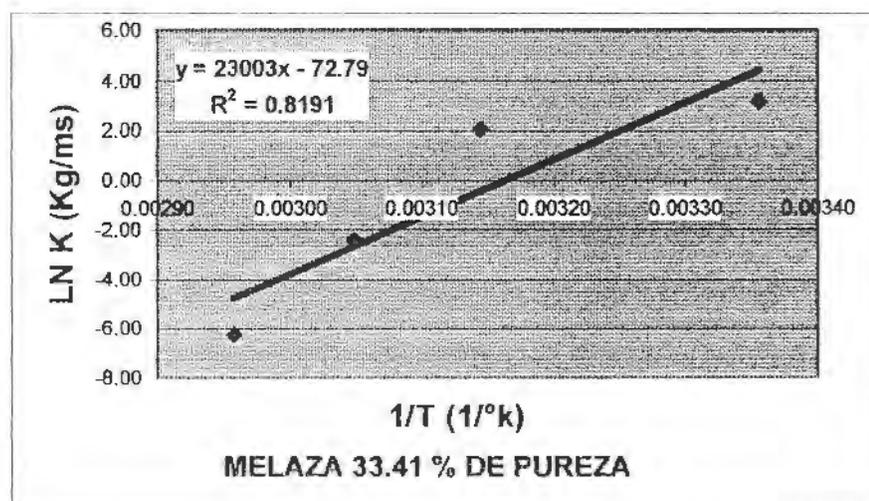


GRÁFICO 3.6 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (3)

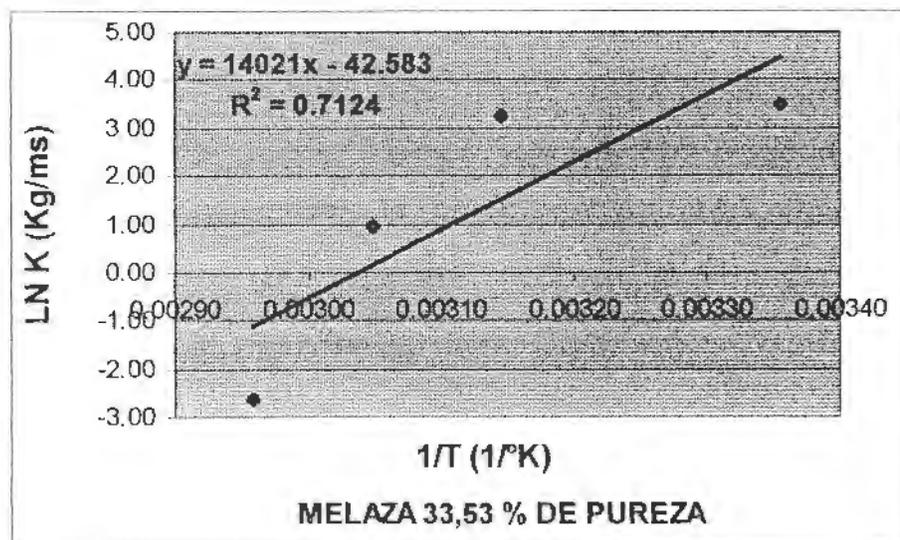


GRÁFICO 3.7 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (4)

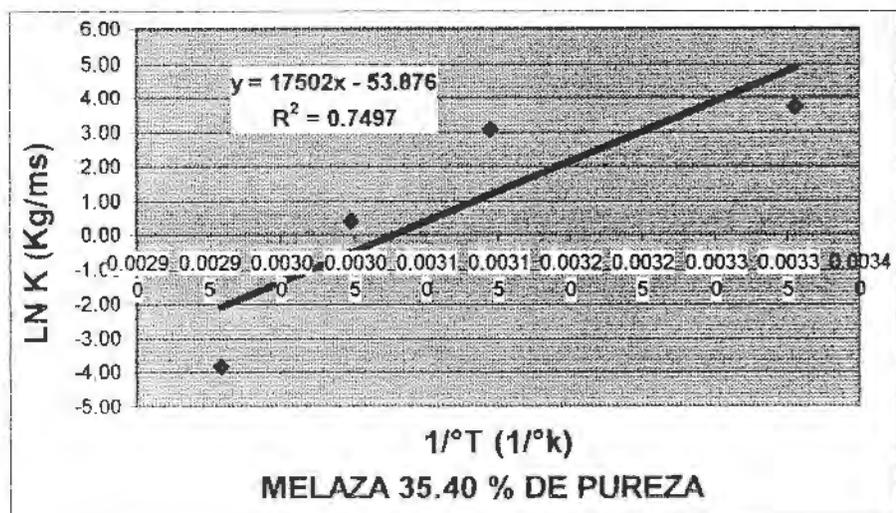


GRÁFICO 3.8 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (5)

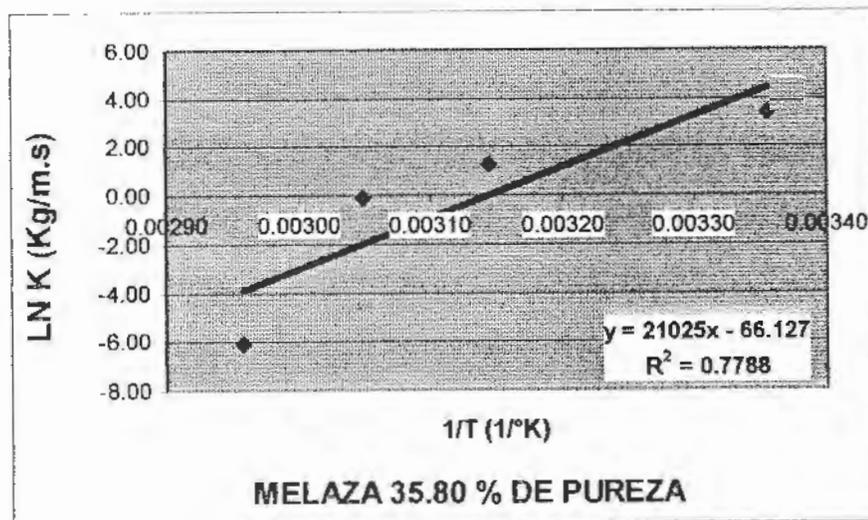


GRÁFICO 3.9 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (6)

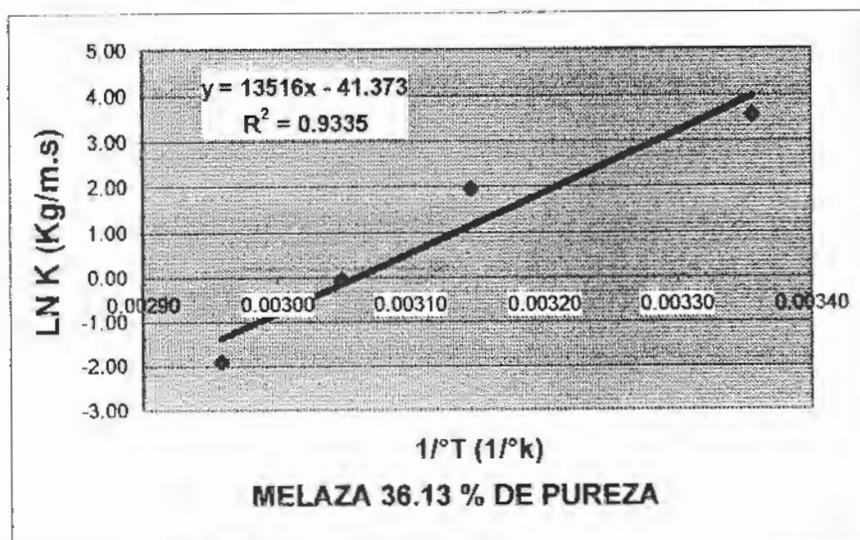


GRÁFICO 3.10 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (7)

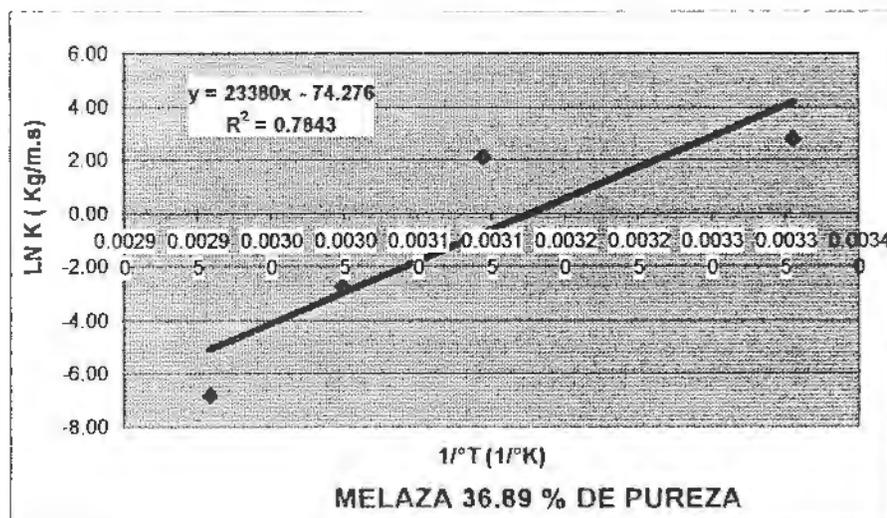


GRÁFICO 3.11 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (8)

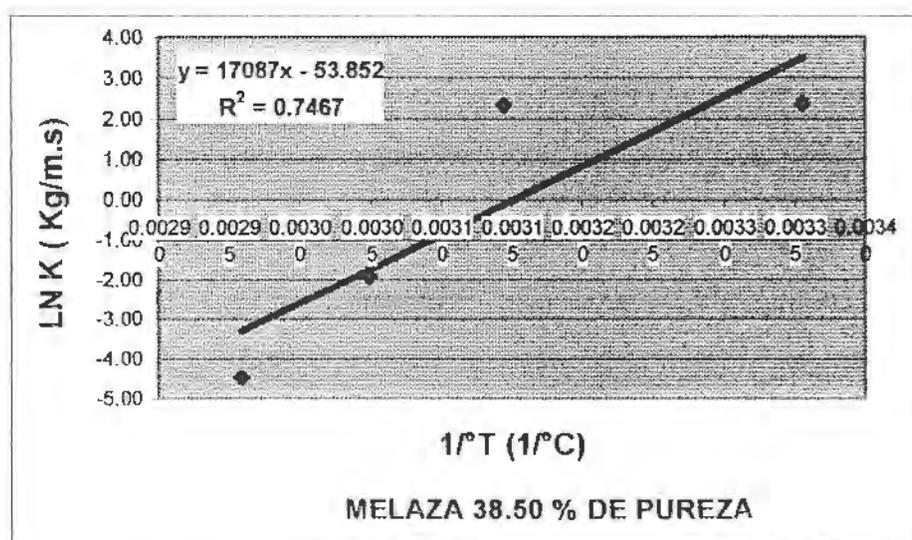


GRÁFICO 3.12 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (9)

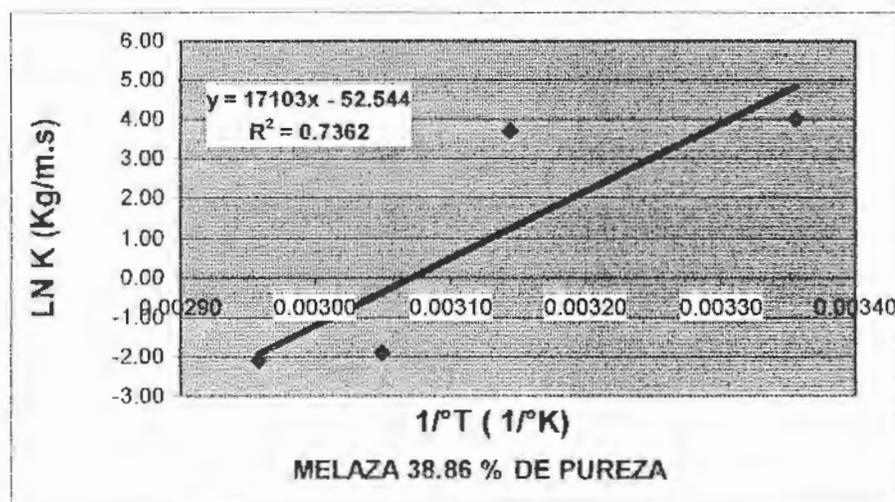


GRÁFICO 3.13 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (10)

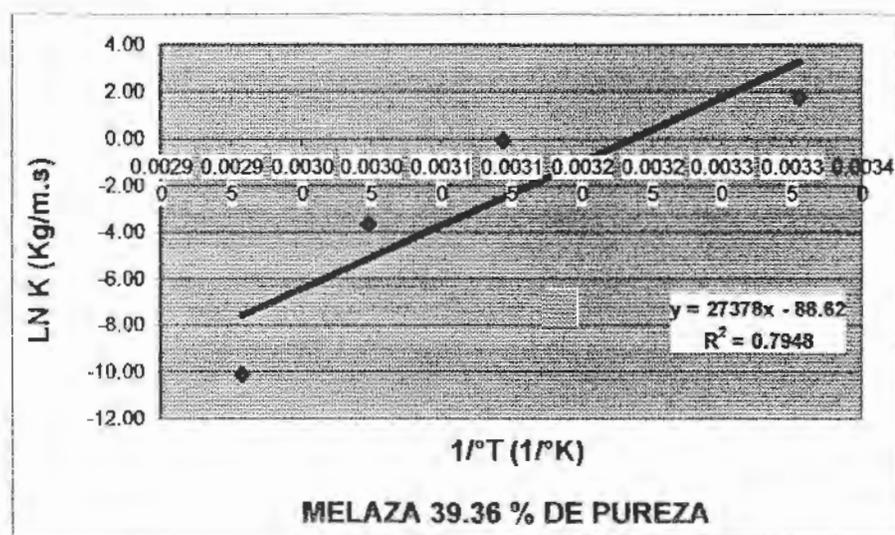


GRÁFICO 3.14 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (11)

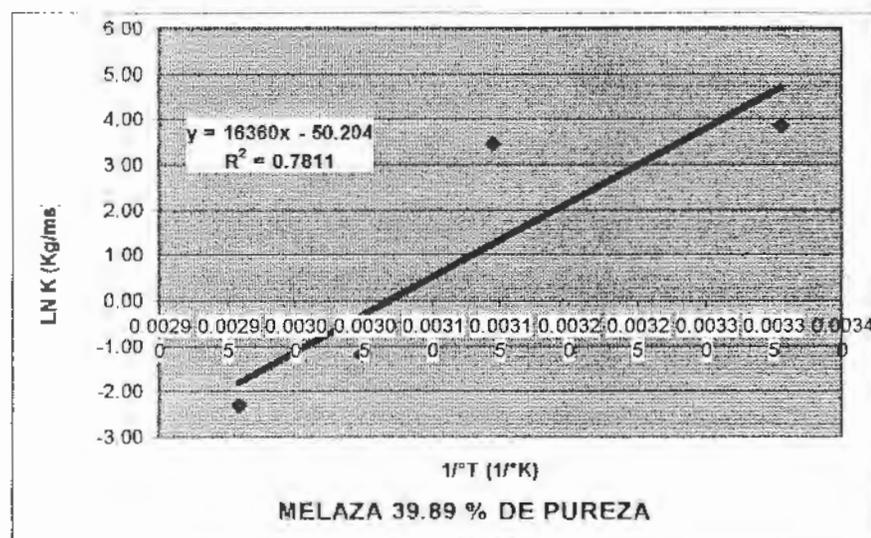


GRÁFICO 3.15 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (12)

