

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“MODELOS REOLÓGICOS ASOCIADOS A
SOLUCIONES AZUCARADAS”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

DAVIS BERROSPI DIAZ
DAVID VILLACORTA GRANDEZ

Callao, Octubre, 2017

PERÚ

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Sustentada por los Bachilleres **BERROSPI DIAZ DAVIS Y VILLACORTA GRANDEZ DAVID** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

ING. CALDERON CRUZ JULIO CESAR	: PRESIDENTE
ING. AVALOS JACOBO VICTOR HUGO	: SECRETARIO
ING. HERRERA SANCHEZ SONIA ELIZABETH	: VOCAL
ING. CARRASCO VENEGAS LUIS AMERICO	: ASESOR

Tal como está asentado en el Libro N° 2 Folio N° 97 y Acta N° 280 de Sustentación por la Modalidad de Tesis sin Ciclo de Tesis, de fecha **12 DE OCTUBRE 2017**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la modalidad de Tesis sin Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N° 082-2011-CU de fecha 29 de abril de 2011 y Resolución N° 221-2012-CU de fecha 19 de setiembre de 2012.

DEDICATORIA

*Dedicado a nuestros padres, nuestros maestros,
y amigos que hicieron posible que el presente
trabajo de investigación se vea concluido.*

AGRADECIMIENTO

Un especial agradecimiento al Ing. Luis Carrasco Venegas y a la Universidad Nacional del Callao por su iniciativa y apoyo incondicional en pos de la investigación...

INDICE

TABLAS DE CONTENIDO.....	4
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
1.1. Identificación del Problema	11
1.2. Formulación del Problema	12
1.3. Objetivos de la investigación	12
1.4. Justificación.....	13
1.5. Importancia	13
II. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Antecedentes del estudio.....	15
2.2. Fundamentos de la Reología	16
2.2.1 Ley de viscosidad de Newton	16
2.3. Clasificación de los Fluidos	17
2.4. Fluidos Newtonianos	18
2.5. Fluidos No Newtonianos.....	19
2.5.1. Fluidos no newtonianos independientes del tiempo	20
2.5.2. Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo	22
2.6. Equipos de medición de Viscosidad.....	24
2.6.1. Viscosímetros Rotacionales.....	24
2.7. Factores que afectan la viscosidad	26
2.7.1. Efecto de la temperatura.....	26
2.7.2. Composición del material.....	26
2.7.3. Efecto de la velocidad de corte	27
2.8. Viscosidad aparente.....	28

2.9. Punto de fluencia	29
2.10. Modelos de comportamiento reológico	30
2.10.1. Modelo de comportamiento para flujo viscoso Ideal	31
2.10.2. Modelos reológicos para fluido pseudoplástico y dilatante.....	31
2.10.3. Modelos reológicos para fluido con valor límite de viscosidad	32
2.10.4. Modelos reológicos para fluido con tensión de fluencia	33
2.10.5. Otros modelos reológicos	34
2.11. El azúcar y la industria alimentaria	35
2.12. Definición de términos básicos	36
III. VARIABLES E HIPÓTESIS	39
3.1. Variables de investigación	39
3.2. Operacionalización de Variables.....	40
3.3. Hipótesis general e hipótesis específicas	41
IV. METODOLOGÍA.....	42
4.1. Tipo de investigación.....	42
4.2. Diseño de la investigación	43
4.3. Población y Muestra	44
4.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	44
4.4.1. Materiales	44
4.4.2. Descripción del Equipo	44
4.4.3. Partes del equipo	45
4.5. Procedimiento de recolección de datos.....	48
4.5.1. Preparación de las soluciones azucaradas	48
4.5.2. Descripción del análisis Reológico	50
4.6. Procesamiento estadístico y análisis de datos	55
4.6.1. Regresión No lineal.....	55
4.6.2. Análisis de Varianza.....	58

V. RESULTADOS.....	59
5.1. Resultados de los parámetros de los modelos reológicos a partir de los datos experimentales	63
5.1.1. Modelo Reológico de Herschel-Bulkley	63
5.1.2. Modelo Reológico de Vocado	70
5.1.3. Modelo Reológico de Sisko.....	77
5.1.4. Modelo Reológico de Casson	84
5.1.5. Modelo Reológico de Ostwald de Waele	91
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	98
6.1. Contrastación de hipótesis con los resultados.....	98
6.1.1. Hipótesis Específicas.....	98
6.1.2. Hipótesis General	99
6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares	99
VII. CONCLUSIONES.....	101
VIII. RECOMENDACIONES	102
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
APÉNDICE	108
MATRIZ DE CONSISTENCIA	109
ANEXOS.....	116

TABLAS DE CONTENIDO

Lista de Figuras

Figura 2.1. Clasificación reológica de los fluidos	17
Figura 2.2. Perfil de velocidad entre dos placas paralelas	18
Figura 2.3. Curvas de fluidez y viscosidad para fluidos newtonianos.....	19
Figura 2.4. Comparación de las curvas de flujo	20
Figura 2.5. Comportamiento reológico de un fluido pseudoplástico.....	21
Figura 2.6. Comportamiento reológico de un fluido plástico	21
Figura 2.7. Comportamiento reológico de un fluido dilatante	22
Figura 2.8. Curva de flujo (a) y viscosidad (b) para fluido tixotrópico	23
Figura 2.9. Comportamiento reológico de un fluido tixotrópico.....	23
Figura 2.10. Comportamiento reológico de un fluido reopéctico	24
Figura 2.11. Viscosímetro de cilindros concéntricos.....	26
Figura 2.12. Esquema gráfico de la viscosidad aparente	29
Figura 2.13. Esfuerzo de fluencia	30
Figura 2.14. Partes de una curva de flujo	32
Figura 3.1. Relación de las variables de investigación	39
Figura 4.1. Diseño de la investigación.....	43
Figura 4.2. Reómetro modelo RheolabQC de Anton Paar	45
Figura 4.3. Vista frontal de RheolabQC	45
Figura 4.4. Esquema del sistema CC27/S – SN38074.....	46
Figura 4.5. Esquema de la celda de medición	47
Figura 4.6. Disposición inicial del baño termostático.....	47
Figura 4.7. Agua desionizada para las soluciones azucaradas	49
Figura 4.8. Preparación de las soluciones azucaradas	49
Figura 4.9. Lectura en blanco del refractómetro	50
Figura 4.10. Conexión del spindle CC27 en el acoplador	51
Figura 4.11. Conexión de la celda de medición al reómetro.....	52
Figura 4.12. Copa de medición con la solución azucarada	53
Figura 4.13. Introducción de la copa en la celda de medición	53

Figura 4.14. Celda de medición lista para las lecturas.....	54
Figura 4.15. Resultados obtenidos en el software Rheoplus.....	54
Figura 4.16. Interfaz del software IBM SPSS Statistics 22	56
Figura 4.17. Comportamiento aleatorio en el análisis de residuos	57

Lista de Cuadros

Cuadro 2.1. Velocidades de cizalla típica	27
Cuadro 2.2. Valores de punto de fluencia en algunos alimentos.....	30
Cuadro 2.3. Modelos reológicos adicionales.....	34
Cuadro 2.4. Máxima solubilidad de disacáridos	35
Cuadro 3.1. Operacionalización de variables	40
Cuadro 4.1. Concentración y temperaturas utilizadas en las pruebas.....	48
Cuadro 5.1. Datos reológicos de velocidad de corte y esfuerzo de corte a 20°C..	59
Cuadro 5.2. Datos reológicos de velocidad de corte y esfuerzo de corte a 30°C..	59
Cuadro 5.3. Datos reológicos de velocidad de corte y esfuerzo de corte a 40°C..	60
Cuadro 5.4. Datos reológicos de velocidad de corte y esfuerzo de corte a 50°C..	60
Cuadro 5.5. Parámetros en la regresión de Herschel-Bulkley.....	63
Cuadro 5.6. Resultados de los parámetros de Herschel-Bulkley a 20°C	63
Cuadro 5.7. Resultados de los parámetros de Herschel-Bulkley a 30°C	63
Cuadro 5.8. Resultados de los parámetros de Herschel-Bulkley a 40°C	64
Cuadro 5.9. Resultados de los parámetros de Herschel-Bulkley a 50°C	64
Cuadro 5.10. Resultados de la regresión de Herschel-Bulkley	65
Cuadro 5.11. Parámetros de regresión para el modelo de Vocadlo.....	70
Cuadro 5.12. Resultados de los parámetros de Vocadlo a 20°C	70
Cuadro 5.13. Resultados de los parámetros de Vocadlo a 30°C	70
Cuadro 5.14. Resultados de los parámetros de Vocadlo a 40°C	71
Cuadro 5.15. Resultados de los parámetros de Vocadlo a 50°C	71
Cuadro 5.16. Resultados de la regresión del modelo de Vocadlo	72
Cuadro 5.17. Parámetros para la regresión del modelo de Sisko	77
Cuadro 5.18. Resultados de los parámetros de Sisko a 20°C.....	77

Cuadro 5.19. Resultados de los parámetros de Sisko a 30°C.....	77
Cuadro 5.20. Resultados de los parámetros de Sisko a 40°C.....	78
Cuadro 5.21. Resultados de los parámetros de Sisko a 50°C.....	78
Cuadro 5.22. Resultados de la regresión para el modelo de Sisko	79
Cuadro 5.23. Parámetros para la regresión del modelo de Casson.....	84
Cuadro 5.24. Resultados de los parámetros de Casson a 20°	84
Cuadro 5.25. Resultados de los parámetros de Casson a 30°C	84
Cuadro 5.26. Resultados de los parámetros de Casson a 40°C	85
Cuadro 5.27. Resultados de los parámetros de Casson a 50°C	85
Cuadro 5.28. Resultados de la regresión del modelo de Casson	86
Cuadro 5.29. Parámetros del modelo de Ostwald de Waele	91
Cuadro 5.30. Resultados de los parámetros de Ostwald de Waele 20°C.....	91
Cuadro 5.31. Resultados de los parámetros de Ostwald de Waele a 30°C	91
Cuadro 5.32. Resultados de los parámetros de Ostwald de Waele a 40°C	92
Cuadro 5.33. Resultados de los parámetros de Ostwald de Waele a 50°C	92
Cuadro 5.34. Resultados de la regresión del modelo Ostwald de Waele.....	93
Cuadro A1. Lectura del reómetro a 20°C y 55°Brix	110
Cuadro A2. Iteraciones realizadas por el método de Gauss-Newton	112
Cuadro A3. Resultados de los parámetros de Herschel-Bulkley.....	113
Cuadro A4. Anova de la regresión no lineal	113
Cuadro A5. Valores experimentales y ajustados del esfuerzo de corte.....	114
Cuadro A6. Resultados de la prueba de normalidad.....	114
Cuadro A7. Solubilidad de la sacarosa en agua	122

Lista de Gráficos

Grafico 5. 1 Curva de fluidez a 20°C.....	61
Grafico 5. 2 Curva de fluidez a 30°C.....	61
Grafico 5. 3 Curva de fluidez a 40°C.....	62
Grafico 5. 4 Curva de fluidez a 50°C.....	62
Grafico 5. 5 Curvas de Fluidez a 20°C del modelo de Herschel-Bulkley	66

Grafico 5. 6	Curvas de viscosidad a 20°C del modelo de Herschel-Bulkley.....	66
Grafico 5. 7	Curvas de Fluidez a 30°C del modelo de Herschel-Bulkley	67
Grafico 5. 8	Curvas de viscosidad a 30°C del modelo de Herschel-Bulkley.....	67
Grafico 5. 9	Curvas de Fluidez a 40°C del modelo de Herschel-Bulkley	68
Grafico 5. 10	Curvas de viscosidad a 40°C del modelo de Herschel-Bulkley.....	68
Grafico 5. 11	Curvas de Fluidez a 50°C del modelo de Herschel-Bulkley	69
Grafico 5. 12	Curvas de viscosidad a 50°C del modelo de Herschel-Bulkley.....	69
Grafico 5. 13	Curvas de Fluidez a 20°C para el modelo de Vocadlo	73
Grafico 5. 14	Curvas de viscosidad a 20°C para el modelo de Vocadlo	73
Grafico 5. 15	Curvas de Fluidez a 30°C para el modelo de Vocadlo	74
Grafico 5. 16	Curvas de viscosidad a 30°C para el modelo de Vocadlo	74
Grafico 5. 17	Curvas de Fluidez a 40°C para el modelo de Vocadlo	75
Grafico 5. 18	Curvas de viscosidad a 40°C para el modelo de Vocadlo	75
Grafico 5. 19	Curvas de Fluidez a 50°C para el modelo de Vocadlo	76
Grafico 5. 20	Curvas de viscosidad a 50°C para el modelo de Vocadlo	76
Grafico 5. 21	Curvas de Fluidez a 20°C para el modelo de Sisko	80
Grafico 5. 22	Curvas de viscosidad a 20°C para el modelo de Sisko.....	80
Grafico 5. 23	Curvas de Fluidez a 30°C para el modelo de Sisko	81
Grafico 5. 24	Curvas de Fluidez a 30°C para el modelo de Sisko	81
Grafico 5. 25	Curvas de Fluidez a 40°C del modelo de Sisko	82
Grafico 5. 26	Curvas de viscosidad a 40°C del modelo de Sisko	82
Grafico 5. 27	Curvas de Fluidez a 50°C del modelo de Sisko	83
Grafico 5. 28	Curvas de viscosidad a 50°C del modelo de Sisko	83
Grafico 5. 29	Curvas de Fluidez a 20°C del modelo de Casson	87
Grafico 5. 30	Curvas de viscosidad a 20°C del modelo de Casson.....	87
Grafico 5. 31	Curvas de Fluidez a 30°C del modelo de Casson	88
Grafico 5. 32	Curvas de viscosidad a 30°C del modelo de Casson.....	88
Grafico 5. 33	Curvas de Fluidez a 40°C del modelo de Casson	89
Grafico 5. 34	Curvas de viscosidad a 40°C del modelo de Casson.....	89
Grafico 5. 35	Curvas de Fluidez a 50°C del modelo de Casson	90
Grafico 5. 36	Curvas de viscosidad a 50°C del modelo de Casson.....	90

Grafico 5. 37 Curvas de Fluidez a 20°C del modelo de Ostwald de Waele	94
Grafico 5. 38 Curvas de viscosidad a 20°C del modelo de Ostwald de Waele.....	94
Grafico 5. 39 Curvas de Fluidez a 30°C del modelo de Ostwald de Waele	95
Grafico 5. 40 Curvas de viscosidad a 30°C del modelo de Ostwald de Waele.....	95
Grafico 5. 41 Curvas de Fluidez a 40°C del modelo de Ostwald de Waele	96
Grafico 5. 42 Curvas de viscosidad a 40°C del modelo de Ostwald de Waele.....	96
Grafico 5. 43 Curvas de Fluidez a 50°C del modelo de Ostwald de Waele	97
Grafico 5. 44 Curvas de viscosidad a 20°C del modelo de Ostwald de Waele.....	97
Grafico A1. Curva de fluidez	110
Grafico A2. Gráfico normal de residuos	115
Grafico A3.Comportamiento aleatorio de los residuos.....	115

RESUMEN

En la presente investigación se analizó de forma experimental el comportamiento reológico de las soluciones azucaradas a diferentes condiciones de temperatura (20°C, 30°C, 40°C y 50°C) y concentración de azúcar (45°Brix, 55°Brix y 65°Brix). El equipo utilizado fue un reómetro rotacional de cilindros concéntricos. Los resultados obtenidos en cada lectura del reómetro fueron representados en forma de reogramas. Determinándose en la curva de viscosidad un comportamiento de flujo no newtoniano, debido a que la viscosidad decrece a medida que se incrementa el esfuerzo de corte. Por otro lado, en la curva de flujo se observó la relación no lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, determinándose un comportamiento reológico de tipo pseudoplástico con punto de fluencia muy pequeño. El comportamiento de estas soluciones ha sido caracterizado mediante el uso de modelos reológicos y el análisis de regresión no lineal.