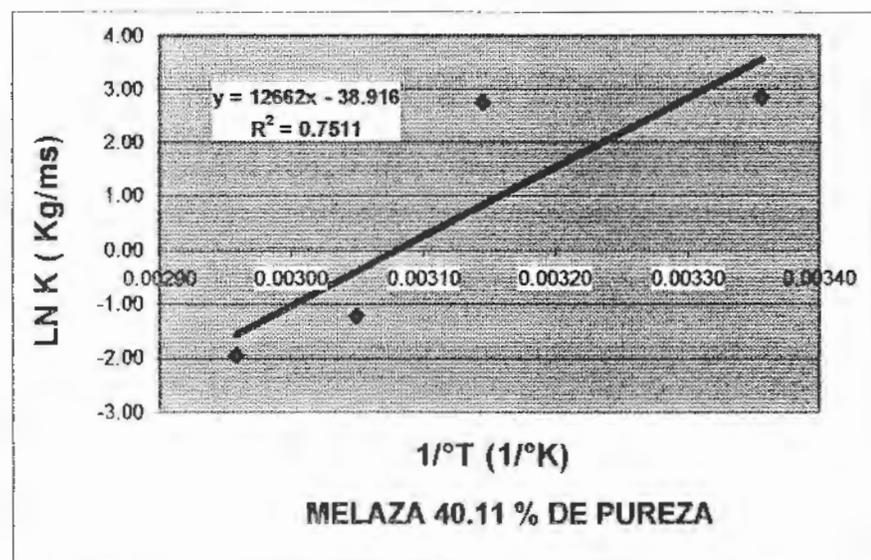


GRÁFICO 3.16 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (13)

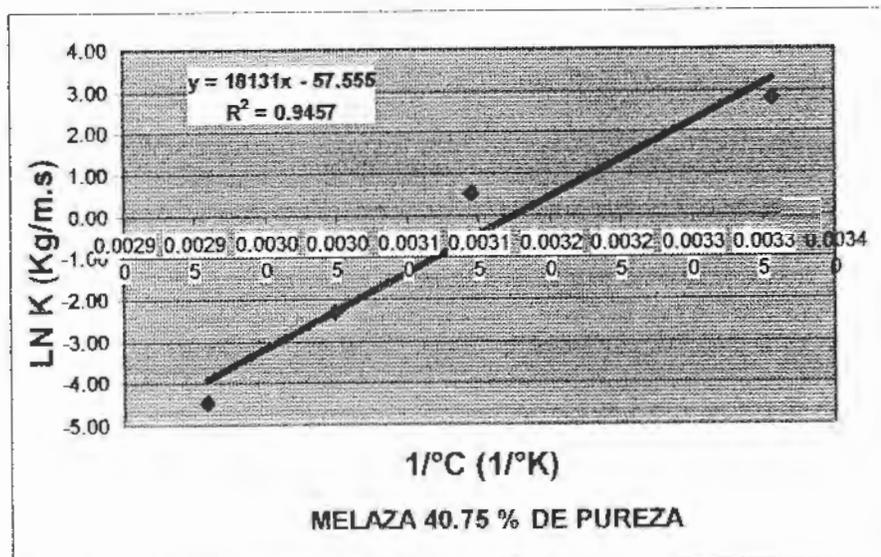
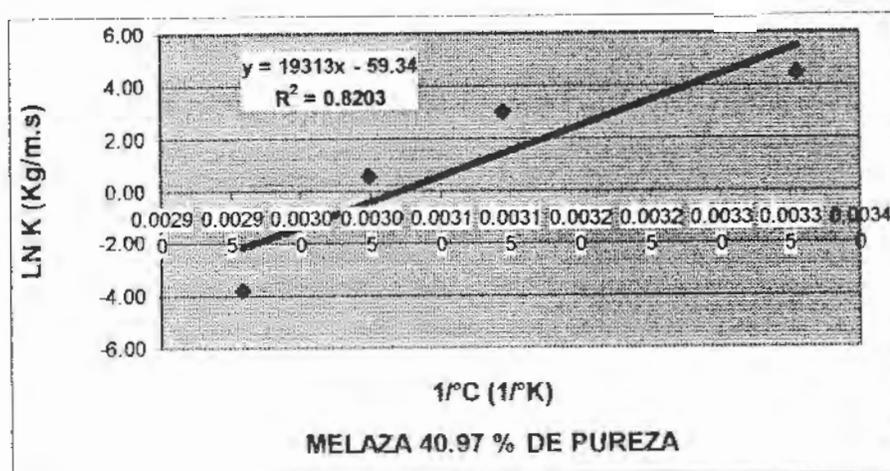
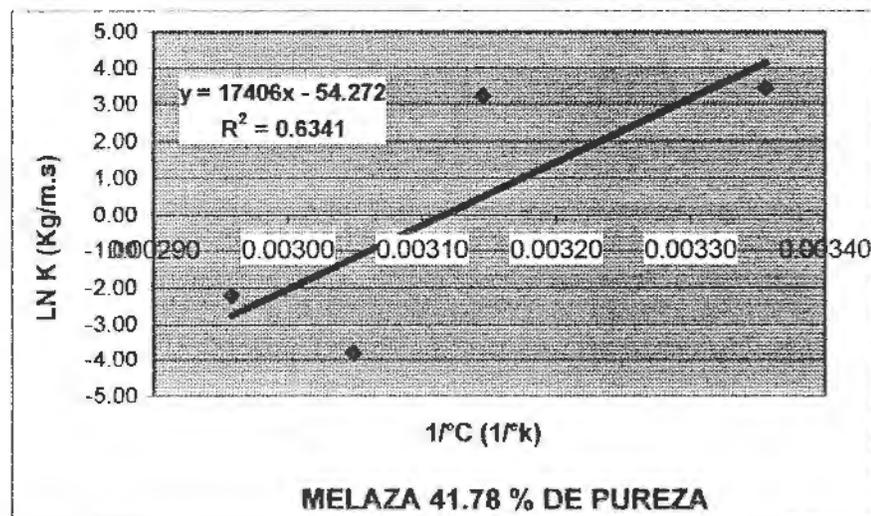


GRÁFICO 3.17 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (14)



**GRÁFICO 3.18 ECUACIÓN DE ARRHENIUS PARA INDICES DE CONSISTENCIA DE LA MUESTRA (15)**



ELABORADO POR MÓNICA BÉHAR

Las figuras expuestas corresponden a la representación gráfica de la ecuación de Arrhenius para las 15 muestras consideradas. La tabla 18 presenta los valores de energía de activación calculadas en función de las pendientes, obtenidas a través de los modelos matemáticos de los respectivos gráficos de Arrhenius. Los cálculos se realizaron con el programa EXCEL, Windows 2000 y se presentan en el ANEXO D.

**TABLA 19**  
**ENERGÍAS DE ACTIVACIÓN DE FLUJO (EA), REQUERIDAS**  
**POR LAS MUESTRAS SELECCIONADAS**

<b>°N Muestras</b>	<b>% Pureza</b>	<b>% Brix</b>	<b>Pol</b>	<b>EA(KJ/gmol)</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
1	32.22	84.40	27.19	152.8	0.6059
2	33.41	79.80	26.66	191.2	0.8191
3	33.53	88.20	29.57	116.6	0.7124
4	35.40	83.00	29.38	145.5	0.7497
5	35.80	84.90	30.39	174.8	0.7788
6	36.13	85.50	30.89	112.4	0.9335
7	36.89	85.30	31.47	194.4	0.7843
8	38.50	84.90	32.69	142.1	0.7467
9	38.86	85.70	33.31	142.2	0.7362
10	39.36	77.20	30.38	227.6	0.7948
11	39.89	87.90	35.07	136.0	0.7011
12	40.11	83.20	33.37	105.3	0.7511
13	40.75	83.00	33.82	150.7	0.9457
14	40.97	84.30	34.54	160.6	0.8203
15	41.78	85.00	35.51	144.7	0.6341
<b>PROMEDIO</b>				153.1	
<b>COEFICIENTE DE VARIACIÓN</b>				21.5	

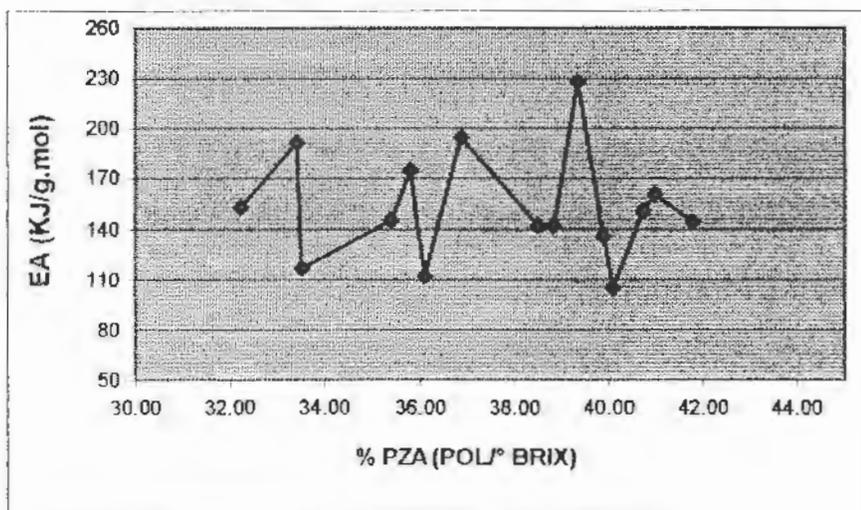
Elaborado por Mónica Béhar

La energía de activación requerida por cada muestra seleccionada se presentan en la tabla 19, cuyos porcentajes de purzas se encuentran entre 32 y 42 % con sus respectivos °Brix que se encuentran entre 77 y 88 %, y el Pol entre 26 y 35 %. Los valores de energía de activación se encuentran entre un rango de 105 y 228 KJ/g.mol, cuyo promedio es de: 153 KJ/g.mol, y un coeficiente de variación entre dicho rango de 21.5%. En cuanto al índice de correlación lineal ( $r^2$ ) se ha determinado que se encuentran entre 0.6059 y 0.9457. Estos

valores indican que los índices de consistencias calculadas (K) a las diferentes temperaturas del ensayo tienen un buen ajuste con la ecuación de Arrhenius. Por este motivo se puede concluir que la ecuación de Arrhenius es adecuada para describir el efecto de la temperatura sobre K de las melazas del Ingenio La Troncal.

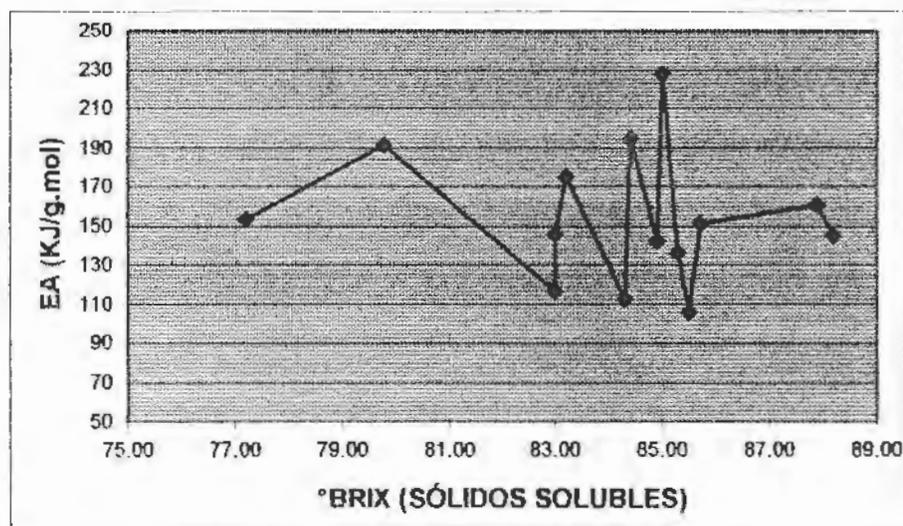
Los gráficos 3.19 y 3.20 relacionan las energías de activación de flujo experimentales con las purezas y sus respectivos grados Brix de las muestras ensayadas. Se observa claramente que para valores de purezas comprendidos entre 32 y 42 % ( $^{\circ}$  Brix entre 77 a 88 %), se requieren entre 105 a 228 KJ/g.mol para generar flujo de las melazas.

**GRÁFICO 3.19 ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (EA) VS. PORCENTAJE DE PUREZAS (%PZAS), DE LAS 15 MUESTRAS DE MELAZAS DEL INGENIO LA TRONCAL**



LOS PUNTOS CORRESPONDEN A LAS 15 MUESTRAS ESTUDIADAS.

**GRÁFICO 3.20 ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (EA) VS. °BRIX, DE LAS 15 MUESTRAS DE MELAZAS DEL INGENIO LA TRONCAL**



LOS PUNTOS CORRESPONDEN A LAS 15 MUESTRAS ESTUDIADAS.

Los gráficos 3.19 y 3.20 muestran que no hay una relación definida entre las energías de activación de flujo requeridas por las muestras de melazas seleccionadas, en función del porcentaje de pureza y sus respectivos grados Brix.

## CAPÍTULO 4

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio realizado sobre el comportamiento reológico de las melazas de caña de azúcar provenientes del Ingenio La Troncal, las cuales presentaron entre 32 y 42 % de pureza; sólidos solubles entre 77 y 88 °Brix y porcentajes de sacarosa (Pol) de 26 a 35 %, permite concluir de forma global su comportamiento reológico a temperaturas de bombeo (25, 45, 55 y 65°C), sin embargo se ha preferido detallar y discutir las conclusiones específicas para cada parámetro determinado.

Se debe aclarar que el mérito del presente estudio es la secuencia metodológica realizada de forma coherente, mas que los propios resultados numéricos, puesto que no se descartan los errores de equipo, lecturas, etc., que pudieron haberse presentado.

1. Las melazas con características químicas ya mencionadas presentan un comportamiento de flujo ambiguo, que depende de las temperaturas de ensayo; a 25 °C la mayoría de las muestras tienen un comportamiento pseudoplástico, sin embargo a medida que aumenta la temperatura su comportamiento reológico se vuelve mas definido, a temperaturas de 65 °C se presentan marcadamente dilatantes como muestran sus índices respectivos (tabla 16).
2. Los índices de consistencia K disminuyen notoriamente a medida que se aumentan las temperaturas de ensayo, presentado el menor valor a temperaturas de 65 °C (tabla 15), lo que indica menor resistencia al flujo.
3. Las energías de activación requeridas para producir el flujo de las melazas seleccionadas, se encuentran entre parámetros que van de 105 a 228 KJ/g.mol, con un coeficiente de variación de 21.5 %.

### Índices de Consistencia (K):

- Los coeficientes de correlación ( $r^2$ ) obtenidos, se encuentran por encima del 96 %, indicando que los esfuerzos de corte (T) calculados experimentalmente y las velocidades de corte (Dr) utilizadas en los ensayos a temperaturas de 25, 45, 55 y 65 °C, se ajustan bastante bien a la ecuación de potencia a través de regresión lineal.
- El correcto ajuste de los datos experimentales de (T y Dr) en la ecuación de potencia, para fluidos pseudoplásticos y dilatantes es adecuado para describir el flujo de las melazas.
- Los valores determinados de índices de consistencia (K), tienden a disminuir marcadamente a medida que aumenta las temperaturas de los ensayos, presentándose los menores valores de K a temperaturas de 65 °C para cada muestra estudiada.
- Los valores de K a temperaturas de 65 °C se encuentran entre 0.0004 y 1,5 g/cm.s.

- Los valores mayores de K, corresponden a temperaturas de: 25 °C que varían entre 57 y 894 g/cm.s; a 45 °C entre 10 y 414 g/cm.s y a 55 °C entre 0.16 y 51 g/cm.s.
- Los diversos valores de K a una misma temperatura de ensayo, de las muestras seleccionadas y provenientes de melazas con similares % de puresas, °Brix y % de Pol, se justifica debido a la proporción variable de otros componentes químicos de las melazas (sustancias nitrogenadas, cenizas, coloides, gomas, etc.) que modifican significativamente los valores de K.
- Los errores experimentales de K (+- delta K), para cada muestra analizada a temperaturas de ensayo, son del 5% del valor total de K, esto se debe a la escala (0.05) utilizada en los gráficos de linealización T vs. Dr durante la aplicación de la Ecuación de potencia a través de regresión lineal.
- Las curvas de los Indices de consistencia (K) obtenidos experimentalmente vs. temperaturas de ensayo, muestran que las pendientes son mayores entre 25 y 45 °C, disminuyendo entre 45 y 55 °C, mientras que entre 55 y 65 las diferencia entre ellas son mínimas, confirmándose que la disminución de los valores de (K) se produce conforme se incrementa la temperatura de ensayo. L

- Las curvas no presentan una relación específica entre  $K$  y los porcentajes de purzas y sus respectivos grados °Brix.

#### **Comportamiento de Flujo de las Melazas:**

- Se observa que a temperaturas de 25 °C, el promedio de  $(n)$  de las muestras estudiadas es de  $n=0.9745$ , donde  $n<1$ , indica comportamiento ligeramente pseudoplástico, comportándose el 65 % de las muestras como fluidos pseudoplásticos y el 35 % restante como sustancias dilatantes.
- A temperaturas de 45, 55 y 65 °C, las melazas seleccionadas se comportan como sustancias dilatantes, cuyos  $(n)$  promedios son: a 45 °C  $n= 1.2147$  con un comportamiento dilatante del 80 %; a 55 °C  $n= 1.388$  con el 94 % de las melazas con comportamiento dilatante y a 65 °C  $n= 1.800$  con el 100 % de comportamiento dilatante.
- Se observa que el valor promedio de  $(n)$  se incrementa de 0.9745, 1.2147, 1.3880 a 1.800, conforme aumenta las temperaturas de los ensayos de 25, 45, 55 a 65 °C

respectivamente, indicando que a medida que aumenta la temperatura el comportamiento de las melazas es marcadamente dilatante.

- Los errores experimentales de  $n$  ( $\pm$  delta  $n$ ) de todas las muestras estudiadas, se encuentran entre 2,5 y 5,6 % con respecto al valor promedio de  $(n)$  a las temperaturas de ensayo, determinándose que: a 25 °C el delta  $n = \pm 0.044$  correspondiente al 4.5 % del valor promedio de  $n$  a dicha temperatura.
- A 45 °C el delta  $(n)$ , es  $\pm 0.056$  es el 4.6 % del valor promedio de  $n$  a la misma temperatura; a 55 °C el delta  $(n)$ , es 0.059 que representa el 4.3 % del valor promedio de  $(n)$ , y a 65 °C el delta  $(n)$  es de  $\pm 0.046$  que corresponde al 2.5 % de error de  $n$  promedio a la misma temperatura.

#### **Entre los Esfuerzos de Corte (T) Prácticos, con los (T) Teóricos:**

- En cuanto al promedio de los porcentajes de errores experimentales de los esfuerzos de corte (T) calculados experimentalmente a las diferentes temperaturas de ensayos,

mediante la ecuación dada por el manual del equipo utilizado (Rheotest), con relación a los (T) teóricos obtenidos aplicando la ecuación de potencia a los valores de (K y n) y a los valores de velocidades de corte (Dr) utilizados en el Rheotest se obtuvieron los siguientes % de Errores: a 25 °C el 7.05%; a 45 °C el 7.10 %; a 55 °C el 7.67 % y a 65 °C el 7.83 % de error de T prácticos con respecto a T teóricos.

#### Energías de Activación de Flujo :

- La aplicación de la ecuación de Arrhenius a cada valor de K determinadas para todas las muestras seleccionadas y a sus respectivas temperaturas de ensayo, generaron a través de regresión lineal, índices de correlación entre 0.61 y 0.95, los cuales indican un buen ajuste de las variables involucradas ( K y °T) en la ecuación de Arrhenius.
- La ecuación de Arrhenius, permite calcular la energía de activación (AE) para producir el flujo de las melazas, determinándose requerimientos entre un rango de 105 y 228 KJ/g.mol, con un promedio de 153 KJ/g.mol y un coeficiente de variación de 21.5 %.

- Los gráficos de energías de activación requeridas vs. porcentajes de purezas y sus respectivos °Brix de las melazas seleccionadas, muestran que no hay una relación definida entre dichas variables, sólo indica un rango de EA para generar flujo requerida por melazas de purezas entre 32 y 42 % y 77 y 88 °Brix.

#### Recomendaciones:

- Para optimizar el transporte de las melazas dentro de una fábrica procesadora de caña de azúcar, se recomienda realizar un estudio de los costos de la energía requerida durante el bombeo de las melazas a las temperaturas de ensayos utilizadas, considerando la disminución de la resistencia al flujo de las melazas (disminución de K) a medida que aumenta la temperatura de transporte.
- Se sugiere realizar el análisis químico de: nitrógeno total, cenizas, azúcares reductores, gomas y coloides, ya que son componentes que influyen en el grado viscoso de las melazas de caña, es decir en su comportamiento reológico.

- Se recomienda utilizar una nueva muestra, cada vez que se realicen los ensayos, descartando las muestras licuadas efecto del movimiento angular de los cilindros utilizados.
- Una vez que el termostato indique la temperatura de ensayo requerida, es conveniente esperar unos 5 minutos para realizar las lecturas alfas, tiempo necesario para que las muestras alcancen dichas temperaturas.
- El recipiente de medición que permite contener las muestras a ensayarse, deberá ser lavado cada vez que se coloque una nueva muestra, para eliminar cualquier resto de melazas con propiedades físico-químicas diferentes.

6. HUGOT, E. Manual para Ingenieros Azucareros. Segunda Edición. 1964. Pag 476 – 478.
7. KIRK RAYMOND, OTHMER DONALD. Enciclopedia de Tecnología Química. Segunda Edición. Tomo II y Tomo X. Pag 861 – 916 y 633 – 645 respectivamente.
8. LUNA CASTILLO, ANTONIO. Metodología de la Tesis. Editorial Trillas. D.F. México. 1996.
9. MANZANO, ELCIE. Estudio Microbiológico de las Melazas de Caña de Azúcar para Consumo Humano (Tesis, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Estatal de Guayaquil, 2001).
10. INGENIO LA TRONCAL. Dpto. Control de Producción. Manual de Análisis de Laboratorio. Métodos Tecnicañas. Pag 21 –28.
11. ROSABAL V. , JULIO. Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación. Habana – Cuba. 1988. Pag 173 – 183.
12. SKELLAND A.H.P. Non Newtonian Flow and Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc. United Stated of America. 1967. Pag 1 – 23.

13.VELES. MARGOT. Técnicas de Análisis Químico de Alimentos.

Imprenta Talleres Gráficas Martínez. Guayaquil- Ecuador. 2000.

14.VEB. MLW., PUFGERATE-WERK-MEDINGEN. SITZ FREITAL.

Manual del Viscosímetro (Rheotest).

15.ZAMBRANO, DICK. Guía de Física Experimental II. Editado por

Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador. 1995. Pag, 1-18.

# ANEXOS



## ANEXO A

### CONCEPTO DE FLUIDOS NEWTONIANOS

En los fluidos newtonianos, el esfuerzo de cizalla es directamente proporcional a la velocidad de deformación en cizalla (tangencial), cuya constante de proporcionalidad corresponde a la viscosidad, como indica el siguiente modelo reológico de Newton, el cual se utiliza para gases y líquidos sencillos (8).

$$\tau = \mu(-\delta u / \delta r)$$

$\tau$  = Esfuerzo de corte o cizalla

$\delta u / \delta r$  = Velocidad de deformación o corte de cizalla

$\mu$  = Viscosidad dinámica

ANEXO B

TABLA DE ESCALONAMIENTOS DE VELOCIDADES DE CORTE (Dr), EN FUNCIÓN DE LOS CILINDROS ROTATORIOS DEL RHEOTEST Y DE FRECUENCIA ELÉCTRICA (60 HERTZ).

VELOCIDADES DE CORTE (Dr ó dv/dr), EN FUNCIÓN DE 24 ESCALONAMIENTOS DE ENGRANAJES DE CAMBIO DE POSICIÓN (a) Y (b)						
SISTEMAS		S1	N	S2	S3	H
POSICIONES		Dr (1/s)				
1b		1,800	55,6	0,600	0,200	0,200
2b		3,240	30,86	1,080	0,360	0,360
	1a	3,600	27,78	1,200	0,400	0,400
3b		5,400	18,52	1,800	0,600	0,600
	2a	6,480	15,43	2,160	0,720	0,720
4b		9,720	10,29	3,240	1,080	1,080
	3a	10,80	9,26	3,600	1,200	1,200
5b		16,20	6,17	5,400	1,800	1,800
	4a	19,44	5,14	6,480	2,160	2,160
6b		29,16	3,43	9,720	3,240	3,240
	5a	32,40	3,086	10,80	3,600	3,600
7b		48,60	2,058	16,200	5,400	5,400
	6a	58,30	1,715	19,44	6,480	6,480
8b		87,5	1,143	29,16	9,72	9,72
	7a	97,20	1,029	32,40	10,80	10,80
9b		145,8	0,686	48,60	16,20	16,20
	8a	175,0	0,572	58,30	19,44	19,44
10b		262,4	0,3810	87,50	29,16	29,16
	9a	291,6	0,343	97,20	32,40	32,40
11b		437,4	0,2286	145,8	48,60	48,60
	10a	524,9	0,1905	175	58,30	58,30
12b		787	0,1270	262,4	87,50	87,50
	11a	875	0,1143	291,5	97,20	97,20
	12a	952,4	0,0535	525,0	175,0	175,0

Fuente: Manual del Viscosímetro Rheotest, VEB MLW, Prüfgerate-Werk Medingen, Sitz Freital (10)

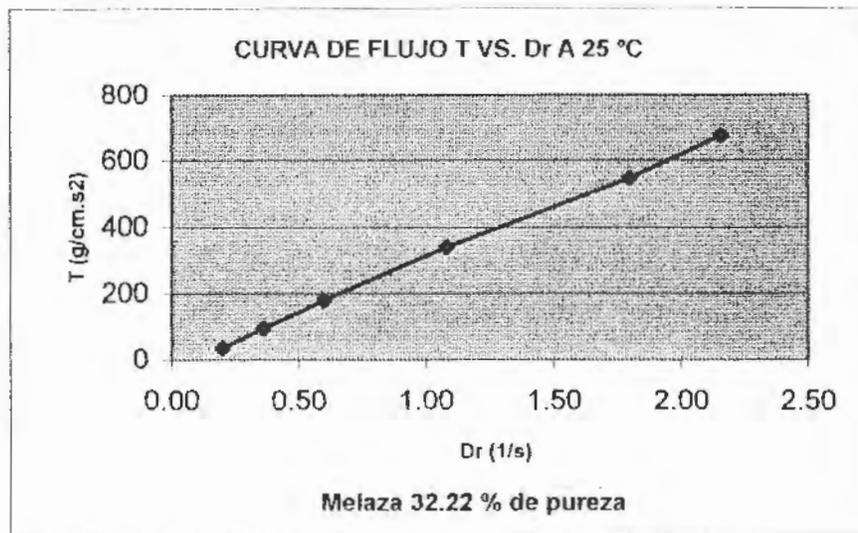
ANEXO C

LECTURAS TOMADAS (ALFAS\*) Y VARIABLES CALCULADAS (\*\*T, Y U); OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN DE POTENCIA A TRAVÉS DE REGRESIÓN LINEAL DE LAS CURVAS DE FLUJO DE LAS MUESTRAS °N 1 A 15, CALCULADAS A 25 °C

MUESTRA 1

Dr (1/s)	Z (dyn/cm <sup>2</sup> .s <sup>kt</sup> )	ALFA 1* (s <sup>kt</sup> ) +- 0.5	ALFA 2* (s <sup>kt</sup> ) +- 0.5	T** ( g/cm .s <sup>2</sup> ) +- 3.7	U = T/Dr*100 (cP)
0.20	7.39	5.0	4.0	37.0	18475.0
0.36	7.39	13.0	14.0	96.1	26686.1
0.60	7.39	24.5	24.0	181.1	30175.8
1.08	7.39	46.0	45.0	339.9	31475.9
1.80	7.39	74.0	74.0	546.9	30381.1
2.16	7.39	91.5	89.0	676.2	31304.9

\* Lecturas Alfas tomadas en viscosímetro: \*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente respectivamente

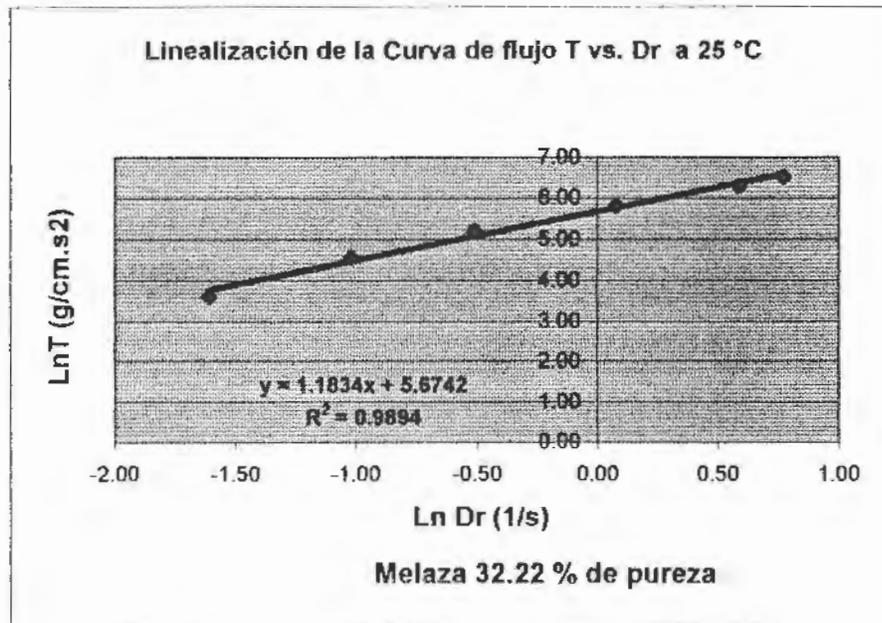


APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA

Dr (1/s)	T ( g/cm .s <sup>2</sup> )	ln Dr	ln T	T = K(Dr) <sup>n</sup> ln T = ln K + n ln Dr	n +- 0.063
0.20	37.0	-1.61	3.61	ln T = ln K + n ln Dr	1.1834
0.36	96.1	-1.02	4.57	<b>y = 1.1834x + 5.6742</b>	
0.60	181.1	-0.51	5.20	<b>R2 = 0.9894</b>	
1.08	339.9	0.08	5.83		
1.80	546.9	0.59	6.30		
2.16	676.2	0.77	6.52		

ln K	K +- 14.57	Dr	T =Z(ALFA*)	T = K(Dr)n	% de Error
		(1/s)	práctico (+-3.7)	teórico	
5.6742	291.3	0.20	37.0	43.4	14.7
		0.36	96.1	86.9	10.5
		0.60	181.1	159.1	13.8
		1.08	339.9	319.0	6.6
		1.80	546.9	583.9	6.3
		2.16	676.2	724.5	6.7
				Promedio-->	9.8