Los modelos reológicos que se usaron para caracterizar el comportamiento del fluido incluyen como parámetro el punto de fluencia (Herschel-Bulkley, Vocadlo y Casson). Sin embargo, debido a que dicho parámetro es relativamente pequeño en comparación a otros fluidos no newtonianos, también ha sido caracterizado con modelos que no incluyen dicho parámetro en su estudio (Sisko y Ostwald).

ABSTRACT

In the present investigation, the rheological behavior of sugar solutions at different temperature conditions (20 ° C, 30 ° C, 40 ° C and 50 ° C) and sugar concentration (45 ° Brix, 55 ° Brix And 65 ° Brix). The equipment used was a rotational rheometer of concentric cylinders. The results obtained in each reading of the rheometer were represented as rheograms. A non-Newtonian flow behavior is determined on the viscosity curve because the viscosity decreases as the shear stress increases. On the other hand, the nonlinear relationship between the shear stress and the shear rate was observed in the flow curve, determining a rheological behavior of pseudoplastic type with very small yield point. The behavior of these solutions has been characterized by the use of rheological models and nonlinear regression analysis.

The rheological models that were used to characterize the behavior of the fluid include as a parameter the yield point (Herschel-Bulkley, Vocadlo and Casson). However, because this parameter is relatively small compared to other non-Newtonian fluids, it has also been characterized with models that do not include such a parameter in their study (Sisko and Ostwald).

1.2. Formulación del Problema

- **Problema general**

¿Cuáles son los modelos reológicos asociados a soluciones azucaradas?

- **Problemas específicos**

a) ¿Cuál es la relación numérica entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte determinado experimentalmente para las soluciones azucaradas?

b) ¿Cómo debe ser la correlación no lineal de los datos experimentales conducentes a obtener los parámetros reológicos asociados a las soluciones azucaradas?

c) ¿Cómo son los reogramas asociados a las soluciones azucaradas a temperaturas diversas?

1.3. Objetivos de la investigación

- **Objetivo general**

Determinar los modelos reológicos asociados a soluciones azucaradas.

- **Objetivos específicos**

a) Obtener en forma experimental la relación numérica entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte para las soluciones azucaradas.

b) Obtener los parámetros reológicos de los modelos asociados a las soluciones azucaradas mediante el tratamiento estadístico de regresión no lineal.

c) Obtener los reogramas asociados a las soluciones azucaradas a las temperaturas de prueba.

1.4. Justificación

Las razones que justifican la investigación propuesta son las siguientes:

a) Teórica. - El presente trabajo de investigación tiene por finalidad aplicar los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería química, conceptos como viscosidad, concentración, esfuerzo cortante y velocidad de deformación fueron aplicados en esta investigación en forma práctica, así también hemos hecho uso de nuestros conocimientos matemáticos y estadísticos en el modelamiento reológico del fluido en estudio.

b) Tecnológica. - Es importante en la industria de procesos conocer el comportamiento reológico de las soluciones, ya que siendo conocido dicho comportamiento se puede hacer diseño de equipos, tuberías y bombas para su traslado en una planta de producción.

c) Científica. - El presente trabajo de investigación da un aporte científico en el campo de los estudios reológicos, ya que se estudió cómo se comportó la viscosidad de las soluciones azucaradas al aplicar diferentes esfuerzos de corte. De esta manera y a partir de los resultados obtenidos a nivel laboratorio se pudo caracterizar el comportamiento del fluido en estudio.

1.5. Importancia

Para el estudio del comportamiento reológico de diferentes productos, es necesario recurrir a la reología mediante la cual se puede conocer dicho comportamiento y ser utilizado en diferentes campos de la industria (alimentos, plásticos, pinturas, etc.). Así, las características reológicas de un producto en la etapa de manufactura pueden ser utilizadas en el análisis de control de calidad, también es posible relacionar la estructura y la forma en que sus moléculas están enlazadas, para caracterizar su comportamiento de flujo y de esta forma desarrollar nuevos productos.

Se plantea este estudio debido a que el comportamiento reológico de las soluciones azucaradas es una propiedad física importante en el estudio de cristalización de

azúcar y elaboración de jarabes en industria alimentaria. Muchos son las razones para determinar el comportamiento de este fluido, es decir, determinar sus propiedades reológicas, puesto que de este estudio se han obtenido resultados que pueden ser utilizados en el cálculo de operaciones básicas con transferencia de calor, transferencia masa y cantidad de movimiento, tales como diseño de sistemas de bombeo, dimensionamiento de tuberías y válvulas para el transporte de dicho material en una planta de producción. Además, estudiar la influencia del esfuerzo y velocidad de corte sobre la viscosidad de las soluciones azucaradas ha proporcionado de manera indirecta información valiosa sobre las propiedades de transporte de la sacarosa en un medio acuoso.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

El presente trabajo de investigación fue realizado en base a los siguientes estudios anteriormente publicados y que guardan mucha similitud en cuanto al tratamiento estadístico, modelamiento matemático y obtención de parámetros reológicos. Así también mencionamos trabajos de investigación que nos muestran la influencia de las condiciones de concentración y temperatura en la viscosidad de soluciones de sacarosa.

- “Rheology of Sucrose-CMC Model Solution”. Maria Isabel Berto, Ana Carolina A. Gratao, Alfredo A. Vitali, Vivaldo Silveira JR. Universidad Estatal de Campinas. Departamento de Ingeniería de Alimentos. Sao Paulo-Brasil 2003. Trabajo de investigación en el cual se determinó que el comportamiento reológico de las soluciones de sacarosa al 65% peso y 0.1% de CMC, evaluadas a diferentes temperaturas, tienen un comportamiento de fluido no newtoniano de tipo pseudoplástico. Esta investigación se realizó haciendo uso de un viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos.
- “Rheological Properties of Sucrose Solutions and Suspensions”. M.Mathlouthi, J. Génotelle. Universidad de Reims Champagne. Laboratorio de Química-Física Industrial. Facultad de Ciencias. Reims-Francia 1995. Trabajo de investigación en el cual se afirma que las soluciones de sacarosa pueden comportarse como fluidos no newtonianos ya sea de tipo pseudoplástico o dilatante, dependiendo de la concentración, cristalización y la influencia de otros iones en la solución.
- “Caracterización Reológica de Soluciones Azucaradas para el Proceso de Evaporación-Cristalización”. A Martínez Gómez, I. Sánchez Bazán, A. Osorio-Mirón, L. López Zamora, L.A Sánchez Bazán, E. Hernández Aguilar. Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas. Veracruz-México 2011. Trabajo de investigación experimental en el cual se caracterizó el comportamiento reológico de soluciones azucaradas con la finalidad de optimizar la etapa de evaporación-cristalización en el proceso de producción de azúcar, para ello se realizaron pruebas experimentales en la cual participan los

factores de temperatura, concentración (°Brix) y velocidad de agitación (rpm), llegando a la conclusión que las soluciones azucaradas presentan un comportamiento de fluido no newtoniano de tipo dilatante.

- “Comportamiento Reológico de un Fluido”. Alejandro Regalado Méndez y Octavio Antonio Noriega Ramos. Instituto de Industrias. Universidad del Mar. Oaxaca-México 2008. El objetivo de este trabajo de investigación consistió en identificar el comportamiento reológico de un fluido común, en este caso la salsa de tomate, realizando un diseño factorial en el que interviene la velocidad angular y el tiempo, concluyendo que dicho fluido presenta un comportamiento pseudoplástico y tixotrópico, siendo el modelo matemático que mejor se ajusta el de Ostwald - Waele.

2.2. Fundamentos de la Reología

La Reología podría definirse como la ciencia que trata la forma en que la materia se deforma cuando se le aplica una determinada fuerza; en esta definición, las dos palabras clave son fuerza y deformación. Para conocer cualquier cosa sobre las propiedades reológicas de un material, es necesario medir la fuerza necesaria para producir la deformación del material. En este sentido la Reología presenta principalmente dos aspectos; uno supone el desarrollo de ecuaciones reológicas entre esfuerzo y deformación para un material de interés, lo cual solamente puede ser conseguido con ayuda de un número relativamente importante de experimentos; el otro de los aspectos es el desarrollo de relaciones que muestran como el comportamiento reológico está influenciado por la estructura y composición del material, la temperatura y presión. Idealmente convendría saber cómo estas condiciones afectan a las ecuaciones reológicas. (GARCÍA ,2006:2-4)

2.2.1 Ley de viscosidad de Newton

La ley de viscosidad de Newton establece que la fuerza por unidad de área que se requiere para el movimiento de un fluido se define como F/A y se denota como " τ " (algunos autores lo denotan con " σ "). Según Newton la tensión de cizalla o esfuerzo

cortante es proporcional al gradiente de velocidad (du/dy), o también denotado como γ . Si se duplica la fuerza, se duplica el gradiente de velocidad.

$$\tau = \mu * \gamma$$

La fórmula nos dice que si se aplica una carga τ sobre un cuerpo sólido, este va a sufrir una cierta deformación γ . El valor de dicha deformación se mantendrá hasta que cese el esfuerzo aplicado. (RAMÍREZ, 2006:10-11)

Hay que decir que, dependiendo del libro consultado, es posible encontrar expresiones alternativas, todas ellas válidas en el contexto adecuado.

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

Dónde: du/dy es el gradiente de velocidad, también llamado velocidad de deformación o velocidad de cizalla. Cabe mencionar que la viscosidad dinámica de un fluido newtoniano se suele representar con la letra griega μ , pero para fluidos no newtonianos la viscosidad aparente se suele representar con la letra griega η . (GARCÍA, 2006:1-2)

2.3. Clasificación de los Fluidos

De acuerdo a su comportamiento reológico los fluidos se pueden clasificar tal como se muestra en la figura 2.1.



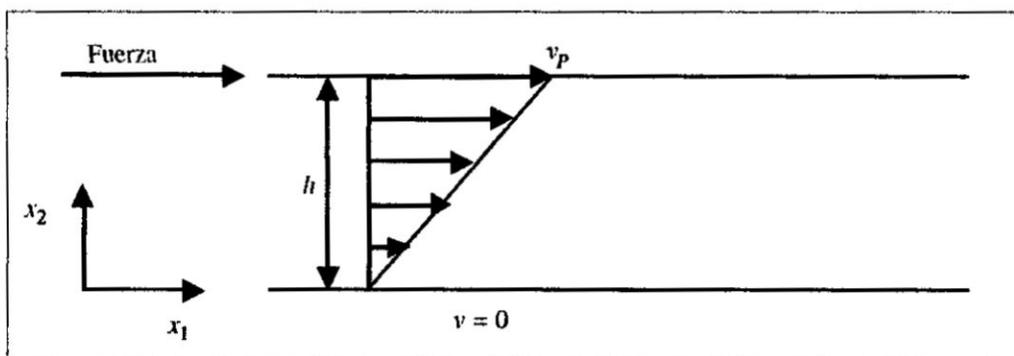
2.4. Fluidos Newtonianos

La ley de viscosidad de Newton vista anteriormente, establece que en movimientos fluidos laminares existe una relación lineal entre las tensiones tangenciales y los gradientes de velocidad, siendo la constante de proporcionalidad una propiedad física del fluido llamada viscosidad dinámica o absoluta μ . Aquellos fluidos que verifican la ecuación de Newton, se denominan fluidos newtonianos, y muchos fluidos comunes tanto líquidos como gaseosos se comportan siguiendo esa relación. (IBARROLA, s.f.1)

Este comportamiento se ilustra en la figura 2.2, en la que un fluido está contenido entre dos platos paralelos. El plato superior es obligado a moverse con una velocidad v , relativa al plato inferior. Esta velocidad es debida a la aplicación de una fuerza cortante F por unidad de área (se considera que los platos son de extensión infinita o que los efectos de borde son despreciables). Las capas de fluido en contacto con los platos se considera que se mueven a la misma velocidad que la superficie con la que están en contacto, lo que supone que no tiene lugar deslizamiento en las paredes. Entonces el fluido se comporta como una serie de capas paralelas o laminas cuyas velocidades son proporcionales a su distancia al plato inferior. Así, para un fluido newtoniano, el esfuerzo de cizalla es directamente proporcional a la velocidad de cambio de la velocidad con la distancia, es decir al gradiente de velocidad. (IBARZ,2005:137)

Figura 2. 2

Perfil de velocidad entre dos placas paralelas

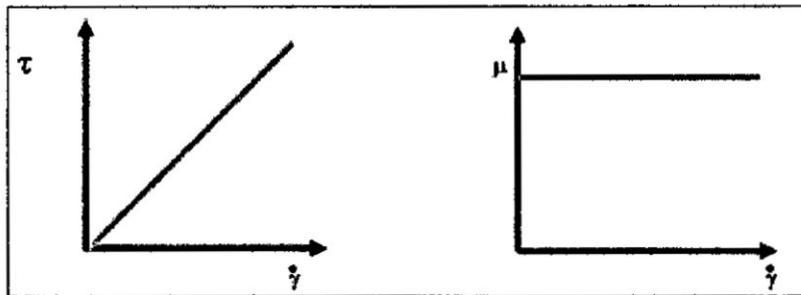


Fuente: IBARZ 2005

Hay que tener en cuenta también que la viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque si puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre.

Figura 2. 3

Curvas de fluidez y viscosidad para fluidos newtonianos



Fuente: LLUMIQUINGA 2012

Para una mejor comprensión de este tipo de fluido se representan dos tipos de gráficas, la “curva de fluidez” y la “curva de viscosidad” en la figura 2.3. En la curva de fluidez se grafica el esfuerzo cortante (τ) frente a la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), mientras que en la curva de viscosidad se representa la viscosidad (μ) en función de la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$). (RAMÍREZ, 2006:2)

2.5. Fluidos No Newtonianos

Existen algunas sustancias industrialmente importantes que no se comportan siguiendo la ley de viscosidad de Newton, ya que su viscosidad a una temperatura y presión dadas es función de la velocidad de deformación o gradiente de velocidad. A los fluidos cuya relación entre tensión-velocidad de deformación no es proporcional, se los ha denominado fluidos no newtonianos. En el mundo real existe una amplia variedad de fluidos comunes que no siguen la simple relación dada por la ley de Newton, especialmente en las industrias químicas, alimenticias y en la industria del petróleo, y de allí la importancia de su estudio para un adecuado y correcto tratamiento. Pueden mencionarse, entre otros, los siguientes fluidos no newtonianos: pinturas, barnices, mermeladas, jaleas, mayonesa, miel, melazas, sangre humana, etc. (IBARROLA, s.f:2)

Aunque el análisis y tratamiento de datos de los fluidos no newtonianos es menos preciso matemáticamente que el de los newtonianos, el estudio de este tipo de movimientos tiene características interesantes y un campo de aplicación bastante extenso en la ingeniería.

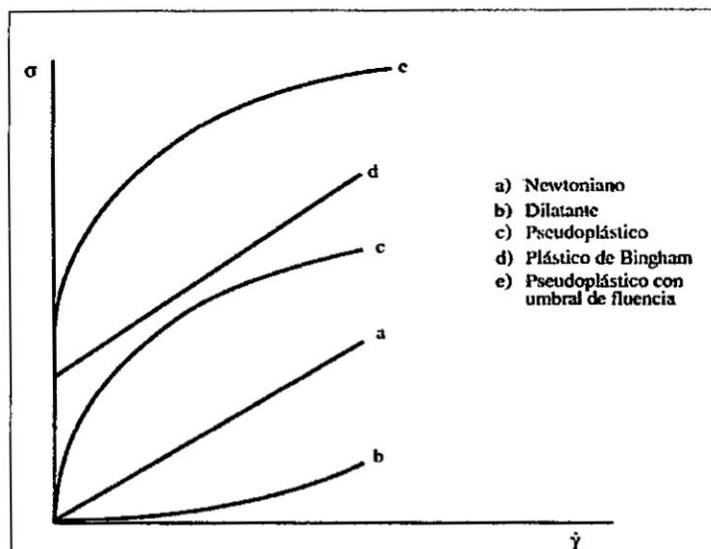
2.5.1. Fluidos no newtonianos independientes del tiempo

Los fluidos no newtonianos independientes del tiempo, se caracterizan porque las tensiones tangenciales dependen únicamente de la velocidad de deformación, y se representan en tres formas equivalentes. (IBARROLA, s.f:3)

$$\tau = f\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) = f\left(\frac{d\gamma}{dt}\right) = f(\dot{\gamma})$$

La gran mayoría de los fluidos no newtonianos que tienen aplicaciones en problemas de ingeniería caen dentro de esta categoría, y en ciertos casos algunos fluidos dependientes del tiempo pueden ser aproximados o modelados como fluidos independientes del tiempo. Para visualizar y analizar los fluidos no newtonianos resulta más cómodo representarlo en un sistema de ejes de coordenada cartesianos τ vs $\dot{\gamma}$, según se indica en la figura 2.4. Pueden identificarse 4 tipos de fluidos no newtonianos independientes del tiempo. (IBARROLA, s.f:4)

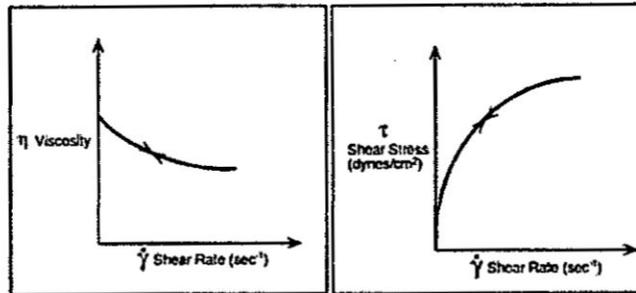
Figura 2. 4
Comparación de las curvas de flujo



Fuente: IBARZ 2005

a) **Fluido Pseudoplástico (Shear Thinning).** - Este tipo de fluido muestra una disminución de viscosidad cuando se incrementa la velocidad de cizallamiento (shear rate). Probablemente es el más común de los fluidos no-newtonianos, son ejemplos de este tipo las emulsiones, pinturas y dispersiones de muchos tipos. (BROOKFIELD, 2014:16)

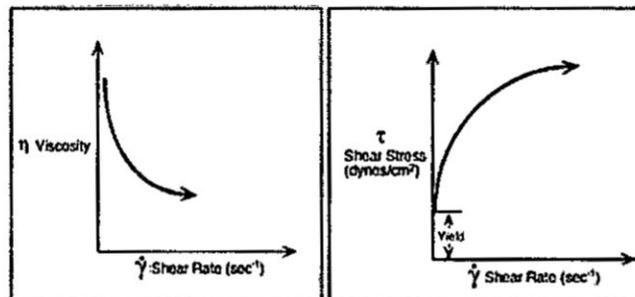
Figura 2. 5
Comportamiento reológico de un fluido pseudoplástico



Fuente: BROOKFIELD 2014

b) **Fluido Plástico.** - Este tipo de fluidos se comporta como un sólido en condiciones estáticas. Una cierta cantidad de tensión debe ser aplicada al fluido antes de que fluya, llamada “tensión de fluencia” (yield point) o “esfuerzo umbral”. La salsa de tomate es un buen ejemplo de tipo de fluidos, puesto que el valor de la tensión de fluencia impide que fluya del envase, sin embargo si aplastamos y empujamos se vencerá dicho valor y comenzará a fluir. Una vez que se supera el valor del esfuerzo umbral y comienza el flujo, los fluidos plásticos pueden mostrar comportamiento newtoniano, pseudoplástico o características de flujo dilatante. (BROOKFIELD, 2014:16)

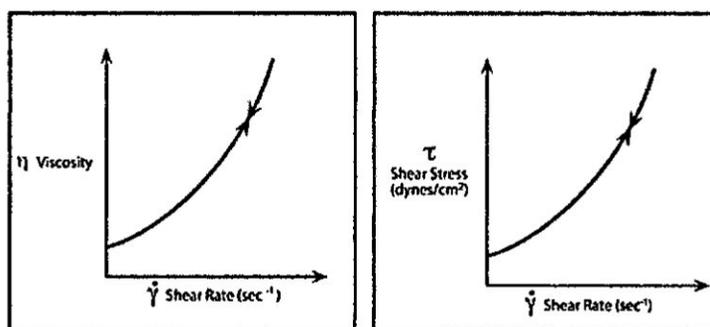
Figura 2. 6
Comportamiento reológico de un fluido plástico



Fuente: BROOKFIELD 2014

c) Fluido Dilatante (Shear Thickening). - Este tipo de fluido se caracteriza por el incremento de la viscosidad cuando se aumenta la velocidad de cizallamiento (shear rate), tal como se muestra en la figura 2.7. El comportamiento dilatante es observado frecuentemente en fluidos que contienen niveles altos de solidos floculados, tales como las suspensiones de arcilla, almidón en agua, arena en agua, etc. (BROOKFIELD, 2014:17)

Figura 2. 7
Comportamiento reológico de un fluido dilatante



Fuente: BROOKFIELD 2014

2.5.2. Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo

Existen otro tipo de fluidos que son más complejos que los vistos y cuya viscosidad aparente depende no solo de la velocidad de deformación $\dot{\gamma}$, sino también del tiempo durante el cual actúa la tensión tangencial τ . Se los clasifica en fluidos tixotrópicos y reopéticos.

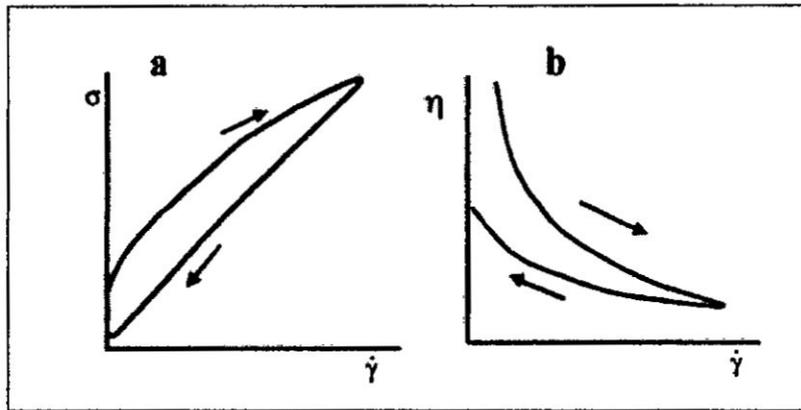
a) Fluidos Tixotrópicos

El comportamiento de flujo puede verse afectado de dos maneras por el tiempo. El fenómeno por el que la viscosidad disminuye al aplicar un esfuerzo de cizalla y hay una recuperación gradual de la estructura al eliminar el esfuerzo se denomina tixotropía. Por el contrario, el aumento de la viscosidad con el tiempo bajo la acción de una cizalla constante, recibe el nombre de reopexia. Normalmente, se asocia la tixotropía con el comportamiento fluidificante y la reopexia con el espesante, y ambos procesos pueden ser reversibles o irreversibles, la figura 2.8 muestra la forma general de las curvas de flujo obtenidas para fluidos no newtonianos dependientes

del tiempo, en los que se aprecia la formación de un ciclo de histéresis. En un fluido tixotrópico, al aumentar de forma constante la velocidad de cizalla, disminuye la viscosidad (curva de subida). En la rampa de bajada, esto es, a medida que la velocidad de cizalla disminuye, el esfuerzo de cizalla registrado es inferior al registrado en la curva de subida para la misma velocidad de cizalla. (MORENO, 2005: 55-56)

Figura 2. 8

Curva de flujo (a) y viscosidad (b) para fluido tixotrópico

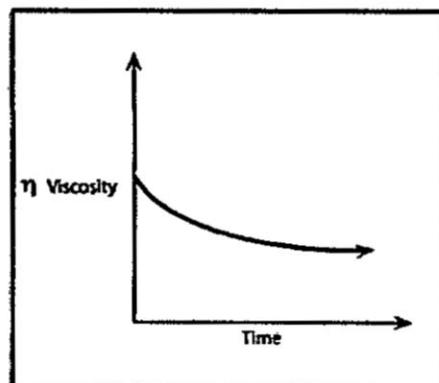


Fuente: MORENO 2005

En una gráfica de viscosidad versus tiempo, para un fluido con comportamiento tixotrópico, podemos observar que conforme avance el tiempo la viscosidad de dicho fluido irá disminuyendo, tal como lo muestra la figura 2.9.

Figura 2. 9

Comportamiento reológico de un fluido tixotrópico



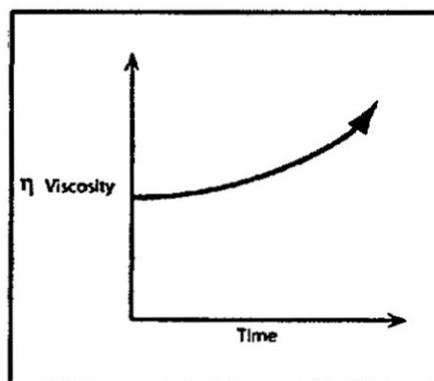
Fuente: BROOKFIELD 2014

b) Fluidos Reopéticos

Los fluidos reopéticos, en cambio se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de deformación aplicada y presentan una histéresis inversa a estos últimos. Esto es debido a que si se aplica una fuerza se produce una formación de enlaces intermoleculares conllevando un aumento de la viscosidad, mientras que si cesa ésta, se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad. (RAMÍREZ, 2006:15)

Figura 2. 10

Comportamiento reológico de un fluido reopético



Fuente: BROOKFIELD 2014

2.6. Equipos de medición de Viscosidad

2.6.1. Viscosímetros Rotacionales

Los viscosímetros rotacionales constan básicamente de dos partes que se encuentran separadas por el fluido a estudiar. Dichas partes pueden ser dos cilindros, dos superficies paralelas, una superficie y un cono de pequeño ángulo, un rotor en el interior de un cilindro. El movimiento de estas partes provoca la aparición de un gradiente de velocidad a lo largo del fluido. Para determinar la viscosidad del fluido se mide el esfuerzo necesario para producir una determinada velocidad angular. Este tipo de viscosímetros son muy versátiles y pueden ser utilizados para fluidos no newtonianos. (GARCÍA, 2006:10)

- **Viscosímetros de cilindros concéntricos**

Los primeros viscosímetros rotacionales fueron de cilindros concéntricos, constan de dos cilindros concéntricos, uno exterior hueco y otro interior macizo. Por el movimiento de uno de los cilindros se genera una cizalla en el líquido situado en el espacio anular. Este tipo de instrumento pueden realizar las medidas de dos formas. (GARCÍA, 2006:10)

- ✓ Haciendo girar uno de los elementos con un cierto par de fuerzas y midiendo la velocidad de giro provocada.
- ✓ Provocando una velocidad de giro en uno de los elementos y midiendo el par de fuerzas opuesto.

Un viscosímetro de este tipo cumple la ecuación siguiente para un radio dado:

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L}$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{2\omega R_c^2 R_b^2}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)}$$

Donde:

τ = Esfuerzo de deformación o esfuerzo de cizalla.

$\frac{d\gamma}{dt}$ = Velocidad de deformación o velocidad de cizalla.

M = Par de fuerzas aplicado por unidad de longitud de cilindro sumergido en el fluido.

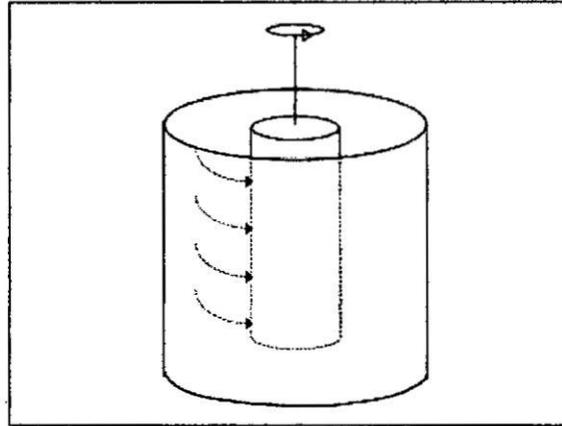
$\omega = 2\pi/60N$, donde N es la velocidad angular en rpm.

R_c = Radio del contenedor de la muestra.

R_c = Radio del cuerpo de giro.

x = Punto donde se desea determinar la velocidad de cizalla.