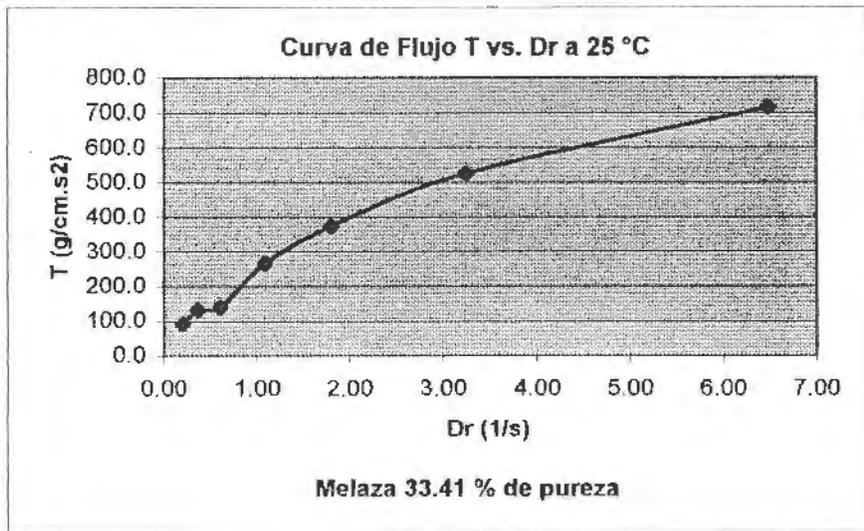
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



**MUESTRA 2**

Dr	Z	ALFA 1	ALFA 2	T	U = T/Dr*100
(1/s)	(dyn/cm2.skt)	(skt) +- 0.5	(skt) +- 0.5	( g/cm .s2) +-3.7	(cP)
0.20	7.39	12.00	12.50	90.5	45263.8
0.36	7.39	17.50	18.00	131.2	36436.8
0.60	7.39	23.50	14.00	138.6	23093.8
1.08	7.39	36.00	36.00	266.0	24633.3
1.80	7.39	50.00	51.00	373.2	20733.1
3.24	7.39	71.00	71.50	526.5	16251.2
6.48	7.39	98.00	96.00	716.8	11062.2

\* Lecturas tomadas en el Rheotest; \*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

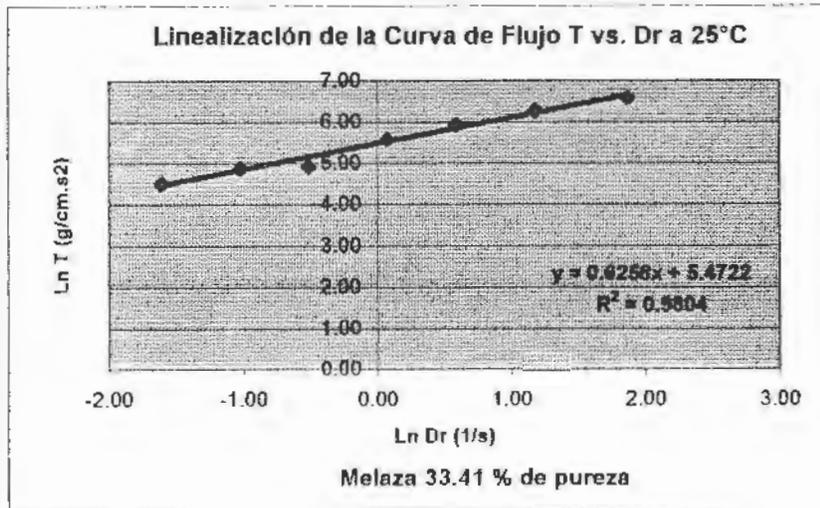


**APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA**

Dr (1/s)	T g/cm.s <sup>2</sup> )	ln Dr	ln T	T = K(Dr) <sup>n</sup> ln T = ln K + n ln Dr	n +- 0.023
0.20	90.5	-1.61	4.51	<b>y = 0.6258x + 5.4722</b>	<b>0.6258</b>
0.36	131.2	-1.02	4.88	<b>R2 = 0.9804</b>	
0.60	138.6	-0.51	4.93		
1.08	266.0	0.08	5.58		
1.80	373.2	0.59	5.92		
3.24	526.5	1.18	6.27		
6.48	716.8	1.87	6.57		

ln K	K +- 11.9	Dr (1/s)	T=Z(ALFA*) g/cm.s <sup>2</sup> (+-3.7)	T = K(Dr) <sup>n</sup> teórico	% de Error
5.4722	<b>237.98</b>	0.20	90.5	86.92	4.0
		0.36	131.2	125.57	4.3
		0.60	138.6	172.87	19.8
		1.08	266.0	249.73	6.1
		1.80	373.2	343.79	7.9
		3.24	526.5	496.64	5.7
		6.48	716.8	766.35	6.5
				Promedio —>	8.6

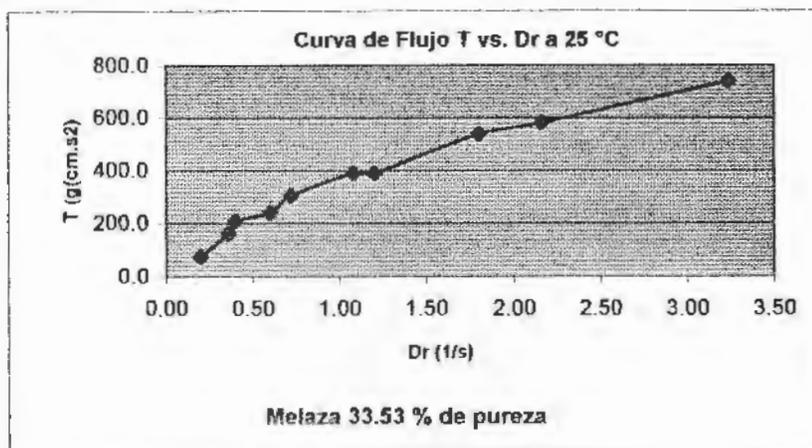
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



**MUESTRA 3**

Dr (1/s)	Z (dyn/cm2.skt)	ALFA 1 (skt) +- 0.5	ALFA 2 (skt) +- 0.5	T ( g/cm .s2) +-3.7	U = T/Dr*100 (cP)
0.20	7.39	10.50	10.00	75.7	37873.8
0.36	7.39	22.00	22.00	162.6	45161.1
0.40	7.39	28.50	28.00	208.8	52191.9
0.60	7.39	33.00	32.50	242.0	40337.1
0.72	7.39	41.00	41.00	303.0	42081.9
1.08	7.39	52.50	53.00	389.8	36094.7
1.20	7.39	52.00	53.00	388.0	32331.3
1.80	7.39	73.00	72.50	537.6	29867.9
2.16	7.39	78.00	79.00	580.1	26857.2
3.24	7.39	100.00	100.00	739.0	22808.6

\* Lecturas tomadas en el Rheotest,\*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

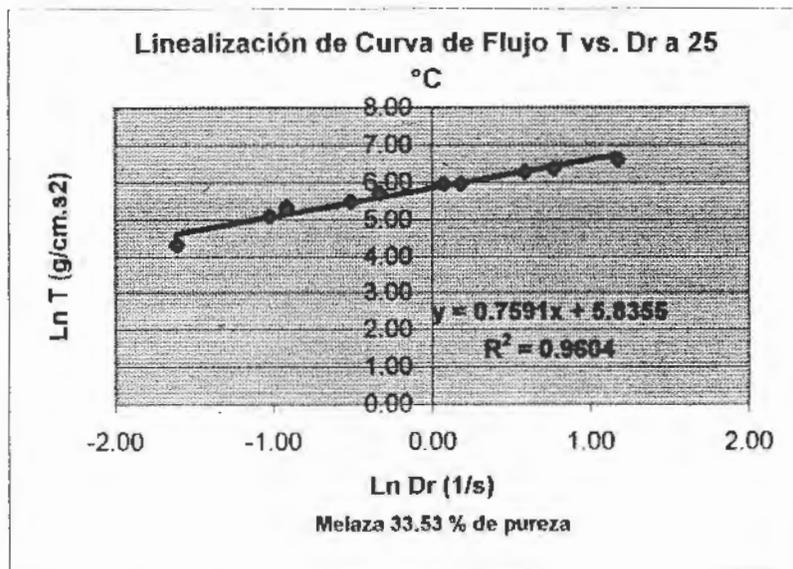


APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA

Dr (1/s)	T (g/cm .s <sup>2</sup> )	ln Dr	ln T	T = K(Dr) <sup>n</sup> ln T = ln K(Dr) <sup>n</sup> ln T = ln K + n ln Dr	n +- 0.032
0.20	75.7	-1.61	4.33	<b>y = 0.7591x + 5.8355</b> <b>R2 = 0.9604</b>	<b>0.7591</b>
0.36	162.6	-1.02	5.09		
0.40	208.8	-0.92	5.34		
0.60	242.0	-0.51	5.49		
0.72	303.0	-0.33	5.71		
1.08	389.8	0.08	5.97		
1.20	388.0	0.18	5.96		
1.80	537.6	0.59	6.29		
2.16	580.1	0.77	6.36		
3.24	739.0	1.18	6.61		

ln K	K +- 17.1	Dr (1/s)	T = Z(ALFA*) g/cm .s <sup>2</sup> +-3.	T = K(Dr) <sup>n</sup> teórico	% de Error Experimental
5.8355	<b>342.24</b>	0.20	75.7	100.86	24.9
		0.36	162.6	157.58	3.1
		0.40	208.8	170.71	18.2
		0.60	242.0	232.23	4.0
		0.72	303.0	266.70	12.0
		1.08	389.8	362.83	6.9
		1.20	388.0	393.04	1.3
		1.80	537.6	534.69	0.5
		2.16	580.1	614.06	5.5
		3.24	739.0	835.37	11.5
				Promedio ---->	8.8

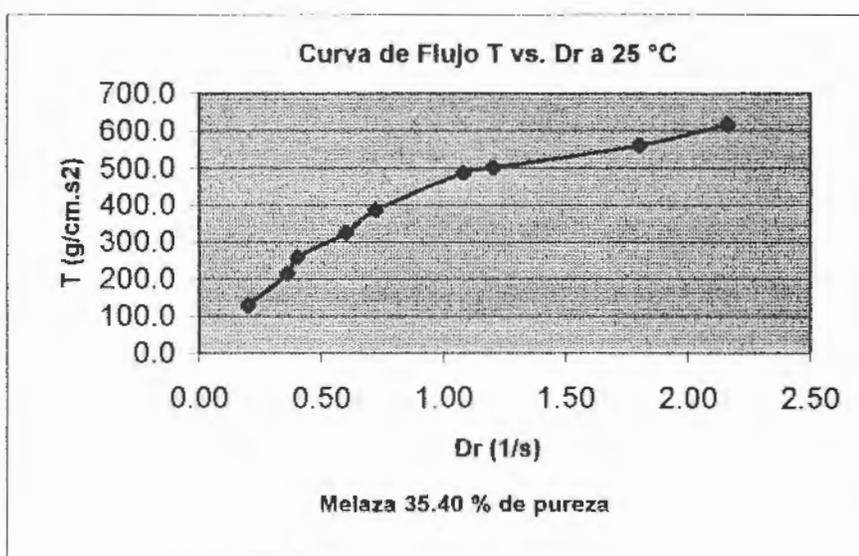
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



MUESTRA 4

Dr (1/s)	Z (dyn/cm <sup>2</sup> .s <sup>k</sup> )	ALFA 1 (s <sup>k</sup> ) +- 0.5	ALFA 2 (s <sup>k</sup> ) +- 0.5	T (g/cm .s <sup>2</sup> ) +-3.7	U = T/Dr*100 (cP)
0.20	7.39	17.00	18.00	129.3	64662.5
0.36	7.39	28.00	30.00	214.3	59530.6
0.40	7.39	35.00	35.00	258.7	64662.5
0.60	7.39	43.00	45.00	325.2	54193.3
0.72	7.39	53.00	52.00	388.0	53885.4
1.08	7.39	65.00	67.00	487.7	45161.1
1.20	7.39	68.00	68.00	502.5	41876.7
1.80	7.39	75.00	77.00	561.6	31202.2
2.16	7.39	82.00	85.00	617.1	28567.8

\* Lecturas tomadas en el Rheotest; \*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

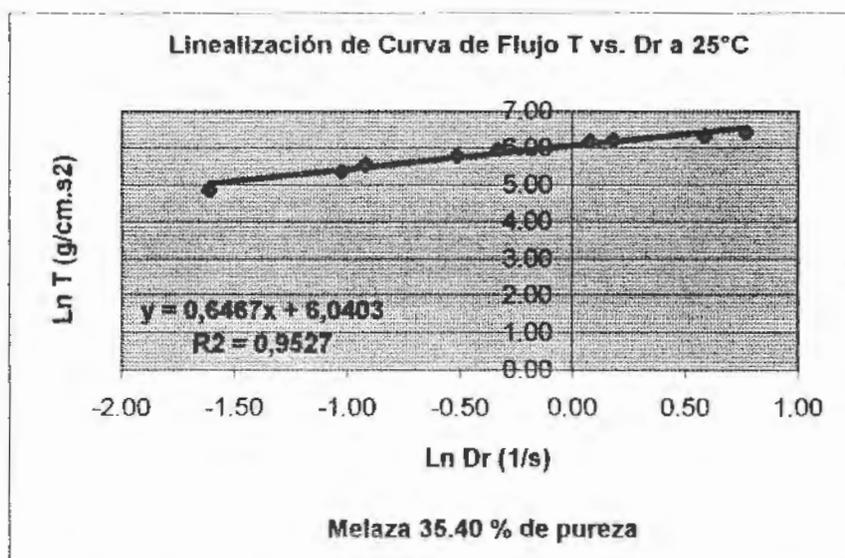


APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA

Dr (1/s)	T (g/cm .s <sup>2</sup> )	ln Dr	ln T	T = K(Dr) <sup>n</sup> ln T = ln K + n ln Dr	n +- 0.052
0.20	129.3	-1.61	4.86	y = 0,6467x + 6,0403 R2 = 0,9527	0.6467
0.36	214.3	-1.02	5.37		
0.40	258.7	-0.92	5.56		
0.60	325.2	-0.51	5.78		
0.72	388.0	-0.33	5.96		
1.08	487.7	0.08	6.19		
1.20	502.5	0.18	6.22		
1.80	561.6	0.59	6.33		
2.16	617.1	0.77	6.42		

In K	K +- 21,0	Dr (1/s)	T = Z(ALFA*) g/cm .s2) +-3.	T = K(Dr)n teórico	% de Error Experimental
6.0403	<b>420.02</b>	0.20	129.3	148.34	12.82
		0.36	214.3	216.94	1.21
		0.40	258.7	232.23	10.21
		0.60	325.2	301.86	7.17
		0.72	388.0	339.63	12.46
		1.08	487.7	441.45	9.49
		1.20	502.5	472.58	5.96
		1.80	561.6	614.26	8.57
		2.16	617.1	691.13	10.72
				Promedio-->	8.73