Figura 2. 11
Viscosímetro de cilindros concéntricos



Fuente: GARCÍA 2006

2.7. Factores que afectan la viscosidad

2.7.1. Efecto de la temperatura

La dependencia de la viscosidad de la temperatura es muy diferente para líquidos y para gases. Para los gases se establece una relación de η a \sqrt{T} , que se constata experimentalmente. La viscosidad para los líquidos, por el contrario, decrece al aumentar la temperatura. Una ecuación, propuesta en un principio empíricamente y fundamentada luego con una teoría y que representa bastante bien los datos es. (CASTELLAN, 1987:801)

$$\ln \eta = a + \frac{E}{RT}$$

Al ajustar los valores del $\ln \eta$ en función a $1/T$ se obtiene una línea recta. Esta ecuación es también llamada también la relación de Arrhenius donde el valor de pendiente vendría a expresar el valor de la energía de activación.

2.7.2. Composición del material

La composición de un material es un factor determinante de su viscosidad. Cuando esta composición se altera, ya sea cambiando las proporciones de las sustancias componentes, o por la adición de otros materiales es bastante probable que se

2.8. Viscosidad aparente

QUINTÁNS(2008:10) afirma:

El flujo de un líquido newtoniano viene descrito por la siguiente ecuación:

$$\tau = \eta * \gamma$$

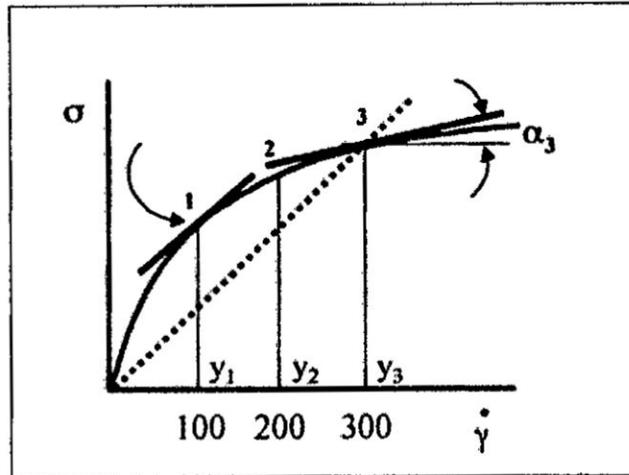
Existen numerosos líquidos, frecuentemente empleados en la industria, en los que esta relación tan simple no se cumple. Si la interacción depende de la velocidad de flujo, el coeficiente de viscosidad deja de ser constante. Por esta razón, en lugar del coeficiente de viscosidad η , se usa frecuentemente un “coeficiente de viscosidad aparente”, η_{ap} que se define como la tensión tangencial dividida por la velocidad de deformación.

$$\eta_{ap} = \frac{\tau}{\gamma}$$

La viscosidad aparente no es una constante, depende de la tensión tangencial, y las representaciones gráficas muestran la relación entre la tensión tangencial y la velocidad de deformación (una curva de flujo de τ en función de γ o una curva de η_{ap} en función de γ). A estos líquidos se les denomina no newtonianos, siempre que ofrezcan un flujo continuo, incluso cuando la fuerza aplicada sea mínima.

Al ensayar un fluido no newtoniano y calcular los pares de valores de esfuerzo de cizalla y velocidad de cizalla en algunos puntos de la curva no lineal (curva continua figura 2.12), se obtendrán valores distintos de viscosidad que no tienen sentido por sí mismos, aun cuando vayan acompañados de su correspondiente valor de velocidad de cizalla. En los puntos señalados (1, 2, 3) en la curva de la figura 2.12, los valores de la viscosidad son idénticos a los que tendrían sendos fluidos newtonianos cuyas curvas de flujo partieran del origen e interceptaran en los puntos 1, 2, 3, respectivamente, para los que la viscosidad sería el cociente entre y_1, y_2, y_3 entre las correspondientes velocidades de cizalla (100, 200 y 300 s⁻¹, respectivamente).

Figura 2. 12
Esquema grafico de la viscosidad aparente



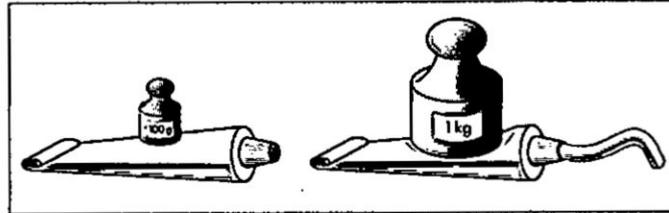
Fuente: MORENO 2005

El término viscosidad aparente supone que el comportamiento al flujo de un fluido no newtoniano se compara al de uno newtoniano, pero solo en un punto singular de la curva, no siendo capaz de describir el comportamiento a velocidades de cizalla distintas. En la viscosidad real se tiene en cuenta la pendiente de la tangente en cada punto. Por esta razón algunos instrumentos de control diseñados para ensayos en un punto pueden provocar serios errores en la medida. (MORENO, 2005:70)

2.9. Punto de fluencia

Una muestra que presenta punto de fluencia comienza a fluir no antes de que las fuerzas externas que actúan sobre el material sean mayores que las fuerzas estructurales internas. Por debajo del límite de elasticidad, el material muestra un comportamiento elástico, es decir, se comporta como un sólido rígido, que presenta bajo carga sólo un grado de deformación muy pequeño, que sin embargo se recupera completamente después de retirar la carga. Si las fuerzas externas que se aplican al material son menores que las fuerzas internas, el material se deforma a un grado tan pequeño que es difícilmente perceptible para el ojo humano. La muestra no comienza a fluir antes de que la fuerza externa aplicada sea mayor a las fuerzas internas. (G. MEZGER, 2014:49)

Figura 2. 13
Esfuerzo de fluencia



Fuente: G. MEZGER 2014

El punto de fluencia se denomina también “yield point” o “yield stress” y se suele representar en los textos de reología como “ τ_0 ”.

Algunos ejemplos de sustancias que presentan “yield point” son geles, dispersiones con una alta concentración de partículas sólidas tales como pastas de plastisol, pastas conductoras (electrotécnica), dentífricos, sellantes, masillas, pinturas en emulsión, pastas de impresión, masas cerámicas, barras de labios, cremas, ketchup, mayonesas, chocolate derretido, margarinas y yogures. Materiales semisólidos, sistemas tensioactivos concentrados, etc. (G. MEZGER, 2014:49)

Cuadro 2. 2
Valores de punto de fluencia en algunos alimentos

ketchup and drilling muds	~ 15 Pa
spaghetti sauce	~ 25 Pa
mustard, and apple sauce	~ 60 Pa
mayonnaise	~ 90 Pa
tomato paste	~ 125 Pa

Fuente: A. BARNES 2000

2.10. Modelos de comportamiento reológico

Hay una gran variedad de fluidos cuyo comportamiento no se ajusta al de un líquido newtoniano, al menos en un cierto rango de esfuerzos. Estos fluidos suelen ser sistemas dispersos (emulsiones, suspensiones, soles de partículas, etc.), soluciones de macromoléculas (fluidos biológicos), o materiales fundidos (plásticos), que tienen un cierto grado de estructuración. Un fluido no newtoniano puede tener

comportamiento newtoniano en un cierto rango de esfuerzos lo suficientemente bajos para no modificar su estructura. Sin embargo, la aplicación de un esfuerzo superior a un esfuerzo crítico modifica la estructura y, por lo tanto, la viscosidad del fluido. Por ello, el concepto de viscosidad como propiedad intrínseca desaparece y, en todo caso, puede hablarse de una viscosidad aparente. (MAESTRO, 2002:15)

2.10.1. Modelo de comportamiento para flujo viscoso Ideal

- **Modelo de Newton**

$$\tau = \eta * \gamma$$

Dónde " τ " es el esfuerzo de corte (Pa), " η " es la viscosidad dinámica o absoluta y " γ " es la velocidad de corte (s^{-1}). (G. MEZGER, 2014:59)

2.10.2. Modelos reológicos para fluido pseudoplástico y dilatante

- **Ostwald de Waele (Ley de la Potencia)**

De acuerdo a W. Ostwald (1925) y A. de Waele (1923). Se estableció el siguiente modelo de curva de flujo:

$$\tau = k * \gamma^p$$

Donde la constante " k " es llamado "índice de consistencia" y el exponente " p " es llamado "índice de flujo", estableciéndose que:

$p < 1$, Fluido pseudoplástico.

$p = 1$, Fluido newtoniano.

$p > 1$, Fluido dilatante.

Una desventaja de este modelo reológico es que para las curvas de flujo de la mayoría de las soluciones de polímeros y de las masas de fusión, no puede ajustarse tanto en el intervalo de bajo cizallamiento como en el rango de alto cizallamiento. (G. MEZGER, 2014:60)

- **Eyring /Prandtl/Ree**

$$\gamma = C_1 * \sinh\left(\frac{\tau}{C_2}\right)$$

Donde C_1 es el factor (EPR) en unidades de 1/s, C_2 es llamado factor de escala (Pa).
(G. MEZGER, 2014:60)

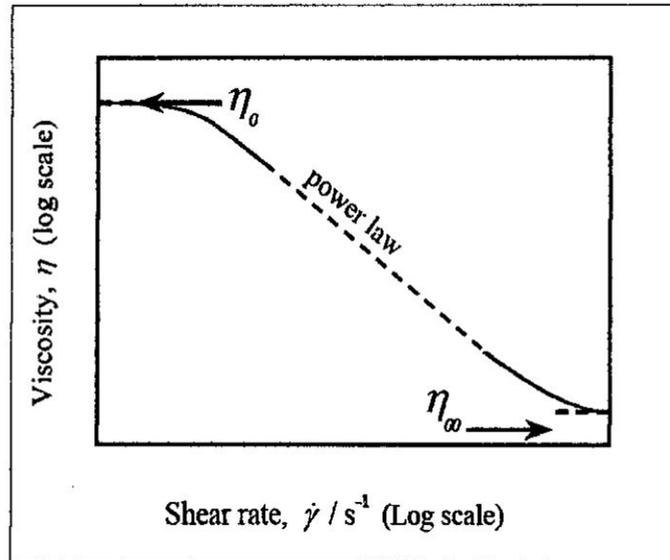
2.10.3. Modelos reológicos para fluido con valor límite de viscosidad

A continuación, se muestran modelos que presentan los siguientes parámetros:

$$\eta_0 = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma}) ; \eta_\infty = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta(\dot{\gamma})$$

Figura 2. 14

Partes de una curva de flujo



Fuente: A. BARNES 2000

- **Modelo de Cross**

Este modelo ha sido diseñado para polímeros no enlazados y no adecuado para dispersiones y geles.

$$\frac{\eta(\dot{\gamma}) - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (C * \dot{\gamma})^p}$$

Donde: $C[\text{seg}]$ es la constante de Cross, " p " es llamado el exponente de Cross, además se puede considerar que η_∞ es un valor muy pequeño en comparación que η_0 . (G. MEZGER, 2014:61)

- **Modelo de Sisko**

Se producen muchos flujos reales para líquidos estructurados a velocidades de cizallamiento en las que la viscosidad está saliendo de la región de ley de potencia de la curva de flujo y se aplanan hacia η_{∞} . Esta situación se resuelve fácilmente añadiendo simplemente una contribución newtoniana a la descripción de la ley de potencia de la viscosidad, dando:

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} + \eta_{\infty}$$

O en términos de esfuerzo de corte:

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

Esta es llamada la ecuación de Sisko, que describe de forma correcta el comportamiento de flujo de muchas emulsiones y suspensiones en el rango de velocidad de cizallamiento de 0.1 a 1000 s⁻¹. (A. BARNES, 2000:60)

2.10.4. Modelos reológicos para fluido con tensión de fluencia

- **Modelo de Bingham**

$$\tau = \tau_0 + \eta_p\dot{\gamma}$$

Los parámetros de Bingham son la tensión de fluencia τ_0 , también conocido como “yield point” y la viscosidad plástica η_p , la cual viene a ser la pendiente de la curva. A los fluidos que se ajustan a este modelo se les suele llamar plástico ideal de Bingham. (G. MEZGER, 2014:61)

- **Modelo de Casson**

Se aplica para aquellos fluidos en los que no existe proporcionalidad entre el esfuerzo y la velocidad de corte.

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + k_1\dot{\gamma}^{1/2}$$

Donde k_1 es una constante propia del fluido; τ_0 es el esfuerzo de fluencia del fluido (Pa), $\dot{\gamma}$ es la velocidad de corte. (LLUMIQUINGA, 2012:45-47)

• **Modelo de Herschel-Bulkley**

Es un caso especial de la Ley de la Potencia, donde el esfuerzo cortante está relacionado con el gradiente de velocidades mediante la siguiente expresión:

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n + \tau_0 = k(\dot{\gamma})^n + \tau_0$$

Donde k es el coeficiente de consistencia del líquido (Pa.s); n es el índice de la ley de potencia (valor adimensional) y τ_0 es el esfuerzo de fluencia del fluido (Pa). (LLUMIQUINGA, 2012:45-47).

2.10.5. Otros modelos reológicos

Cuadro 2. 3

Modelos reológicos adicionales

Model (Source)	Equation
Casson (Casson, 1959)	$\sigma^{0.5} = (\sigma_w)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{n_1}$
Modified Casson (Mizrahi and Berk, 1972)	$\sigma^{0.5} = (\sigma_w)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{n_1}$
Ellis (Ellis, 1927)	$\dot{\gamma} = K_1\sigma + K_2(\sigma)^{n_1}$
Generalized Herschel-Bulkley (Ofoli et al., 1987)	$\sigma^{n_1} = (\sigma_w)^{n_1} + K_1(\dot{\gamma})^{n_2}$
Vocadlo (Parzonka and Vocadlo, 1968)	$\sigma = \left((\sigma_w)^{n_1} + K_1\dot{\gamma} \right)^{1/n_1}$
Power Series (Whorlow, 1992)	$\dot{\gamma} = K_1\sigma + K_2(\sigma)^3 + K_3(\sigma)^5 \dots$ $\sigma = K_1\dot{\gamma} + K_2(\dot{\gamma})^3 + K_3(\dot{\gamma})^5 \dots$
Carreau (Carreau, 1968)	$\eta = \eta_w + (\eta_w - \eta_\infty) \left[1 + (K_1\dot{\gamma})^2 \right]^{m-1/2}$
Cross (Cross, 1965)	$\eta = \eta_w + \frac{\eta_w - \eta_\infty}{1 + K_1(\dot{\gamma})^n}$
Van Wazer (Van Wazer, 1963)	$\eta = \frac{\eta_w - \eta_\infty}{1 + K_1\dot{\gamma} + K_2(\dot{\gamma})^{n_1}} + \eta_\infty$
Powell-Eyring (Powell and Eyring, 1944)	$\sigma = K_1\dot{\gamma} + \left(\frac{1}{K_2} \right) \sinh^{-1}(K_3\dot{\gamma})$
Reiner-Philippoff (Philippoff, 1935)	$\sigma = \left(\eta_w + \frac{\eta_w - \eta_\infty}{1 + ((\sigma)^2/K_1)} \right) \dot{\gamma}$

K_1, K_2, K_3 and n_1, n_2 are arbitrary constants and power indices, respectively, determined from experimental data.

Fuente: RAMIREZ 2006

2.11. El azúcar y la industria alimentaria

Con el nombre de azúcar (sacarosa) se designa exclusivamente el producto obtenido industrialmente de la remolacha azucarera (*Beta vulgaris L. var. Rapa*) o de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum, L.*). Este disacárido integrado por glucosa y fructosa unidas mediante enlace glucosídico no posee grupos carbonilo libres por lo que carece de poder reductor. Este azúcar es comercializado bajo diferentes denominaciones en función a su pureza o grado de refinación. (RODRIGUEZ, 2008: 132).

La sacarosa tiene un grado de solubilidad muy alto. Una gran capacidad de hidratación y es menos higroscópica que la fructosa; todas estas características hacen que se emplee en la elaboración de diversos alimentos. (BADUI, 1990:62)

Cuadro 2. 4
Máxima solubilidad de disacáridos

°C	g/100 g agua	
	Lactosa	Sacarosa
0	11.9	179.2
15	16.9	197.0
25	21.6	211.4
40	32.4	238.1
80	99.6	362.1
100	157.6	487.2

Fuente: BADUI 1990

Para muchas aplicaciones de la industria alimentaria, la sacarosa no se usa en forma cristalizada, por el contrario, se comercializa como una solución acuosa refinada que se denomina azúcar líquido. La sacarosa y la mayoría del resto de los carbohidratos de bajo peso molecular (por ej., monosacáridos, alditoles, disacáridos y otros oligosacáridos), a causa de su gran hidrofilia y solubilidad, pueden formar soluciones altamente concentradas de una gran osmolalidad. Tales soluciones, ejemplificadas en los jarabes para «pancakes» y «goffres», o miel, no necesitan conservantes para mantenerlos en buenas condiciones y pueden ser utilizados, no sólo como edulcorantes (aunque no tiene por qué ser cierto que todos estos jarabes de carbohidratos sean muy dulces), sino también como humectantes y conservantes. (FENNEMA, 2000:211).

El azucarado es una técnica de conservación ancestral de muchas civilizaciones, que era muy utilizado para los largos viajes marinos.

El incremento de la presión osmótica y la reducción de la actividad de agua son los principios tecnológicos responsables de la destrucción de microorganismos. En general, los microbios contienen 80% o más de humedad y al exponerlos a un jarabe concentrado con menos agua, se establece un diferencial de concentraciones que tiende al equilibrio; los microorganismos transfieren su agua al jarabe, se deshidratan y mueren mediante la plasmólisis, fenómeno más notorio en bacterias que en levaduras y hongos; para controlar estos últimos se utiliza benzoato de sodio en 100 ppm. (BADUI, 2012:142)

2.12. Definición de términos básicos

- **Fluido**

Sustancia incapaz de resistir fuerzas o esfuerzos de corte, sin deformarse, por pequeño que sea este esfuerzo. Sustancia capaz de fluir. (DUARTE,2004:7)

- **Viscosidad**

La viscosidad de un fluido es una medida de su “resistencia a la deformación”. La viscosidad se debe a la fuerza de fricción interna que se desarrolla entre las diferentes capas de los fluidos a medida que se obligan a moverse una con relación a las otras. En los líquidos, la viscosidad se origina por las fuerzas de cohesión entre las moléculas mientras que en los gases por las colisiones moleculares, además de que ésta varía mucho con la temperatura. (CENGEL, 2006:48).

- **Reogramas**

Los reogramas son gráficos del esfuerzo cortante contra velocidad de cizalladura, de la viscosidad aparente contra la velocidad de cizalladura, del esfuerzo cortante contra el tiempo, o de la viscosidad aparente contra el tiempo, para los fluidos, las suspensiones, y pastas que se usan en procesos de formación de piezas. Los reogramas se usan para caracterizar las Reologías (los comportamientos de la

viscosidad) de las suspensiones como funciones de la velocidad de cizalladura y el tiempo. (DINGER, 2010: 210).

- **Curva de Fluidéz**

También llamada curva de flujo, es una representación gráfica usada en los análisis reológicos de los fluidos newtonianos y no newtonianos. Se grafica colocando los valores de esfuerzo de corte (Pa) en el eje de las ordenadas y velocidad de corte (1/S) en el eje de abscisas.

- **Curva de viscosidad**

Es una representación gráfica usada en el análisis reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos. Se grafica colocando los valores de viscosidad (Pa.s) en el eje de las ordenadas. En el eje de las abscisas pueden colocarse tanto los valores de velocidad de corte (1/s) como también de esfuerzo de corte (Pa).

- **Esfuerzo de cortante o de cizalla**

Denotado con la letra griega τ (tau), se define como la fuerza que se requiere para que una unidad de área de una sustancia se deslice sobre otra. Entonces τ es una fuerza dividida entre un área, y se mide en las unidades de N/m^2 . (MOTT, 2006:27).

- **Actividad del agua (Aa)**

Más que el contenido de agua, la Aa se emplea para cuantificar la influencia de este líquido en los cambios químicos, enzimáticos y microbiológicos a los que están sujetos todos los alimentos. Aunque influyen otros factores, sólo el valor de Aa de un alimento determina el tipo de microorganismo o reacción química o enzimática que puede afectarle.

La Aa es adimensional dado que se calcula como una relación de dos presiones: la del vapor de agua del alimento entre la presión de vapor del agua pura, ambas medidas a la misma temperatura. La presión del vapor de agua de un alimento siempre es menor a la del agua pura, ya que una parte de su líquido está ligado y tiene muy poca movilidad. Su escala va de 0 a 1.0; A excepción de esos dos

extremos, no hay una correspondencia lineal, ya que un producto con 80% de humedad no significa que desarrolle una Aa de 0.8. (BADUI, 2012: 8).

- **Alditol**

También llamado alcohol de azúcar; polialcohol formado por la reducción de un grupo carbonilo de un monosacárido. (WADE,2004:1108).

- **Histéresis**

En un reograma (representación gráfica del comportamiento viscoso), la histéresis se detecta cuando el trazo del reograma del viscosímetro durante la aceleración en un rango de velocidades de cizalladura, difiere del trazo del viscosímetro durante la reducción de la velocidad (desaceleración) en ese mismo rango de velocidades de cizalladura. Esta es una indicación de que la suspensión que se está midiendo da muestras del carácter reológico dependiente del tiempo, tixotrópico o reopéctico. (DINGER, 2010: 208).

- **Plasmólisis**

Encogimiento del citoplasma y separación entre la membrana plasmática y la pared celular cuando una célula vegetal (u otra con pared) pierde agua, por lo común en un ambiente hipertónico. (SOLOMON, 2001: 117)

- **Presión Osmótica**

La presión que es preciso aplicar a una disolución para detener la osmosis desde el disolvente puro hacia la disolución. (BROWN, 2004: 508).

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1. Variables de investigación

La presente investigación se caracteriza por ser longitudinal estudiando la variable a lo largo del tiempo establecido, por ser éste el determinante en la relación causa efecto.

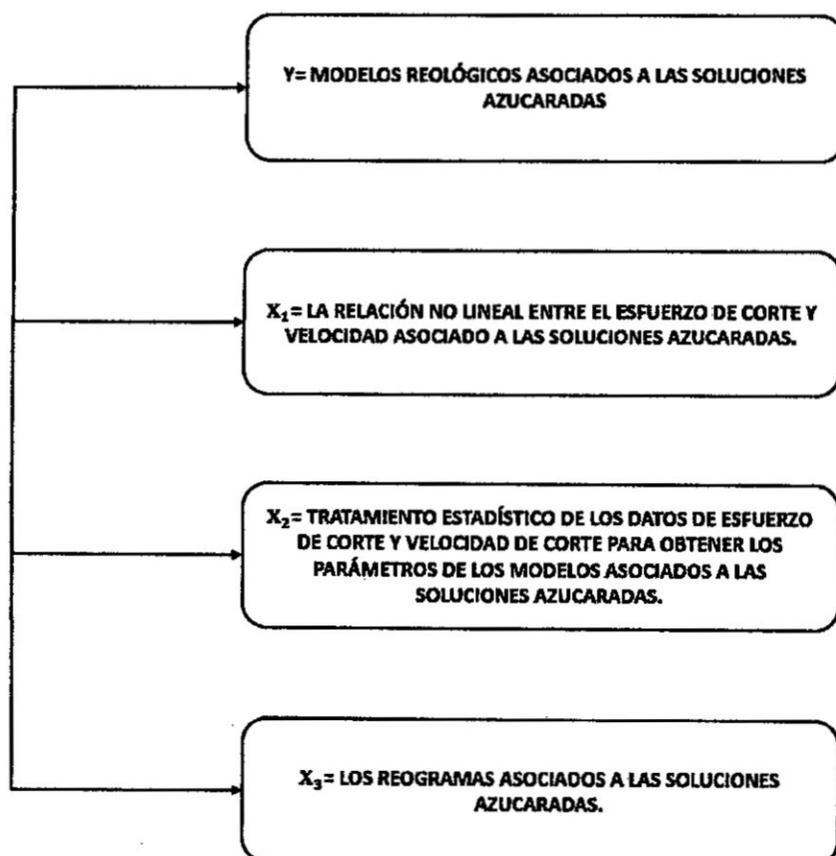
Por su naturaleza, todas las variables identificadas son del tipo cualitativas.

Por su dependencia Y es dependiente, y las variables X_1 , X_2 , X_3 son independientes.

Es decir: $Y = f(X_1, X_2, X_3)$

Figura 3.1

Relación de las variables de investigación



3.2. Operacionalización de Variables

Cuadro 3.1

Operacionalización de variables

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y= modelos reológicos asociados a las soluciones azucaradas.	Reproducibilidad de los datos experimentales mediante los modelos reológicos asociados al comportamiento de las soluciones azucaradas.	Los índices de correlación múltiple y análisis de la varianza	Correlacionando las variables X_1 , X_2 y X_3 .
VARIABLES INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X_1 =La relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado a las soluciones azucaradas.	Análisis cualitativo de la relación entre la velocidad de corte y esfuerzo de corte.	Diferencias respecto a la relación lineal.	Gráfico
X_2 = Tratamiento estadístico de los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte para obtener los parámetros de los modelos asociados a las soluciones azucaradas.	Correlación cuantitativa entre los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte asociados a las soluciones azucaradas.	Índice de correlación y varianza	Regresión lineal
X_3 = Los reogramas asociados a las soluciones azucaradas.	Forma típica de los reogramas de los modelos que representan el comportamiento reológico de las soluciones azucaradas.	Desviación respecto al comportamiento a las propiedades del fluido newtoniano.	Gráfico.

3.3. Hipótesis general e hipótesis específicas

- **Hipótesis general**

Las soluciones azucaradas tienen un comportamiento reológico característico de los fluidos dilatantes como los de Ostwald de Waele, Herschel Bulkley, Casson y otros.

- **Hipótesis específicas**

a) Existe una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado a las soluciones azucaradas.

b) El tratamiento estadístico de los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte permite obtener los parámetros de los modelos asociados a las soluciones azucaradas.

c) Los reogramas de las soluciones azucaradas tienen el comportamiento típico de un fluido no newtoniano específicamente al del fluido dilatante.

IV. METODOLOGÍA

4.1. Tipo de investigación

Los tipos de investigación que se realizaron en la presente tesis son:

A. Por su finalidad

- Aplicada: Puesto que los resultados obtenidos de la investigación tienen por finalidad aplicar los conocimientos teóricos y orientarlos hacia los procesos de producción.

B. Por su diseño interpretativo

- Experimental: Porque permitió manipular las variables independientes para obtener la variable de respuesta requerida.

C. Por el énfasis en la naturaleza de los datos manejados

- Mixta o cualicuantitativa: Puesto que las variables de la investigación son tanto cuantitativas como cualitativas.

D. Por el nivel de estudios

- Exploratorio: Puesto que se busca identificar nuevos rumbos para la investigación en campos del conocimiento poco estudiados.

E. Por su temporalidad

- Transversal: Puesto que se estudió a las variables a lo largo de un tiempo establecido, por ser éste el determinante en la relación causa efecto.

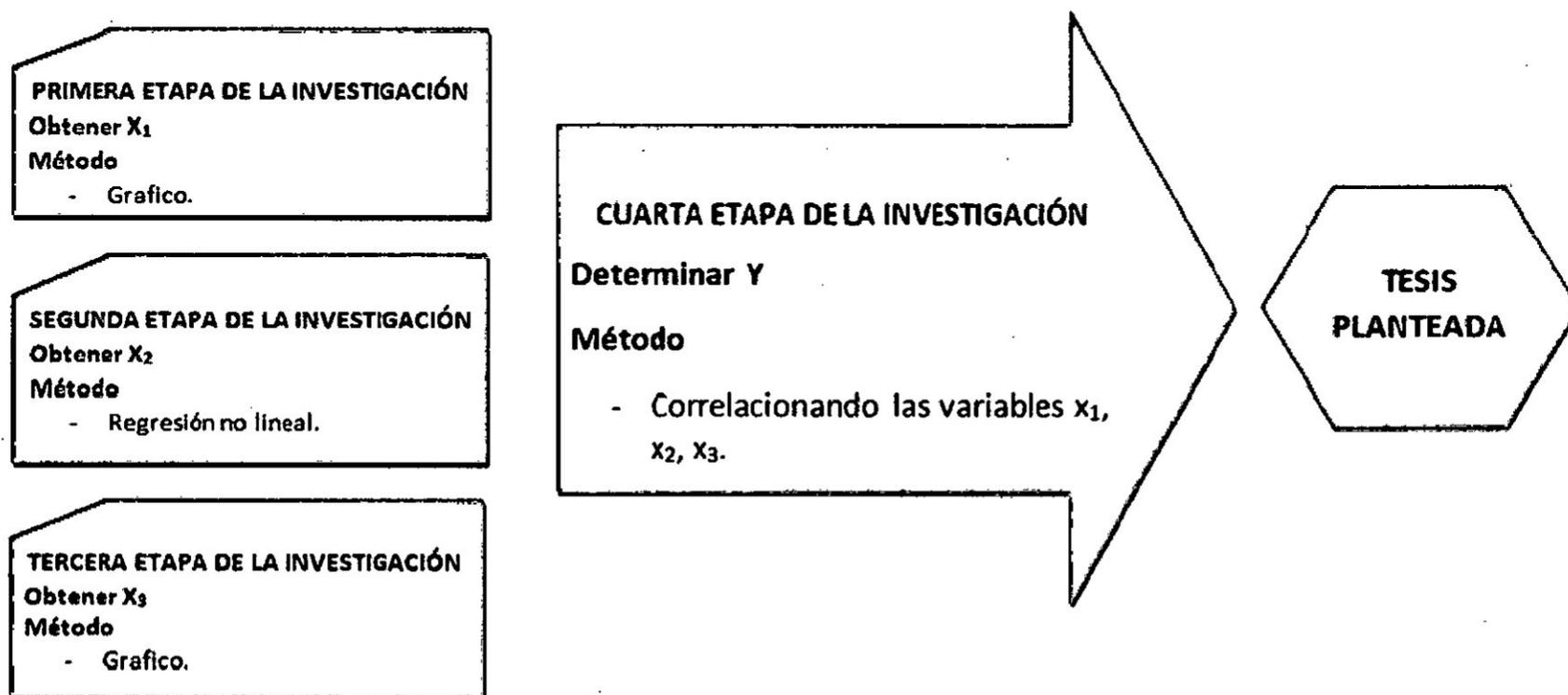
F. Por su ámbito de desarrollo

- De laboratorio: Puesto que la investigación se realizó en los laboratorios de la Universidad Nacional del Callao.