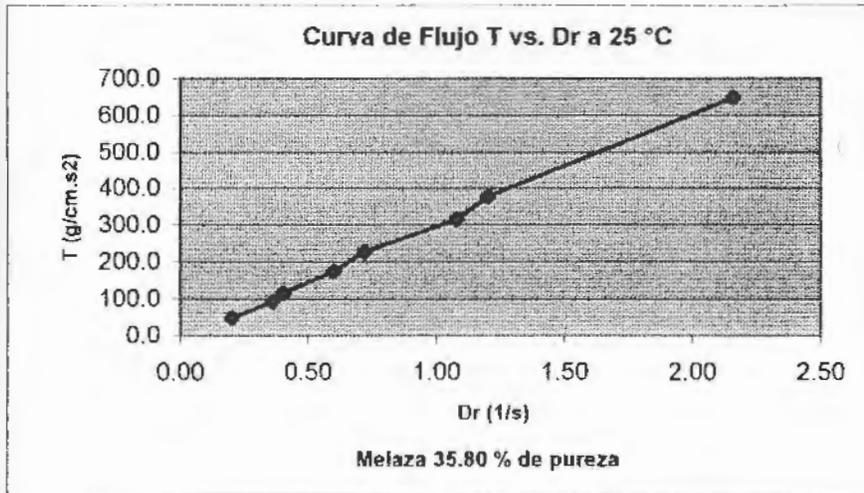
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



#### MUESTRA 5

Dr (1/s)	Z (dyn/cm2.skt)	ALFA 1 (skt) +- 0.5	ALFA 2 (skt) +- 0.5	T ( g/cm .s2) +-3.7	U = T/Dr* 100 (cP)
0.20	7.39	6.0	7.0	48.0	24017.5
0.36	7.39	12.0	13.0	92.4	25659.7
0.40	7.39	16.0	15.0	114.5	28636.3
0.60	7.39	24.0	23.5	175.5	29252.1
0.72	7.39	31.5	30.0	227.2	31561.5
1.08	7.39	43.0	42.0	314.1	29081.0
1.20	7.39	52.0	50.0	376.9	31407.5
2.16	7.39	87.5	88.0	648.5	30021.9

\* Lecturas tomadas en el Rheotest; \*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

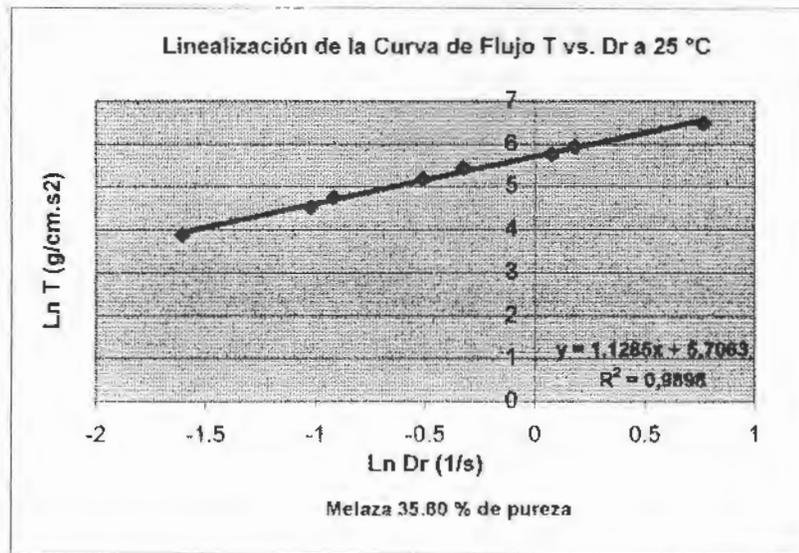


APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA

Dr (1/s)	T (g/cm .s2)	ln Dr	ln T	T = K(Dr)n ln T = ln K + n ln Dr	n +- 0.014
0.20	48.0	-1.61	3.87	<b>y = 1,1285x + 5,7063</b> <b>R2 = 0,9898</b>	<b>1.1285</b>
0.36	92.4	-1.02	4.53		
0.40	114.5	-0.92	4.74		
0.60	175.5	-0.51	5.17		
0.72	227.2	-0.33	5.43		
1.08	314.1	0.08	5.75		
1.20	376.9	0.18	5.93		
2.16	648.5	0.77	6.47		

ln K	K +- 15.04	Dr (1/s)	T = Z(ALFA*) g/cm .s2) +-3.	T = K(Dr)n teórico	% de Error Experimental
5.7063	<b>300.76</b>	0.20	48.0	48.91	1.8
		0.36	92.4	94.95	2.7
		0.40	114.5	106.94	6.6
		0.60	175.5	168.99	3.7
		0.72	227.2	207.59	8.6
		1.08	314.1	328.04	4.3
		1.20	376.9	369.46	2.0
		2.16	648.5	717.21	9.6
				Promedio ---->	4.9

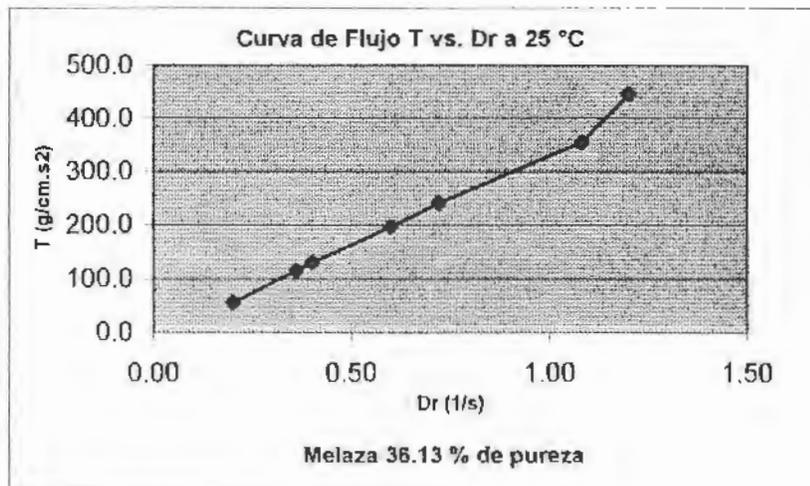
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



**MUESTRA 6**

Dr (1/s)	Z (dyn/cm2.skt)	ALFA 1 (skt) +/- 0.5	ALFA 2 (skt) +/- 0.5	T ( g/cm .s2) +3.7	U = T/Dr*100 (cP)
0.20	7.39	8.0	7.0	55.4	27712.5
0.36	7.39	15.0	16.0	114.5	31818.1
0.40	7.39	17.0	18.0	129.3	32331.3
0.60	7.39	26.0	27.0	195.8	32639.2
0.72	7.39	32.0	33.0	240.2	33357.6
1.08	7.39	48.0	48.0	354.7	32844.4
1.20	7.39	61.0	60.0	447.1	37257.9
1.80	7.39	99.0	98.0	727.9	40439.7

\* Lecturas tomadas en el Rheotest;\*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

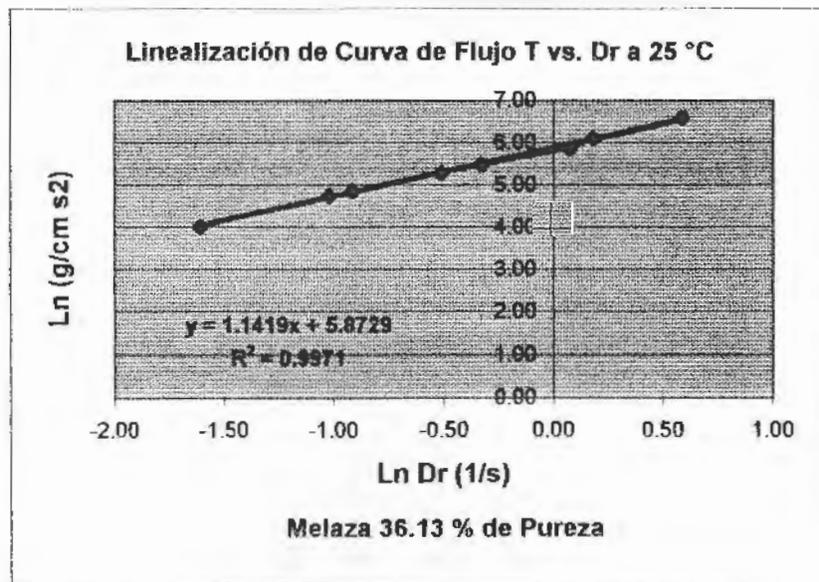


APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA

Dr (1/s)	T (g/cm .s <sup>2</sup> )	ln Dr	ln T	T = K(Dr) <sup>n</sup> ln T = ln K + n ln Dr	n +- 0.07
0.20	55.4	-1.61	4.02	<b>y = 1.1419x + 5.8729</b> <b>R2 = 0.9971</b>	<b>1.1419</b>
0.36	114.5	-1.02	4.74		
0.40	129.3	-0.92	4.86		
0.60	195.8	-0.51	5.28		
0.72	240.2	-0.33	5.48		
1.08	354.7	0.08	5.87		
1.20	447.1	0.18	6.10		
1.80	727.9	0.59	6.59		

ln K	K +- 17.77	Dr (1/s)	T =Z(ALFA*) g/cm .s <sup>2</sup> +- 3.	T = K(Dr) <sup>n</sup> teórico	% de Error
5.8729	<b>355.28</b>	0.20	55.4	56.55	2.0
		0.36	114.5	110.64	3.4
		0.40	129.3	124.78	3.5
		0.60	195.8	198.26	1.2
		0.72	240.2	244.15	1.6
		1.08	354.7	387.91	8.6
		1.20	447.1	437.51	2.1
		1.80	727.9	695.13	4.5
				Promedio --->	3.4

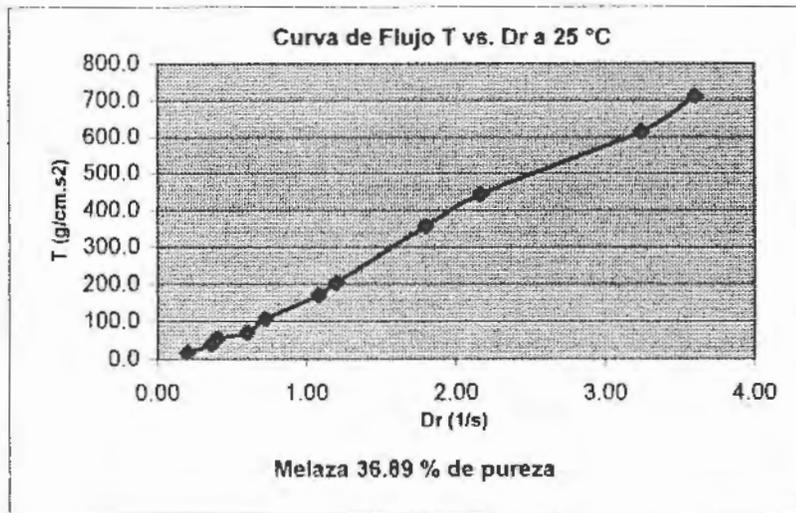
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



MUESTRA 7

Dr	Z	ALFA 1	ALFA 2	T	U = T/Dr*100
(1/s)	(dyn/cm2.skt)	(skt) +- 0.5	(skt) +- 0.5	( g/cm .s2) +- 3.7	(cP)
0.20	7.39	2.0	2.5	16.6	8313.8
0.36	7.39	5.0	6.0	40.6	11290.3
0.40	7.39	8.0	7.0	55.4	13856.3
0.60	7.39	9.0	10.0	70.2	11700.8
0.72	7.39	14.0	15.0	107.2	14882.6
1.08	7.39	23.0	23.0	170.0	15738.0
1.20	7.39	28.0	27.0	203.2	16935.4
1.80	7.39	49.0	47.5	356.6	19809.3
2.16	7.39	61.0	59.0	443.4	20527.8
3.24	7.39	84.0	82.5	615.2	18988.2
3.60	7.390	97.0	96.0	713.1	19809.3

lecturas tomadas en el Rheotest; \*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

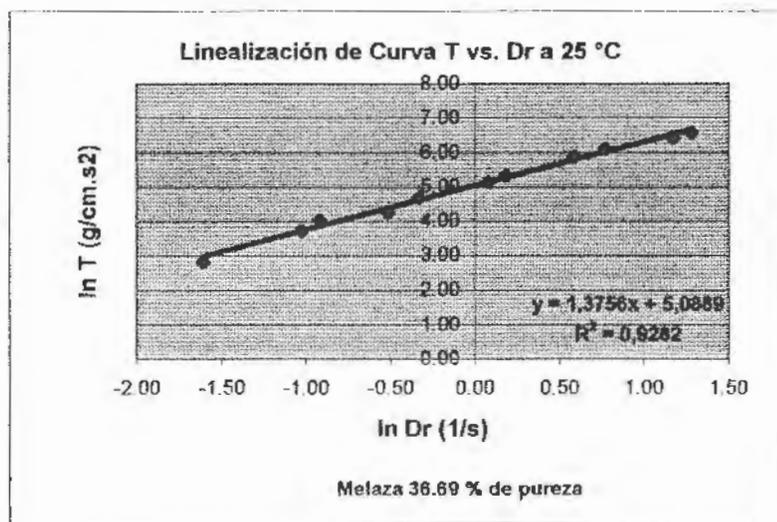


APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA

Dr	T	ln Dr	ln T	T = K(Dr) <sup>n</sup>	n +- 0.06
(1/s)	( g/cm .s2)			ln T = ln K + n ln Dr	
0.20	16.6	-1.61	2.81	y = 1,3756x + 5,0889	1.3756
0.36	40.6	-1.02	3.70		
0.40	55.4	-0.92	4.02	R2 = 0,9282	
0.60	70.2	-0.51	4.25		
0.72	107.2	-0.33	4.67		
1.08	170.0	0.08	5.14		
1.20	203.2	0.18	5.31		
1.80	356.6	0.59	5.88		
2.16	443.4	0.77	6.09		
3.24	615.2	1.18	6.42		
3.60	713.1	1.28	6.57		

In K	K +- 8.11	Dr (1/s)	T = Z(ALFA*) g/cm .s2) +- 3.	T = K(Dr)n teórico	% de Error
5.0889	162.21	0.20	16.6	17.72	6.2
		0.36	40.6	39.79	2.1
		0.40	55.4	45.99	17.0
		0.60	70.2	80.34	12.6
		0.72	107.2	103.24	3.7
		1.08	170.0	180.33	5.7
		1.20	203.2	208.45	2.6
		1.80	356.6	364.11	2.1
		2.16	443.4	467.90	5.2
		3.24	615.2	817.31	24.7
		3.60	713.1	944.78	24.5
				Promedio----->	9.7

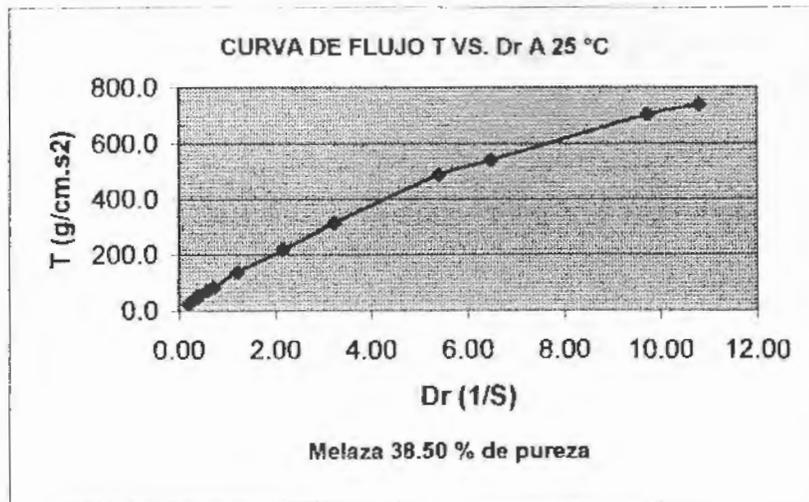
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



#### MUESTRA 8

Dr (1/s)	Z (dyn/cm2.skt)	ALFA 1 (skt) +- 0.5	ALFA 2 (skt) +- 0.5	T ( g/cm .s2) +-3.7	U = T/Dr*100 (cP)
0.20	7.39	3.50	3.00	24.0	12008.8
0.36	7.39	6.00	6.00	44.3	12316.7
0.40	7.39	7.00	7.50	53.6	13394.4
0.60	7.39	10.00	9.50	72.1	12008.8
0.72	7.39	11.00	12.00	85.0	11803.5
1.20	7.39	17.50	20.00	138.6	11546.9
2.16	7.39	30.00	29.00	218.0	10092.8
3.24	7.39	42.00	43.00	314.1	9693.7
5.40	7.39	65.00	67.00	487.7	9032.2
6.48	7.39	73.00	73.00	539.5	8325.2
9.72	7.39	95	95	702.1	7222.7
10.8	7.39	100	100	739.0	6842.6

\* Lecturas tomadas en el Rheotest; \*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

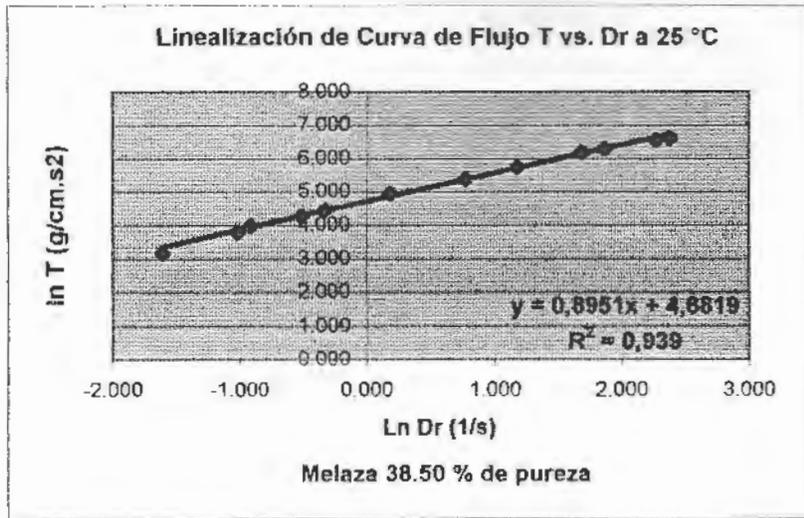


**APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA**

Dr (1/s)	T (g/cm .s2)	ln Dr	ln T	T = K(Dr)n ln T = ln K + n ln Dr	n +- 0.05
0.20	24.0	-1.609	3.179	<b>y = 0,8951x + 4,6819</b> <b>R2 = 0,939</b>	<b>0.8951</b>
0.36	44.3	-1.022	3.792		
0.40	53.6	-0.916	3.981		
0.60	72.1	-0.511	4.277		
0.72	85.0	-0.329	4.442		
1.20	138.6	0.182	4.931		
2.16	218.0	0.770	5.385		
3.24	314.1	1.176	5.750		
5.40	487.7	1.686	6.190		
6.48	539.5	1.869	6.291		
9.72	702.1	2.274	6.554		
10.8	739.0	2.380	6.605		

ln K	K +- 5.40	Dr (1/s)	T =Z(ALFA*) g/cm .s2) +-3.	T = K(Dr)n teórico	% de Eror
4.6819	<b>107.98</b>	0.20	24.0	25.57	6.1
		0.36	44.3	43.27	2.4
		0.40	53.6	47.55	11.3
		0.60	72.1	68.35	5.1
		0.72	85.0	80.47	5.3
		1.20	138.6	127.12	8.3
		2.16	218.0	215.13	1.3
		3.24	314.1	309.25	1.5
		5.40	487.7	488.53	0.2
		6.48	539.5	575.13	6.2
		9.72	702.1	826.77	15.1
		10.8	739.0	908.53	18.7
				Promedio -->	<b>6.8</b>

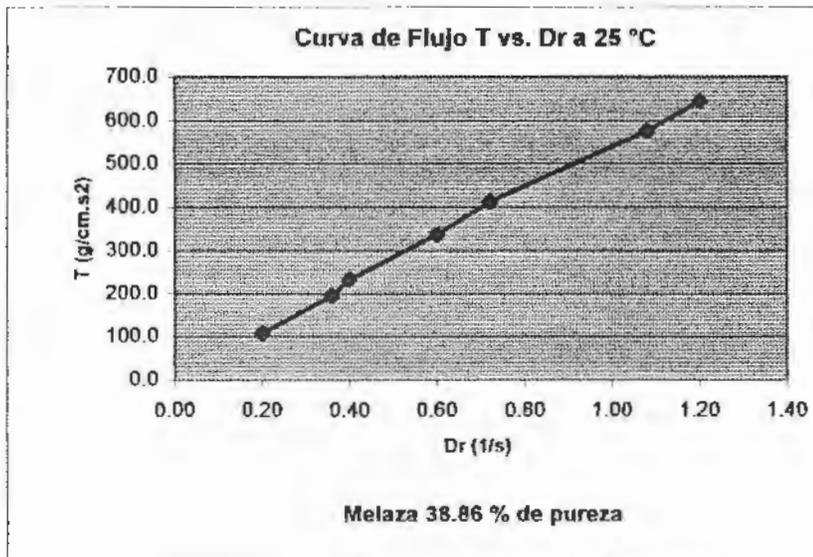
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



**MUESTRA 9**

Dr (1/s)	Z (dyn/cm2.skt)	ALFA 1 (skt) +/- 0.5	ALFA 2 (skt) +/- 0.5	T ( g/cm .s2) +/-3.7	U = T/Dr*100 (cP)
0.20	7.39	15.0	14.0	107.2	53577.5
0.36	7.39	27.5	25.0	194.0	53885.4
0.40	7.39	32.0	31.0	232.8	58196.3
0.60	7.39	46.5	44.5	336.2	56040.8
0.72	7.39	56.5	55.0	412.0	57221.2
1.08	7.39	79.0	77.0	576.4	53372.2
1.20	7.39	88.5	86.0	644.8	53731.5

\* Lecturas tomadas en el Rheotest;\*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

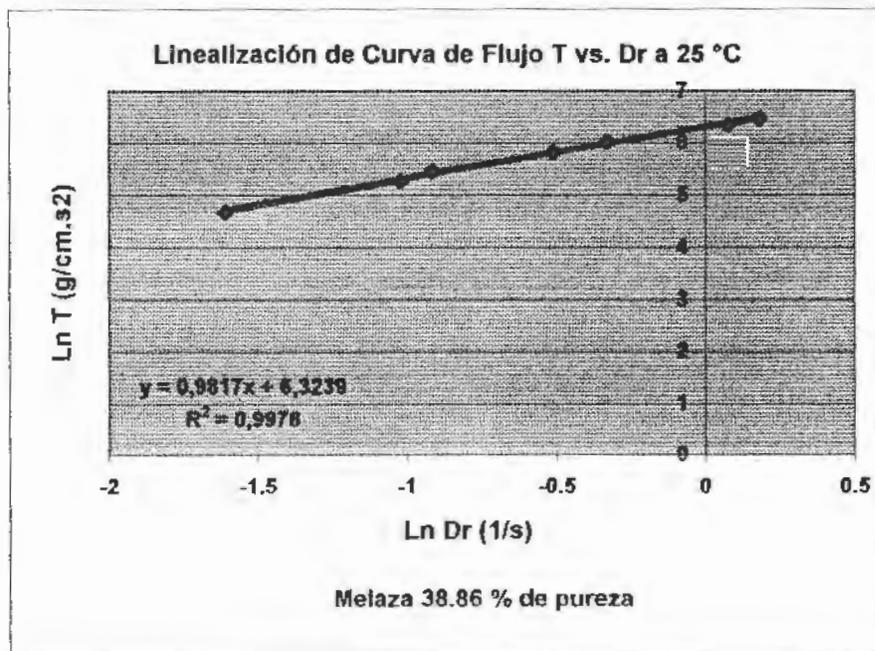


APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA

Dr	T	ln Dr	ln T	T = K(Dr)n ln T = ln K + n ln Dr	n +- 0.013
(1/s)	(g/cm.s <sup>2</sup> )				
0.20	107.2	-1.609	4.674		0.9817
0.36	194.0	-1.022	5.268	<b>y = 0,9817x + 6,3239</b>	
0.40	232.8	-0.916	5.450	<b>R2 = 0,9976</b>	
0.60	336.2	-0.511	5.818		
0.72	412.0	-0.329	6.021		
1.08	576.4	0.077	6.357		
1.20	644.8	0.182	6.469		

ln K	K +- 27.9	Dr	T = Z(ALFA*) g/cm.s <sup>2</sup> +-3.	T = K(Dr)n teórico	% de Error Experimental
6.3239	<b>557.74</b>	0.20	107.2	114.88	6.7
		0.36	194.0	204.58	5.2
		0.40	232.8	226.87	2.5
		0.60	336.2	337.79	0.5
		0.72	412.0	404.00	1.9
		1.08	576.4	601.52	4.2
		1.20	644.8	667.06	3.3
				Promedio---->	3.5

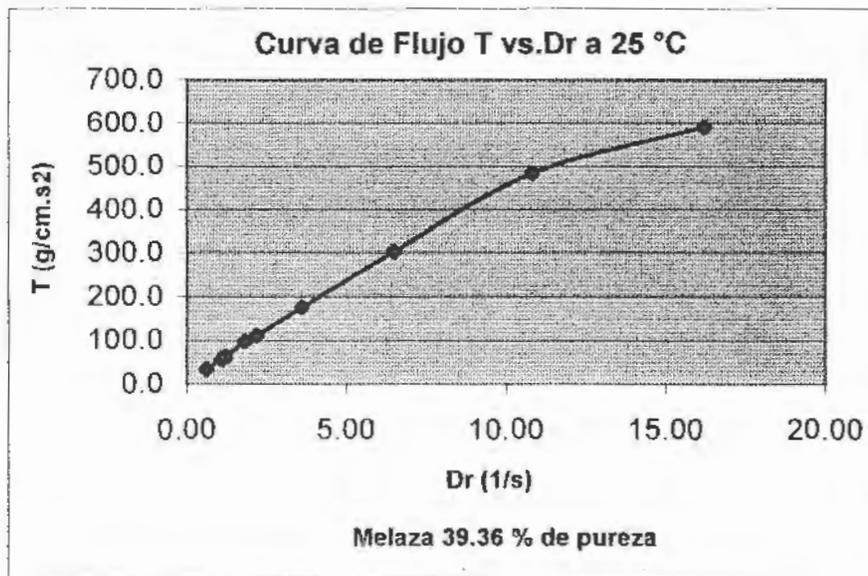
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



MUESTRA 10

Dr (1/s)	Z (dyn/cm <sup>2</sup> .s <sup>kt</sup> )	ALFA 1 (s <sup>kt</sup> ) +/- 0.5	ALFA 2 (s <sup>kt</sup> ) +/- 0.5	T (g/cm .s <sup>2</sup> ) +3	U = T/Dr <sup>n</sup> 100 (cP)
0.60	5.93	5.50	6.00	34.1	5682.9
1.08	5.93	10.00	9.00	56.3	5216.2
1.20	5.93	11.00	10.00	62.3	5188.8
1.80	5.93	16.00	17.00	97.8	5435.8
2.16	5.93	18.50	19.00	111.2	5147.6
3.60	5.93	30.00	29.50	176.4	4900.5
6.48	5.93	50.00	52.00	302.4	4667.1
10.8	5.93	82.00	81.00	483.3	4475.0
16.2	5.93	100.00	99.00	590.0	3642.2

\* Lecturas tomadas en el Rheotest; \*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

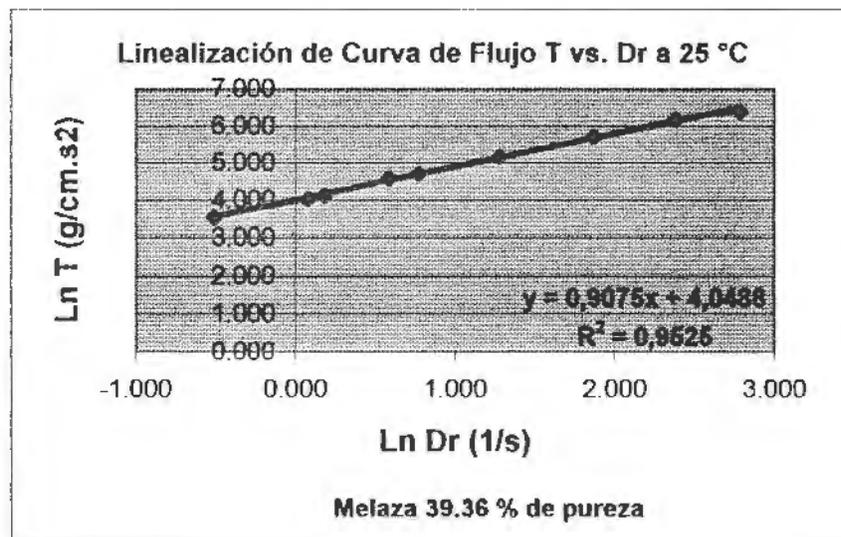


**APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS  
POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA**

Dr (1/s)	T (g/cm .s <sup>2</sup> )	ln Dr	ln T	T = K(Dr) <sup>n</sup> ln T = ln K + n ln Dr	n +/- 0.10
0.60	34.1	-0.511	3.529	<b>y = 0,9075x + 4,0488</b> <b>R2 = 0,9525</b>	<b>0.9075</b>
1.08	56.3	0.077	4.031		
1.20	62.3	0.182	4.131		
1.80	97.8	0.588	4.583		
2.16	111.2	0.770	4.711		
3.60	176.4	1.281	5.173		
6.48	302.4	1.869	5.712		
10.8	483.3	2.380	6.181		
16.2	590.0	2.785	6.380		

ln K	K +/- 2.9	Dr (1/s)	T = Z(ALFA*) ( g/cm .s2) +- 3	T = K(Dr)n teórico	% de Error Experimental
4.0488	57.33	0.60	34.1	36.06	5.45
		1.08	56.3	61.48	8.36
		1.20	62.3	67.64	7.95
		1.80	97.8	97.73	0.12
		2.16	111.2	115.32	3.58
		3.60	176.4	183.32	3.77
		6.48	302.4	312.52	3.23
		10.8	483.3	496.83	2.72
		16.2	590.0	717.80	17.80
				Promedio---->	5.89