4.2. Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación ha considerado cuatro momentos, los cuales se muestran en la figura 4.1

Figura 4.1
Diseño de la investigación



4.3. Población y Muestra

El criterio población no se aplica en la presente investigación.

El criterio muestra experimental, si se utilizó por cuanto la necesidad de realizar corridas experimentales, partiendo con una porción definida y homogénea de azúcar. La caracterización fisicoquímica de la muestra usada en la experimentación se detalla en el anexo A2.

4.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

4.4.1. Materiales

A. Materia Prima

- Se utilizó azúcar blanca comercial, constituida esencialmente por cristales de sacarosa, cubiertos por una película de miel madre.
- Para la preparación de las soluciones se utilizó agua desionizada cuya caracterización esta descrita en el anexo A3.

B. Instrumentos de Laboratorio

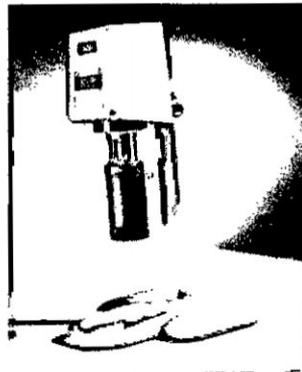
- Vasos de precipitado de 600 ml.
- Baguetas
- Piseta de 1L
- Termómetro (0°C- 100°C)
- Espátula
- Probeta de 250 ml.
- Balanza analítica (capacidad máxima 220g)
- Refractómetro portátil ATC

4.4.2. Descripción del Equipo

El equipo utilizado fue el reómetro rotacional modelo RheolabQC de la marca Anton Paar, el cual se encuentra conectado a un baño termostático de circulación Julabo F12-ED y a una computadora de escritorio con sistema operativo Windows 8, mediante la cual se recogieron los resultados de la experimentación para su posterior análisis.

El equipo sirve para medir las propiedades reológicas de materiales con características de líquidos o pastas. En la configuración de las pruebas se puede seleccionar entre controlar la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) o controlar el esfuerzo de corte (τ). Así como pruebas convencionales de curvas de flujo y curvas de viscosidad.

Figura 4.2
Reómetro modelo RheolabQC de Anton Paar

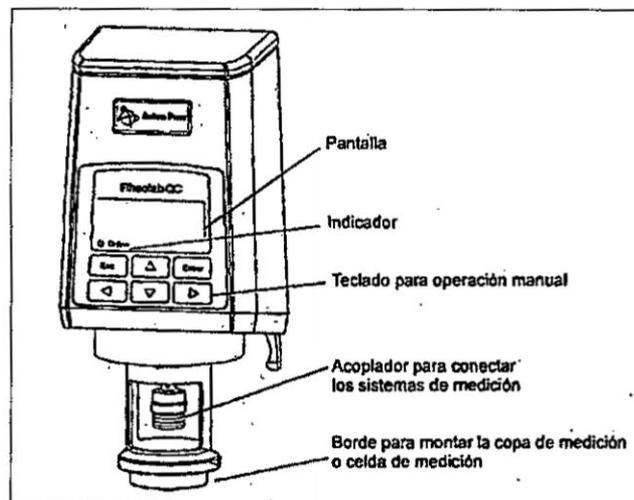


Fuente: ANTON PAAR s.f.

4.4.3. Partes del equipo

La parte central del equipo está conformada por el cabezal del reómetro rotacional, en el cual se encuentra los acopladores del sistema de medición (“spindle”) y la celda de medición.

Figura 4.3
Vista frontal de RheolabQC



Fuente: ANTON PAAR s.f.

A. Sistemas de Medición. – Está conformado por el “spindle” y la copa de medición. Ambos son elegidos de acuerdo al intervalo de viscosidad en el cual se van hacer las mediciones. En el anexo A1 se indica los intervalos de medición para los sistemas del RheolabQC. Para la realización de nuestra experimentación se utilizó el sistema CC27/S – SN38074.

B. Dimensiones. - Las dimensiones del sistema CC27/S – SN38074 se describen a continuación:

$$R_i = 13.335 \text{ mm}$$

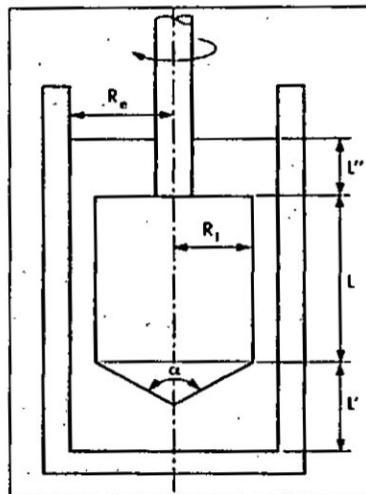
$$R_e = 14.460 \text{ mm}$$

$$\text{intervalo de medición} = 1.126 \text{ mm}$$

$$L = 39.974 \text{ mm}$$

$$\text{Angulo de cono } (\alpha) = 120^\circ$$

Figura 4.4
Esquema del sistema CC27/S – SN38074

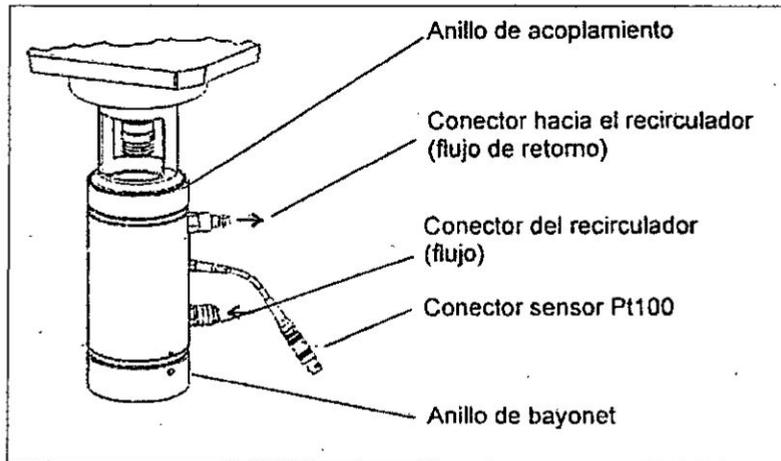


Fuente: ANTON PAAR s.f.

C. Celda de medición. - Esta celda contiene a la copa de medición, en cuyo interior se encuentra la muestra a analizar. La celda de medición también se encuentra conectada al baño termostático del cual recibe un fluido (por lo general agua) para calentar a la muestra por transferencia de calor. Como se observa en la figura 4.5, la celda de medición tiene el sensor de temperatura

Pt100 mediante el cual podemos visualizar y controlar la temperatura de nuestra muestra de trabajo.

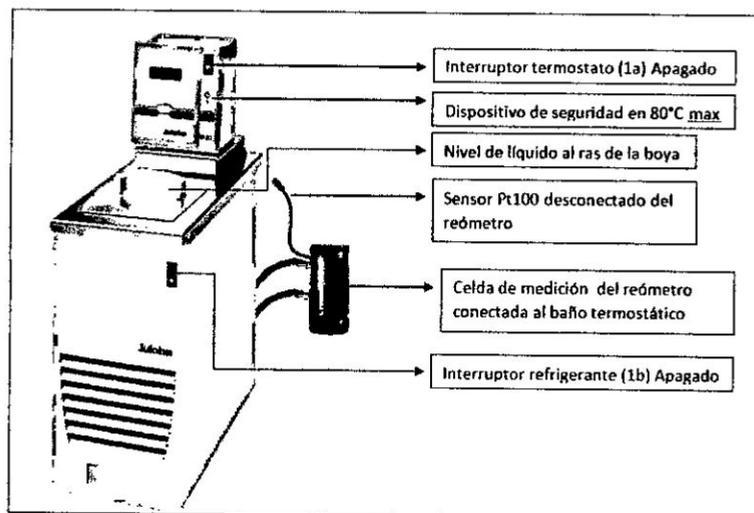
Figura 4.5
Esquema de la celda de medición



Fuente: ANTON PAAR s.f.

D. Baño termostático de circulación. - Este equipo permite mediante los conectores de circulación ajustar la temperatura en que se hace las corridas experimentales. Debido a que por transferencia de calor va calentando la muestra al interior de la celda de medición.

Figura 4.6
Disposición inicial del baño termostático



Tal como muestra la figura 4.6, el baño termostático de circulación está conectado directamente a la celda de medición en cuyo interior se encuentra nuestra muestra de trabajo.

E. Computadora. - Tiene instalada el software Rheoplus mediante el cual podemos observar en el monitor de la computadora las características de medición que presenta el fluido en estudio tales como temperatura, inicio de proceso de medición y final de la medición. Mediante este software obtenemos los resultados de las corridas experimentales expresados en esfuerzo de corte (τ) y velocidad de corte (γ).

4.5. Procedimiento de recolección de datos

En el presente estudio se analizó el efecto de las temperaturas (20°C, 30°C, 40°C y 50°C) y las concentraciones de sólidos solubles (45°Bx, 55°Bx y 65°Bx), sobre la viscosidad de las soluciones azucaradas, obteniéndose un total de 12 lecturas de datos reológicos. Cada lectura está compuesta por una serie de datos de esfuerzo de corte (τ) y velocidad de corte (γ).

Cuadro 4.1

Concentración y temperaturas utilizadas en las pruebas

Concentración (°Brix)	Temperatura			
	20°C	30°C	40°C	50°C
45	L1	L4	L7	L10
55	L2	L5	L8	L11
65	L3	L6	L9	L12

4.5.1. Preparación de las soluciones azucaradas

- Para determinar la cantidad de azúcar requerida en la preparación de las soluciones ver el anexo A4 de la solubilidad de sacarosa en agua, se tomó en cuenta la definición teórica de grados Brix, la cual viene dada por la siguiente relación:

$$^{\circ}\text{Bx} = \frac{\text{masa del soluto}}{\text{masa de la solución}} * 100$$

- Para la preparación de la solución de 45°Brix se pesó 450g de azúcar blanca en un vaso de precipitado, haciendo uso de la balanza analítica. Para 55°Brix y 65°Brix se pesaron 550g y 650g respectivamente.
- Teniendo los tres vasos de precipitado con el azúcar pesado, se procedió a completar con agua desionizada, haciendo uso de una probeta graduada, hasta tener 1L de solución en cada vaso de precipitado.

Figura 4.7

Agua desionizada para las soluciones azucaradas



- Se agitó por unos minutos haciendo uso de las baguetas para lograr la disolución completa del azúcar a temperatura ambiente.

Figura 4.8

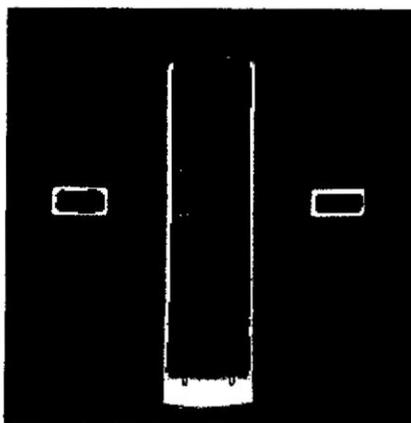
Preparación de las soluciones azucaradas



- Antes de hacer uso del refractómetro se hizo una lectura en blanco usando solo unas gotas de agua desionizada, tal como se observa en la figura 4.9 obteniéndose como lectura cero brix.
- Teniendo en cuenta que el refractómetro hace lecturas a 20°C, esta se fue midiendo con un termómetro antes de ser leídas.
- A continuación, se utilizó el refractómetro, para corroborar y ajustar las concentraciones de 45°Bx, 55°Bx y 65°Bx en las soluciones azucaradas.

Figura 4.9

Lectura en blanco del refractómetro



4.5.2. Descripción del análisis Reológico

A. Encendido del reómetro y sus accesorios

- Se conectó el ordenador a la energía eléctrica, encendió y esperó a que cargue completamente el sistema operativo.
- Se conectó el reómetro a la energía eléctrica y presionó el interruptor principal (ON) ubicado en la parte posterior del mismo para poder encenderlo. Esperamos a que el instrumento cargue completamente.
- Se conectó el baño termostático de circulación a la energía eléctrica y presionó el interruptor del termostato 1a (ver figura 4.6), luego presionamos el interruptor del refrigerante 1b. Se esperó a que cargue completamente el equipo hasta observar el mensaje "OFF" que confirma la disponibilidad del equipo.

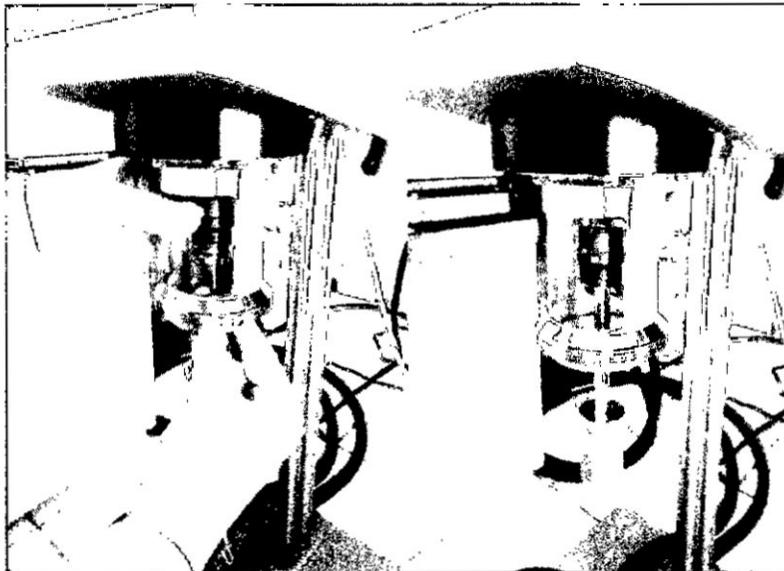
- La pantalla mostró la temperatura actual del baño. Luego seleccionamos la primera temperatura de 20°C (posteriormente 30°C, 40°C y 50°C) usando las teclas ▲▼, presionamos OK y esperamos a que el sistema llegue a la temperatura deseada antes de hacer una medición en el reómetro.