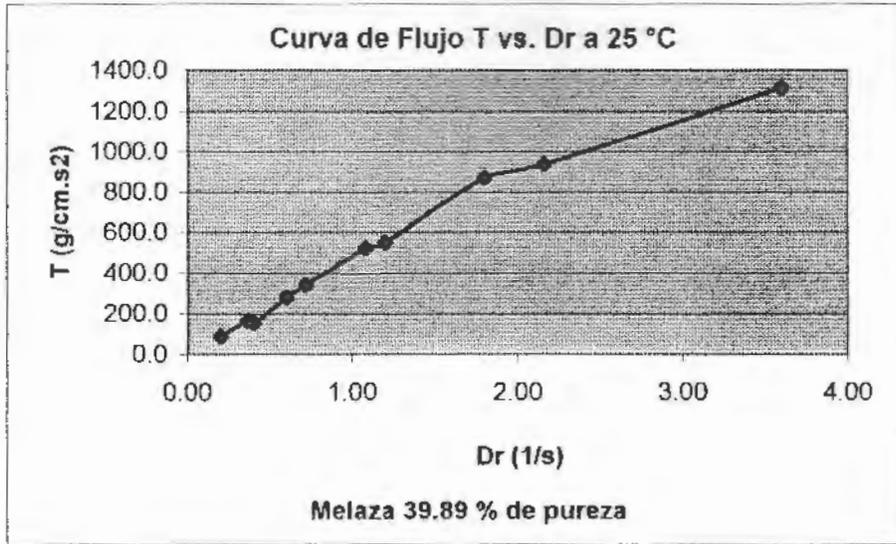
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



**MUESTRA 11**

Dr (1/s)	Z (dyn/cm2.skt)	ALFA 1 (skt) +- 0.5	ALFA 2 (skt) +- 0.5	T ( g/cm .s2) +-13.4	U = T/Dr*100 (cP)
0.20	26.8	3.50	3.00	87.1	43550.0
0.36	26.8	6.50	6.00	167.5	46527.8
0.40	26.8	6.00	5.50	154.1	38525.0
0.60	26.8	10.00	11.00	281.4	46900.0
0.72	26.8	12.50	13.00	341.7	47458.3
1.08	26.8	19.00	20.00	522.6	48388.9
1.20	26.8	20.00	21.00	549.4	45783.3
1.80	26.8	32.00	33.00	871.0	48388.9
2.16	26.8	36.00	34.00	938.0	43425.9
3.60	26.8	50.00	48.00	1313.2	36477.8

lecturas tomadas en el Rheotest; \*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

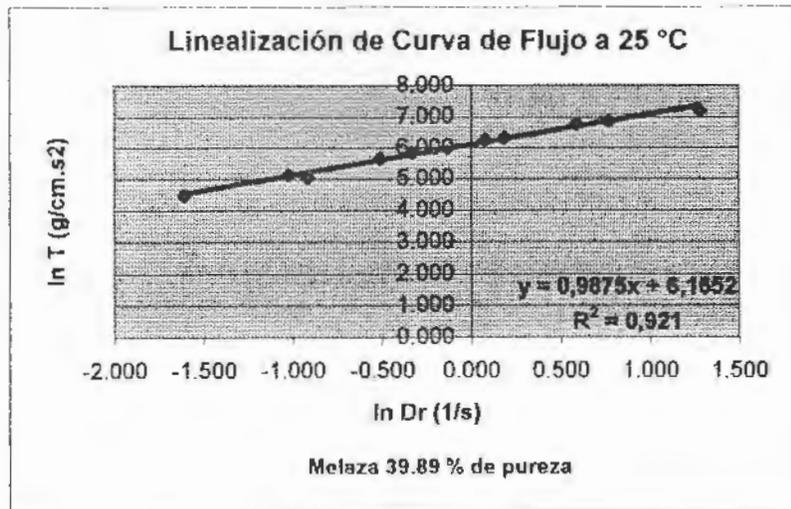


**APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA**

Dr (1/s)	T (g/cm .s2)	ln Dr	ln T	T = K(Dr)n ln T = ln K + n ln Dr	n +/- 0.012
0.20	87.1	-1.609	4.467	<b>y = 0,9875x + 6,1652</b> <b>R2 = 0,921</b>	<b>0.9875</b>
0.36	167.5	-1.022	5.121		
0.40	154.1	-0.916	5.038		
0.60	281.4	-0.511	5.640		
0.72	341.7	-0.329	5.834		
1.08	522.6	0.077	6.259		
1.20	549.4	0.182	6.309		
1.80	871.0	0.588	6.770		
2.16	938.0	0.770	6.844		
3.60	1313.2	1.281	7.180		

ln K	K +/- 23.8	Dr (1/s)	T = Z(ALFA*) g/cm .s2) +/-13.	T = K(Dr)n teórico	% de Error Experimental
6.1652	<b>475.90</b>	0.20	87.1	97.11	10.31
		0.36	167.5	173.52	3.47
		0.40	154.1	192.55	19.97
		0.60	281.4	287.37	2.08
		0.72	341.7	344.06	0.68
		1.08	522.6	513.47	1.75
		1.20	549.4	569.78	3.58
		1.80	871.0	850.34	2.37
		2.16	938.0	1018.09	7.87
		3.60	1313.2	1686.01	22.11
				Promedio ->	7.42

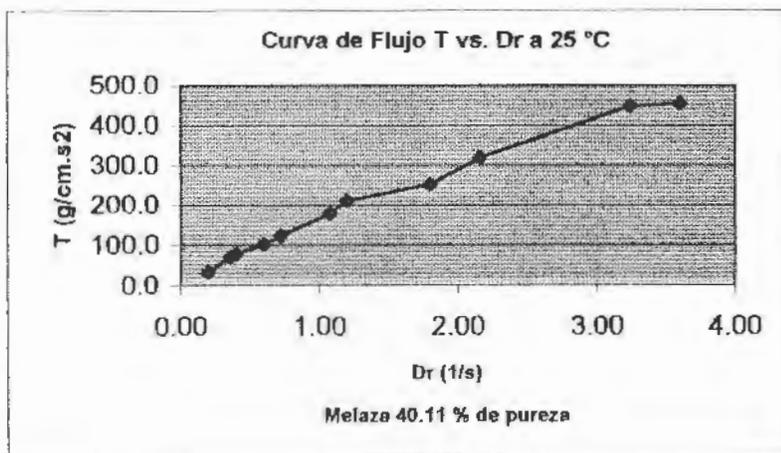
**ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.**



#### MUESTRA 12

Dr (1/s)	Z (dyn/cm2.skt)	ALFA 1 (skt) +- 0.5	ALFA 2 (skt) +- 0.5	T ( g/cm .s2) +-3.7	U = T/Dr*100 (cP)
0.20	7.39	5.00	4.00	33.3	16627.5
0.36	7.39	9.00	10.00	70.2	19501.4
0.40	7.39	10.00	11.00	77.6	19398.8
0.60	7.39	13.50	14.00	101.6	16935.4
0.72	7.39	15.00	18.00	121.9	16935.4
1.08	7.39	23.00	25.00	177.4	16422.2
1.20	7.39	27.00	30.00	210.6	17551.3
1.80	7.39	35.00	33.00	251.3	13958.9
2.16	7.39	44.00	42.00	317.8	14711.6
3.24	7.39	61.00	60.00	447.1	13799.2
3.60	7.39	62.00	61.00	454.5	12624.6

\* Lecturas tomadas en el Rheotest;\*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

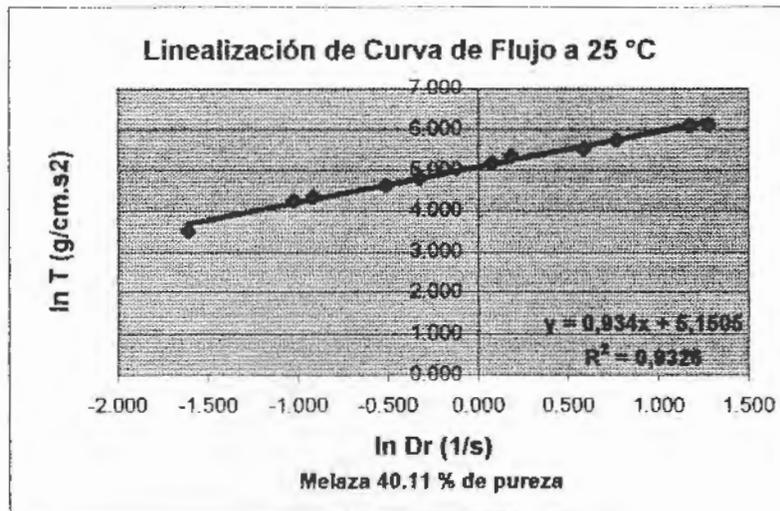


APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS  
POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA

Dr	T	ln Dr	ln T	T = K(Dr)n	n +/- 0.06
(1/s)	(g/cm .s2)			ln T = ln K(Dr)n	
0.20	33.3	-1.609	3.504	ln T = ln K + n ln Dr	0.934
0.36	70.2	-1.022	4.251	y = 0,934x + 5,1505	
0.40	77.6	-0.916	4.352	R2 = 0,9326	
0.60	101.6	-0.511	4.621		
0.72	121.9	-0.329	4.803		
1.08	177.4	0.077	5.178		
1.20	210.6	0.182	5.350		
1.80	251.3	0.588	5.526		
2.16	317.8	0.770	5.761		
3.24	447.1	1.176	6.103		
3.60	454.5	1.281	6.119		

ln K	K+/- 8.63	Dr	T = Z(ALFA*)	T = K(Dr)n	% de Error
		(1/s)	g/cm .s2) +3.	teórico	Relativo
5.1505	172.52	0.20	33.3	38.37	13.33
		0.36	70.2	66.44	5.36
		0.40	77.6	73.31	5.52
		0.60	101.6	107.06	5.09
		0.72	121.9	126.94	3.94
		1.08	177.4	185.38	4.32
		1.20	210.6	204.55	2.88
		1.80	251.3	298.72	15.89
		2.16	317.8	354.17	10.28
		3.24	447.1	517.23	13.56
		3.60	454.5	570.72	9.02
				Promedio ---->	8.02

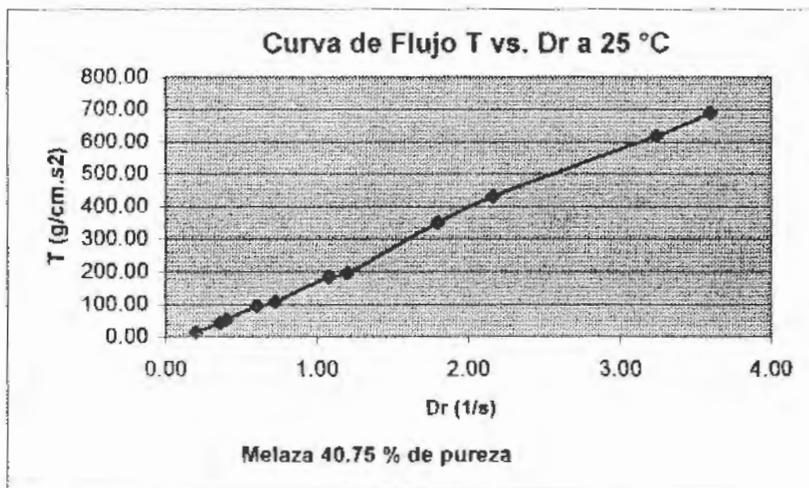
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



MUESTRA 13

Dr (1/s)	Z (dyn/cm <sup>2</sup> .skt)	ALFA 1 (skt) +/- 0.5	ALFA 2 (skt) +/- 0.5	T (g/cm .s <sup>2</sup> ) +/-3.7	U = T/Dr <sup>100</sup> (cP)
0.20	7.39	2.00	1.50	12.93	6466.25
0.36	7.39	6.00	5.50	42.49	11803.5
0.40	7.39	7.00	7.00	51.73	12932.5
0.60	7.39	12.00	13.50	94.22	15703.8
0.72	7.39	14.00	15.00	107.16	14882.6
1.08	7.39	24.00	26.00	184.75	17106.5
1.20	7.39	26.00	27.00	195.84	16319.6
1.80	7.39	47.50	47.00	349.18	19398.8
2.16	7.39	59.50	57.00	430.47	19929.1
3.24	7.39	84.00	83.00	617.07	19045.2
3.60	7.39	94.00	92.50	689.12	19142.2

Lecturas tomadas en el Rheotest,\*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

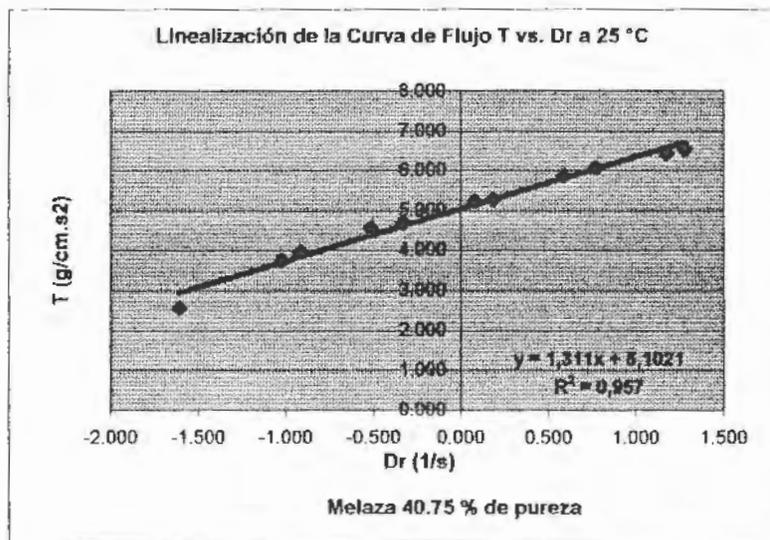


**APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA**

Dr (1/s)	T (g/cm .s <sup>2</sup> )	ln Dr	ln T	T = K(Dr) <sup>n</sup> ln T = ln K + n ln Dr	n +/- 0.070
0.20	12.93	-1.609	2.560	ln T = ln K + n ln Dr	1.311
0.36	42.49	-1.022	3.749	y = 1,311x + 5,1021	
0.40	51.73	-0.916	3.946	R <sup>2</sup> = 0,957	
0.60	94.22	-0.511	4.546		
0.72	107.16	-0.329	4.674		
1.08	184.75	0.077	5.219		
1.20	195.84	0.182	5.277		
1.80	349.18	0.588	5.856		
2.16	430.47	0.770	6.065		
3.24	617.07	1.176	6.425		
3.60	689.12	1.281	6.535		

In K	K +- 8.2	Dr (1/s)	T = Z(ALFA*) g/cm .s2) +-3.	T = K(Dr)n teórico	% de Error Experimental
5.1021	164.37	0.20	12.93	19.93	35.10
		0.36	42.49	43.07	1.33
		0.40	51.73	49.44	4.42
		0.60	94.22	84.13	10.71
		0.72	107.16	106.85	0.28
		1.08	184.75	181.82	1.59
		1.20	195.84	208.75	6.19
		1.80	349.18	355.20	1.70
		2.16	430.47	451.11	4.58
		3.24	617.07	767.61	19.61
		3.60	689.12	881.31	8.55
				Promedio ----->	8.55