B. Montaje de los sistemas de medición y baño de circulación

- Se accedió al programa Rheoplus, para ello se realizó la siguiente secuencia: inicio>búsqueda>digitamos “Rheoplus”>clic en el ícono del programa.
- Una vez que el programa cargó muestra su área de trabajo vacía. Luego abrimos el cuadro de diálogo del controlador de dispositivo haciendo clic en el botón .
- Se verificó que el reómetro estaba conectado al software observando que la luz led (online) ubicado en la parte inferior izquierda de la pantalla del equipo, se encontraba encendida.
- Se conectó el spindle CC27/S – SN38074 al acoplador con mucho cuidado de no dañar eje del cabezal del equipo, ya que este constituye la parte más sensible del equipo, tal como indica la figura 4.10

Figura 4.10

Conexión del spindle CC27 en el acoplador



- Una vez conectado el spindle en el reómetro, a través de una ventana emergente se advirtió la conexión y denominación del sistema de medición en la computadora.
- Se conectó la celda de medición sin tirar de sus mangueras (por las cuales circula agua desionizada para realizar el calentamiento de la muestra). Lentamente sin tocar el spindle la sujetamos al reómetro a través de su anillo roscado, hasta quedar fijo.

Figura 4.11

Conexión de la celda de medición al reómetro



- Una vez conectado el sensor Pt100 pudimos visualizar en el software de la computadora una ventana emergente detectando el sistema de medición.

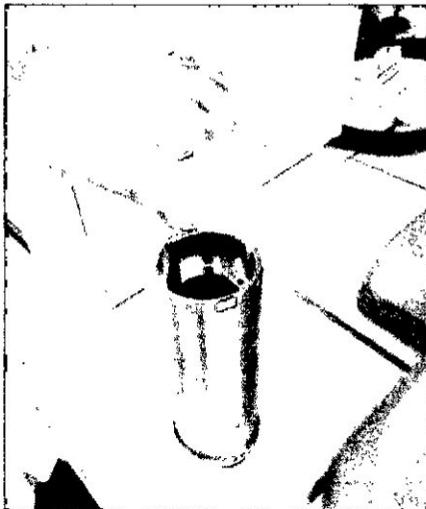
C. Lecturas de las soluciones azucaradas en el reómetro

Lo primero es colocar la copa de medición CC27/S – SN38074 conteniendo la muestra, para ello:

- Se llenó la copa de medición con la solución azucarada de 45°Brix (posteriormente 55°Brix y 65°Brix), hasta la marca en forma de anillo que tiene la copa en su interior.

Figura 4.12

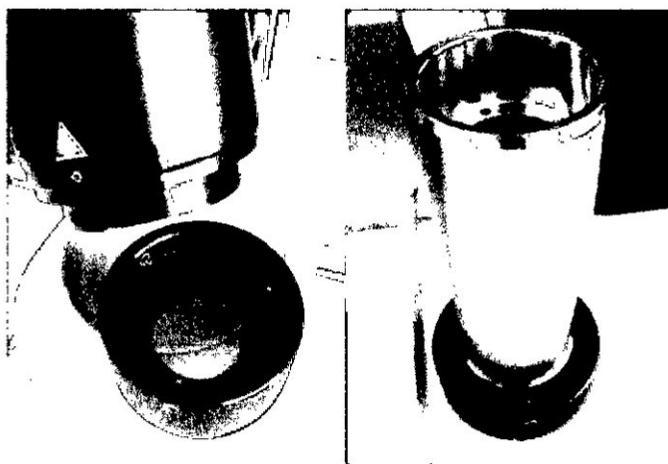
Copa de medición con la solución azucarada



- Se quitó el anillo de bayoneta de la celda de medición girando hacia la izquierda. Luego se colocó la copa en el anillo de bayoneta y se insertó lentamente en la celda de medición por la parte inferior.
- En la figura 4.13 se observa que la celda de medición posee en su parte inferior el anillo de bayoneta el cual se desenroscó y se colocó la copa para luego ser insertada desde su parte inferior y finalmente quedar lista para la medición tal como se muestra en la figura 4.14.

Figura 4.13

Introducción de la copa en la celda de medición



- Se esperó aproximadamente 10 min hasta que la temperatura llegue a uniformizarse. Luego se inició con la medición.

Figura 4.14
Celda de medición lista para las lecturas



- Una vez montado el equipo completamente, en la pantalla del ordenador apareció el cuadro de diálogo abierto, en él se observó el valor de la temperatura de la celda y los datos del reómetro por defecto; entonces presionamos **Aceptar**.

Figura 4.15
Resultados obtenidos en el software Rheoplus



- Abrimos la ventana Rheomanager. Mediante el cual el software analizó la muestra y nos entregó resultados de esfuerzo de corte (τ) y velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) de forma automática.

4.6. Procesamiento estadístico y análisis de datos

Las lecturas en el reómetro de las soluciones azucaradas arrojaron resultados de los valores del esfuerzo de corte (τ) y velocidad de corte (γ). Los modelos reológicos a los cuales fueron ajustados los datos obtenidos en el reómetro son modelos matemáticos no lineales. Por lo tanto, se hizo uso de la regresión no lineal para obtener los parámetros en dichos modelos. Para ello se contó con el software estadístico IBM SPSS Statistics 22, con el cual se hicieron los cálculos.

4.6.1. Regresión No lineal

Dados n pares de observaciones (γ, τ) donde los valores de " γ " son graficados en el eje de las abscisas y " τ " en el eje de las ordenadas. Un modelo de regresión no lineal es de la forma:

$$\tau_i = f(\gamma_i, \theta) + \varepsilon_i$$

Donde θ es el vector que contiene a los parámetros desconocidos del modelo no lineal y ε_i es el error asociado a la regresión.

Existen varios métodos para estimar el valor del vector θ , de acuerdo a la información que tengamos sobre las observaciones siendo el más usado el método de Gauss - Newton. (CARINA,2013:4)

- **Método Iterativo de Gauss - Newton**

La ecuación para estimar θ , se obtiene de minimizar la suma de cuadrados de los residuos.

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^n [\tau_i - f(\gamma_i, \theta)]^2$$

Donde:

$$\tau_i = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$$

$$\gamma_i = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}$$

Notamos que y_i e τ_i son observaciones fijas, por lo que la sumatoria de cuadrados es una función de θ . Al diferenciar la función $S(\theta)$ con respecto de θ , se obtiene un sistema de “p” ecuaciones no lineales de la forma:

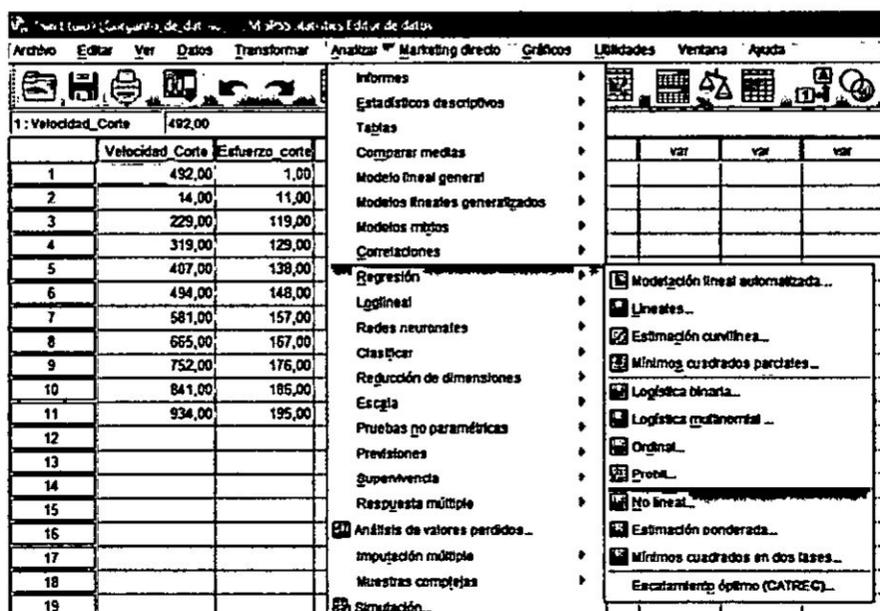
$$\frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta_r} = \sum_{i=1}^n 2(\tau_i - f(y_i, \theta))(-1)\left(\frac{\partial f(y_i, \theta)}{\partial \theta_r}\right) = 0 \quad ; r = 1, \dots, p$$

Al resolver dicho sistema se obtiene la solución para los parámetros contenidos en el vector θ . Para ello es necesario elegir valores iniciales de cálculo. (CARINA, 2013:4)

Una manera rápida de realizar estos cálculos, lo proporciona el software IBM SPSS Statistics 22.

Para ello copiamos los valores de velocidad de corte y esfuerzo de corte obtenidos del reómetro en la hoja de cálculo, luego lo analizamos mediante las opciones de regresión no lineal. El software está programado para realizar el procedimiento iterativo de Gauss - Newton y obtener los valores óptimos de los parámetros de los modelos no lineales.

Figura 4.16
Interfaz del software IBM SPSS Statistics 22



- **Prueba de normalidad de los residuos**

Esta prueba estadística la hemos realizado ya que una condición que exige el método iterativo de Gauss – Newton para el correcto calculo iterativo de sus parámetros en θ , es que los residuos de la regresión tengan un comportamiento normal. Siendo el mejor método de análisis en este caso la prueba de Normalidad de Shapiro Wilks. La cual establece la siguiente relación. (GUTIERREZ, 2008:85)

$$(\text{valor-p}) \geq 0.05$$

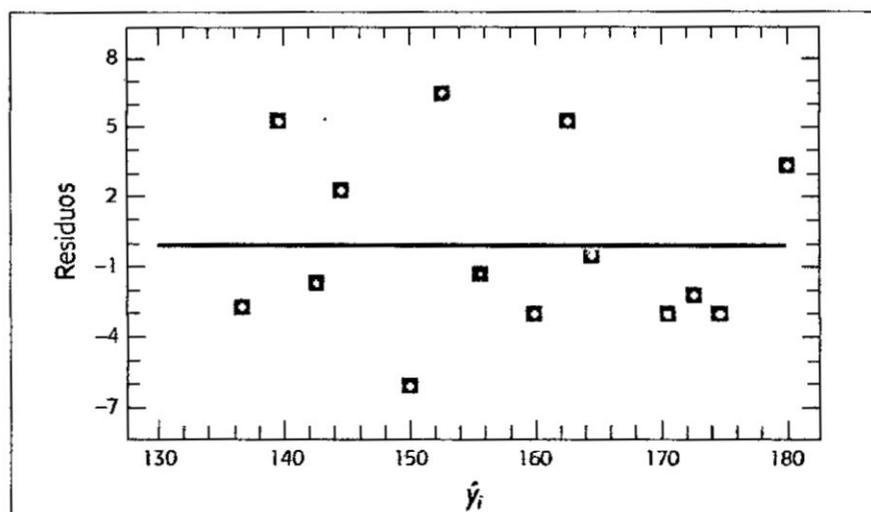
Donde el valor-p es el grado de significancia de los residuos de la regresión.

- **Análisis de Residuos**

Una manera cualitativa de visualizar la calidad de ajuste del modelo es verificando si los residuos poseen varianza constante e independencia. Esto se logra graficando los residuos versus los valores ajustados por el modelo y los residuos versus el orden en que fueron recolectados en la experimentación respectivamente, teniendo que observarse un comportamiento aleatorio para satisfacer calculo óptimo de los parámetros. (GUTIERREZ, 2008:86)

Figura 4.17

Comportamiento aleatorio en el análisis de residuos



Fuente: GUTIERREZ 2008

4.6.2. Análisis de Varianza

A. Coeficiente de determinación

El primer criterio cuantitativo para evaluar la calidad del ajuste es observar la forma en que los datos obtenidos del reómetro se ajustan al modelo matemático. Esto se corroboró haciendo uso de la siguiente fórmula.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \hat{\tau}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau}_i)^2}$$

Donde:

τ_i = Valor experimental del esfuerzo de corte obtenido del reómetro.

$\bar{\tau}_i$ = Promedio de los valores de esfuerzo de corte.

$\hat{\tau}_i$ = Valor del esfuerzo de corte calculado del modelo reológico.

n = Número de pares de observaciones (γ_i, τ_i) , obtenidas del reómetro.

Es claro que $0 \leq R^2 \leq 1$ y que cuanto más cercano sea a la unidad nos indicara un mejor ajuste de los datos con respecto al modelo reológico.

B. Calculo de la varianza

El segundo criterio cuantitativo para poder evaluar el grado de ajuste de los datos con el modelo es a través del cálculo de la varianza el cual se calculó mediante la siguiente relación.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \hat{\tau}_i)^2}{n - k}$$

Donde k es el número de parámetros del modelo no lineal.

En el apéndice se muestra el procedimiento estadístico y análisis de datos para las soluciones azucaradas a 20°C y 55 Brix empleando el modelo de Herschel-Bulkley. Las demás lecturas del reómetro siguieron el mismo procedimiento.

V. RESULTADOS

En cumplimiento del primer objetivo específico mencionado en 1.3 se muestran los resultados obtenidos de la relación numérica entre la velocidad de corte y esfuerzo de corte para las soluciones azucaradas a 20°C, 30°C, 40°C y 50°C.