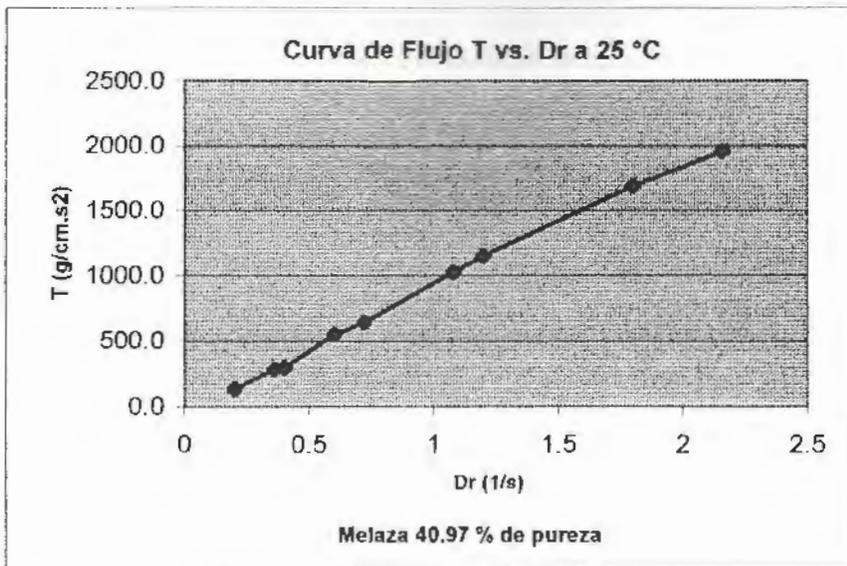
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



**MUESTRA 14**

Dr (1/s)	Z (dyn/cm2.skt)	ALFA 1 (skt) +- 0.5	ALFA 2 (skt) +- 0.5	T ( g/cm .s2) +- 13.4	U = T/Dr*100 (cP)
0.2	26.8	5.00	5.50	134.0	67000.0
0.36	26.8	10.50	11.00	281.4	78166.7
0.40	26.8	11.00	13.00	294.8	73700.0
0.60	26.8	20.50	21.00	549.4	91566.7
0.72	26.8	24.00	25.00	643.2	89333.3
1.08	26.8	38.50	39.00	1031.8	95537.0
1.20	26.8	43.00	41.00	1152.4	96033.3
1.80	26.8	63.00	63.00	1688.4	93800.0
2.16	26.8	73.00	72.50	1956.4	90574.1

\* Lecturas tomadas en el Rheotest,\*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

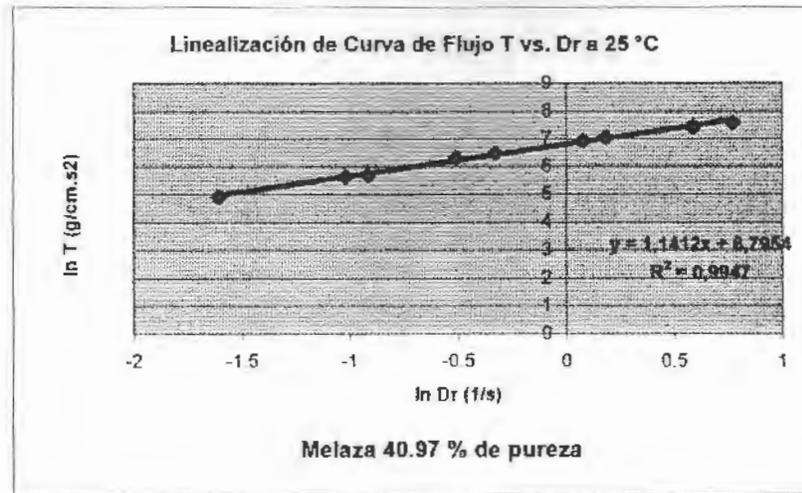


**APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA**

Dr (1/s)	T (g/cm .s2)	ln Dr	ln T	T = K(Dr)n ln T = ln K + n ln Dr	n +- 0.07
0.2	134.0	-1.609	4.898	<b>y = 1,1412x + 6,7954</b> <b>R2 = 0,9947</b>	<b>1.1412</b>
0.36	281.4	-1.022	5.640		
0.40	294.8	-0.916	5.686		
0.60	549.4	-0.511	6.309		
0.72	643.2	-0.329	6.466		
1.08	1031.8	0.077	6.939		
1.20	1152.4	0.182	7.050		
1.80	1688.4	0.588	7.432		
2.16	1956.4	0.770	7.579		

ln K	K +- 44.7	Dr (1/s)	T = Z(ALFA*) g/cm .s2 +- 13	T = K(Dr)n teórico	% de Error Experimental
6.7954	<b>893.73</b>	0.2	134.0	142.41	5.91
		0.36	281.4	278.52	1.02
		0.40	294.8	314.11	6.15
		0.60	549.4	498.92	9.19
		0.72	643.2	614.32	4.49
		1.08	1031.8	975.77	5.43
		1.20	1152.4	1100.44	4.51
		1.80	1688.4	1747.92	3.41
		2.16	1956.4	2152.20	9.10
				Promedio -->	5.47

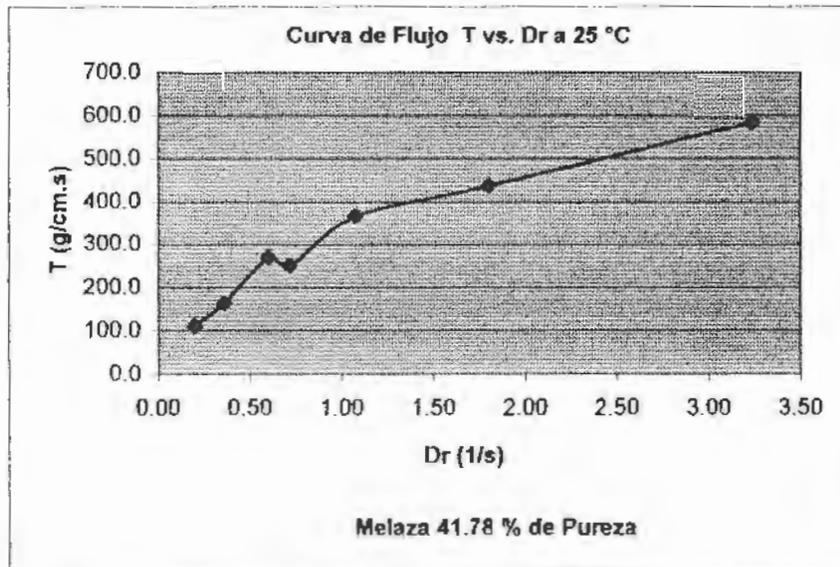
ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



**MUESTRA 15**

Dr (1/s)	Z (dyn/cm2.skt)	ALFA 1 (skt) +/- 0.5	ALFA 2 (skt) +/- 0.5	T ( g/cm .s2) +/-3.7	U = T/Dr*100 (cP)
0.20	7.39	15.00	15.00	110.9	55425.0
0.36	7.39	21.00	23.00	162.6	45161.1
0.60	7.39	35.00	38.00	269.7	44955.8
0.72	7.39	33.00	35.00	251.3	34897.2
1.08	7.39	49.00	50.00	365.8	33870.8
1.80	7.39	57.00	61.00	436.0	24222.8
3.24	7.39	78.00	80.00	583.8	18018.8

\* Lecturas tomadas en el Rheotest; \*\* Esfuerzo de Corte y Viscosidad Aparente Respectivamente

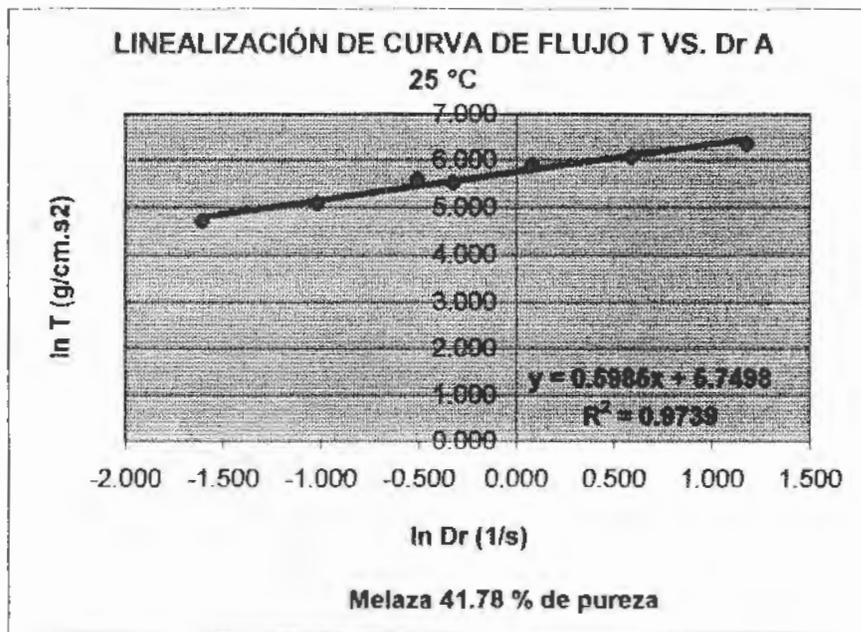


APLICACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL, PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE K Y n DADOS  
POR LA ECUACIÓN DE POTENCIA

Dr (1/s)	T (g/cm .s <sup>2</sup> )	ln Dr	ln T	T = K(Dr)n ln T = ln K + n ln Dr	n +- 0.01
0.20	110.9	-1.609	4.708	<b>y = 0.5985x + 5.7498</b> <b>R2 = 0.9739</b>	<b>0.5985</b>
0.36	162.6	-1.022	5.091		
0.60	269.7	-0.511	5.597		
0.72	251.3	-0.329	5.526		
1.08	365.8	0.077	5.902		
1.80	436.0	0.588	6.078		
3.24	583.8	1.176	6.370		

ln K	K +- 15.7	Dr (1/s)	T =Z(ALFA*) g/cm .s <sup>2</sup> +-3.	T = K(Dr)n teórico	% de Error Experimental
5.7498	<b>314.13</b>	0.20	110.9	119.89	7.54
		0.36	162.6	170.43	4.61
		0.60	269.7	231.38	14.22
		0.72	251.3	258.06	2.63
		1.08	365.8	328.94	10.08
		1.80	436.0	446.57	2.36
		3.24	583.8	634.84	8.04
				Promedio ->	7.07

ALFA\* = AL PROMEDIO DE LAS ALFAS 1 Y 2, LEIDAS EN EL RHEOTEST.



ANEXO D

CÁLCULOS DE ENERGÍAS DE ACTIVACIÓN DE FLUJO (EA) PARA LAS 15 MUESTRAS DE MELAZAS SELECCIONADAS, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE ARRHENIUS, UTILIZANDO EL PROGRAMA EXCEL, WINDOWS 2000

32.22% de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	291.3	29.13	0.00336	3.37	y = 18375x -56.825	-56.825
45	153.71	15.371	0.00314	2.73	R2 = 0.6059	
55	50.66	5.066	0.00305	1.62		
65	0.028	0.0028	0.00296	-5.88		
EA						
K* (Kg/m.)	(KJ/gmol)					
2.095 E-25	152.76975					

33.41 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	237.98	23.798	0.00336	3.17	y = 23003x -72.79	-72.79
45	77.39	7.739	0.00314	2.05	R2 = 0.8191	
55	0.91	0.091	0.00305	-2.40		
65	0.019	0.0019	0.00296	-6.27		
EA						
K* (Kg/m.)	(KJ/gmol)					
2.44177E-32	191.2					

33.53 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	324.24	32.424	0.00336	3.48	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
45	255.78	25.578	0.00314	3.24	y = 14021x -42.583	-42.583
55	25.73	2.573	0.00305	0.95	R2 = 0.7124	
65	0.725	0.0725	0.00296	-2.62		
EA						
K* (Kg/m.s)	(KJ/gmol)					
3.20951E-19	116.57059 4					

ELABORADO POR MÓNICA BEHAR

35.40 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	420.02	42.002	0.00336	3.74	y = 17502x - 53.876	-53.876
45	221.92	22.192	0.00314	3.10	R2 = 0.7497	
55	15.06	1.506	0.00305	0.41		
65	0.215	0.0215	0.00296	-3.84		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
3.99 E -24	145.5					

35.80 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	300.76	30.076	0.00336	3.40	y = 21025x - 66.127	-66.127
45	34.46	3.446	0.00314	1.24	R2 = 0.7788	
55	9.03	0.903	0.00305	-0.10		
65	0.023	0.0023	0.00296	-6.07		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
1.91 E -29	174.8					

36.13 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	355.28	35.528	0.00336	3.57	y = 13516x - 41.373	-41.373
45	70.90	7.09	0.00314	1.96	R2 = 0.9335	
55	9.33	0.933	0.00305	-0.07		
65	1.49	0.1492	0.00296	-1.90		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
1.0763E-18	112.4					

36.89 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	162.21	16.221	0.00336	2.79	y = 23380x - 74.276	-74.276
45	82.08	8.208	0.00314	2.11	R2 = 0.7843	
55	0.64	0.064	0.00305	-2.75		
65	0.011	0.0011	0.00296	-6.81		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
5.52514E-33	194.4					

ELABORADO POR MÓNICA BEHAR

38.50 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	107.98	10.798	0.00336	2.38	y = 17087x -53.852	-55.852
45	103.03	10.303	0.00314	2.33	R2 = 0.7467	
55	1.45	0.145	0.00305	-1.93		
65	0.115	0.0115	0.00296	-4.47		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
5.54351E-25	142.1					

38.86 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	557.740	55.774	0.00336	4.02	y = 17103x -52.544	-52.544
45	414.300	41.43	0.00314	3.72	R2 = 0.7362	
55	1.500	0.15	0.00305	-1.90		
65	1.211	0.1211	0.00296	-2.11		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
1.51506E-23	142.2					

39.36 % de pureza						
°C	K (g/cms)	K (Kg/ms)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	57.33	5.733	0.00336	1.75	y = 27378x -88.62	-88.62
45	9.59	0.959	0.00314	-0.04	R2 = 0.7948	
55	0.26	0.026	0.00305	-3.65		
65	0.00041	0.000041	0.00296	-10.10		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
3.25704E-39	227.6					

39.89 % de pureza						
°C	K (g/cms)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25.000	475.900	47.59	0.00336	3.86	y = 16360x - 50.204	-50.204
45.000	312.370	31.237	0.00314	3.44	R2 = 0.7011	
55.000	3.023	0.3023	0.00305	-1.20		
65.000	1.005	0.1005	0.00296	-2.30		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
1.57282E-22	136.0					

ELABORADO POR MÓNICA BEHAR

40.11 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	172.52	17.252	0.00336	2.85	y = 12662x - 30.916	-30.916
45	158.10	15.81	0.00314	2.76	R2 = 0.7511	
55	2.91	0.291	0.00305	-1.23		
65	1.42	0.1418	0.00296	-1.95		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
3.74414E-14	105.3					

40.75 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	164.37	16.437	0.00336	2.80	y = 18131x - 57.555	-57.555
45	16.79	1.679	0.00314	0.52	R2 = 0.9457	
55	0.99	0.099	0.00305	-2.31		
65	0.117	0.0117	0.00296	-4.45		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
1.18 E -25	150.7					

40.97 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	893.73	89.373	0.00336	4.49	y = 19313x - 59.34	-59.34
45	198.62	19.862	0.00314	2.99	R2 = 0.8203	
55	17.11	1.711	0.00305	0.54		
65	0.219	0.0219	0.00296	-3.82		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
7.314 E -22	160.6					

41.78 % de pureza						
°C	K (g/cm.s)	K (kg/m.s)	1/T (°K)	lnK	lnK=EA/RT + lnK*	ln K*
25	314.13	31.413	0.00336	3.45	y = 17406x - 54.272	-54.272
45	250.86	25.086	0.00314	3.22	R2 = 0.6341	
55	0.16	0.016	0.00305	-4.14		
65	1.14	0.1143	0.00296	-2.17		
K* (Kg/m.s)	EA (KJ/gmol)					
2.69 E -24	144.7					

ELABORADO POR MONICA BEHAR