Cuadro 5.1

Datos reológicos de velocidad de corte y esfuerzo de corte a 20°C

45°Brix		55°Brix		65°Brix	
Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)
6,9	1	3,1	1	2,05	1
14	1,1	10,1	1,1	8,05	1,1
22,9	1,19	17,8	1,19	15,7	1,19
31,9	1,29	25,6	1,29	23,1	1,29
40,7	1,38	34	1,38	30,6	1,38
49,4	1,48	42,9	1,48	38,5	1,48
58,1	1,57	52,3	1,57	46,8	1,57
66,5	1,67	61,9	1,67	55,4	1,67
75,2	1,76	71,9	1,76	64,2	1,76
84,1	1,86	82	1,86	73,1	1,86
93,4	1,95	92,6	1,95	82,4	1,95
				91,3	2,05

Cuadro 5.2

Datos reológicos de velocidad de corte y esfuerzo de corte a 30°C

45°Brix		55°Brix		65°Brix	
velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)
8,1	1	6,5	1	4,5	1
13,9	1,1	12,6	1,1	9,33	1,1
21,8	1,19	20,2	1,19	16,4	1,19
30,1	1,29	27,8	1,29	23,9	1,29
38,5	1,38	36,3	1,38	31,7	1,38
47,5	1,48	45	1,48	40,1	1,48
56,9	1,57	54,3	1,57	49,1	1,57
66,5	1,67	63,9	1,67	58,6	1,67
76,2	1,76	73,9	1,76	68,8	1,76
86,7	1,86	84,5	1,86	79,4	1,86
97,4	1,95	95,5	1,95	90,3	1,95

Cuadro 5.3

Datos reológicos de velocidad de corte y esfuerzo de corte a 40°C

45°Brix		55°Brix		65°Brix	
velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)
10,1	1	6,1	1	3,96	1
16,2	1,1	14,2	1,1	9,77	1,1
23,8	1,19	21,8	1,19	17,2	1,19
33,3	1,29	29,7	1,29	24,7	1,29
42,8	1,38	38,1	1,38	32,4	1,38
52,3	1,48	46,9	1,48	40,3	1,48
61,7	1,57	56,3	1,57	48,4	1,57
71,1	1,67	66,3	1,67	56,9	1,67
80,8	1,76	76,6	1,76	65,7	1,76
90,9	1,86	87,6	1,86	74,7	1,86
		98,8	1,95	83,6	1,95
				92,9	2,05

Cuadro 5.4

Datos reológicos de velocidad de corte y esfuerzo de corte a 50°C

45°Brix		55°Brix		65°Brix	
velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	velocidad de Corte (1/s)	Esfuerzo de Corte (Pa)
9,1	1	5,9	1	4,05	1
15,3	1,1	12,3	1,1	10,9	1,1
22,7	1,19	19,2	1,19	17,4	1,19
32	1,29	26,3	1,29	24,3	1,29
41,3	1,38	34,8	1,38	31,6	1,38
50,7	1,48	43,8	1,48	39,2	1,48
60,4	1,57	53,5	1,57	47,9	1,57
70,3	1,67	63,5	1,67	56,7	1,67
80,7	1,76	74,1	1,76	65,8	1,76
91,6	1,86	85,5	1,86	75,5	1,86
		97,2	1,95	85,7	1,95
				96,1	2,05

En cumplimiento del tercer objetivo específico mencionado en 1.3 se muestran los reogramas asociados a las soluciones azucaradas a partir de los datos obtenidos en los cuadros 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 respectivamente, expresados en curvas de fluidez.

Grafico 5. 1
Curva de fluidez a 20°C

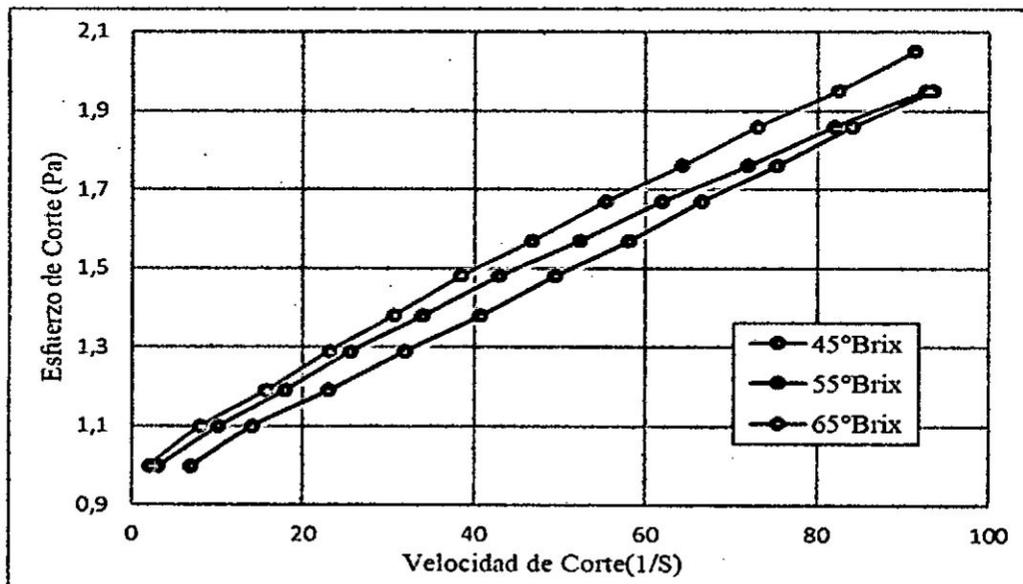


Grafico 5. 2
Curva de fluidez a 30°C

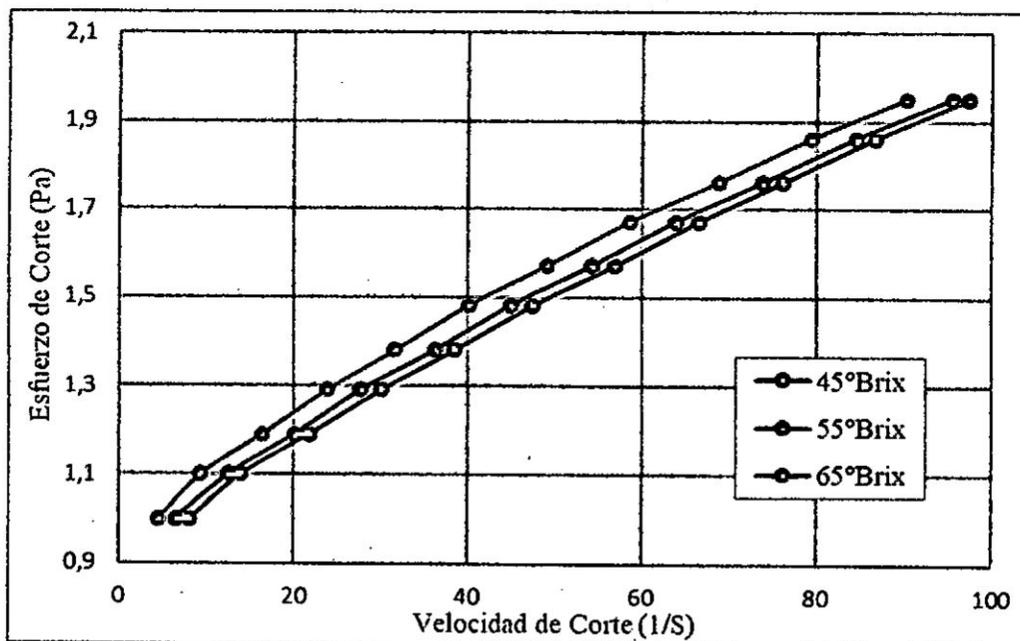


Grafico 5.3
Curva de fluidez a 40°C

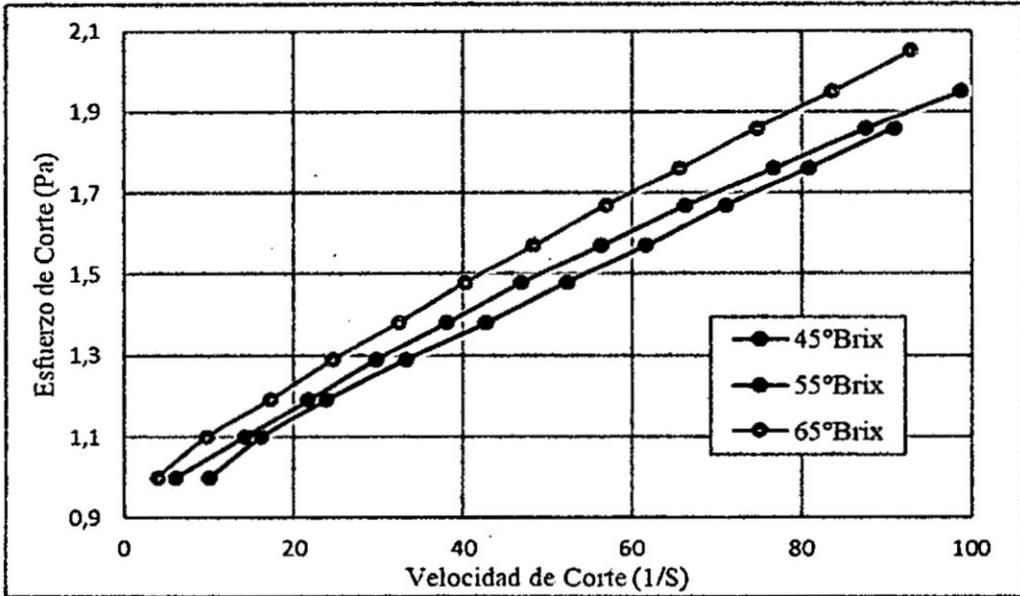
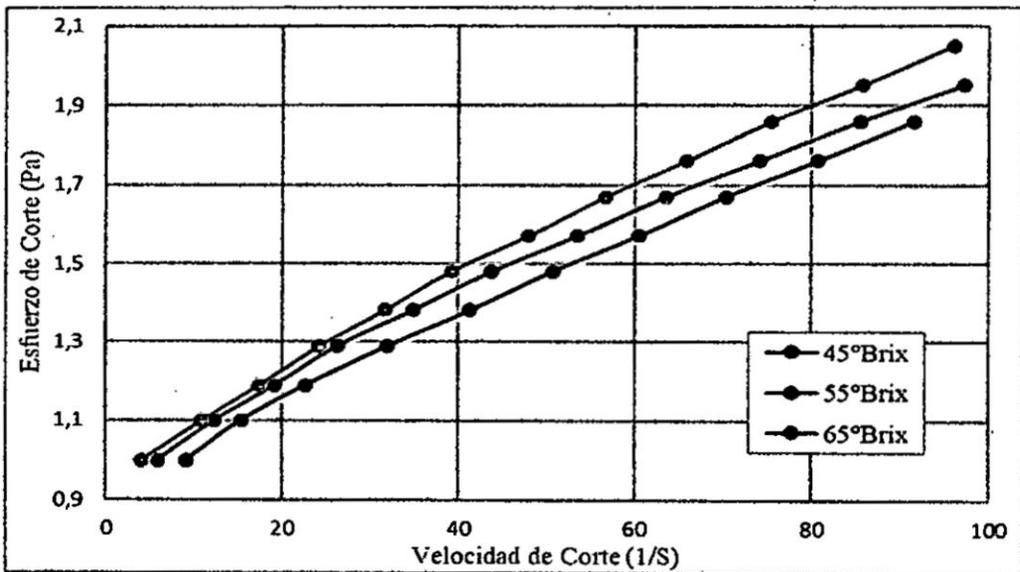


Grafico 5.4
Curva de fluidez a 50°C



Luego de realizar los reogramas se ha observado un comportamiento de fluido pseudoplástico con un pequeño valor de umbral de fluencia, por tal motivo se han escogido los modelos de Herschel-Bulkley, Vocadlo, Casson, Sisko y Ostwald de Waele para caracterizar las soluciones azucaradas.

5.1. Resultados de los parámetros de los modelos reológicos a partir de los datos experimentales

En cumplimiento con el segundo objetivo específico señalado en 1.3 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros reológicos de los modelos asociados a las soluciones azucaradas mediante el tratamiento estadístico de regresión no lineal.

5.1.1. Modelo Reológico de Herschel-Bulkley

Los datos obtenidos en los cuadros 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 son ajustados según el modelo de Herschel-Bulkley.

Cuadro 5.5
Parámetros en la regresión de Herschel-Bulkley

Forma estándar	Forma para regresión	Parámetros
$\tau = \tau_0 + k \left(\frac{du}{dy} \right)^n$	$\tau = \tau_0 + k\gamma^n$	τ_0, k, n

Cuadro 5.6
Resultados de los parámetros de Herschel-Bulkley a 20°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,9238213	0,935742689	0,960453819
k	0,0129435	0,024348279	0,02181829
n	0,9646572	0,824410756	0,865918988
R^2	0,9996965	0,9998718	0,9998531
Varianza	3,77E-05	1,59E-05	2,11E-05

Cuadro 5.7
Resultados de los parámetros de Herschel-Bulkley a 30°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,846598225	0,858639708	0,881639097
k	0,031340076	0,034474305	0,041447366
n	0,778178521	0,75856577	0,722118136
R^2	0,9997968	0,9998566	0,9997847
Varianza	2,52E-05	1,78E-05	2,67E-05

Cuadro 5.8

Resultados de los parámetros de Herschel-Bulkley a 40°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,851950924	0,872239857	0,92724719
k	0,023315269	0,028534211	0,02359459
n	0,833986723	0,79211743	0,85214873
R^2	0,9992874	0,9996419	0,9998854
Varianza	7,60E-05	4,44E-05	1,65E-05

Cuadro 5.9

Resultados de los parámetros de Herschel-Bulkley a 50°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,840159133	0,841094781	0,890430414
k	0,030091361	0,04475129	0,034013635
n	0,77919949	0,702047684	0,773719465
R^2	0,9996345	0,999856	0,9996798
Varianza	3,90E-05	1,79E-05	4,60E-05

Cuadro 5.10
Resultados de la regresión de Herschel-Bulkley

Velocidad de Corte (1/s)	20°C						30°C						40°C						50°C					
	45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix	
	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.S)
5	0,98496	0,19699	1,02751	0,20550	1,04837	0,20967	0,95625	0,19125	0,97551	0,19510	1,01415	0,20283	0,94119	0,18824	0,97434	0,19487	1,02024	0,20405	0,94562	0,18912	0,97962	0,19592	1,00859	0,20172
10	1,04314	0,10431	1,09825	0,10983	1,12068	0,11207	1,03465	0,10347	1,05636	0,10564	1,10022	0,11002	1,01104	0,10110	1,04904	0,10490	1,09511	0,10951	1,02114	0,10211	1,06644	0,10664	1,09244	0,10924
20	1,15668	0,05783	1,22352	0,06118	1,25247	0,06262	1,16910	0,05846	1,19315	0,05965	1,24221	0,06211	1,13554	0,05678	1,17839	0,05892	1,23028	0,06151	1,15076	0,05754	1,20769	0,06038	1,23580	0,06179
30	1,26814	0,04227	1,33774	0,04459	1,37530	0,04584	1,28874	0,04296	1,31362	0,04379	1,36487	0,04550	1,24964	0,04165	1,29434	0,04314	1,35534	0,04518	1,26616	0,04221	1,32842	0,04428	1,36307	0,04544
40	1,37828	0,03446	1,44534	0,03613	1,49265	0,03732	1,39968	0,03499	1,42457	0,03561	1,47644	0,03691	1,35747	0,03394	1,40237	0,03506	1,47427	0,03686	1,37321	0,03433	1,43748	0,03594	1,48090	0,03702
50	1,48743	0,02975	1,54826	0,03097	1,60609	0,03212	1,50456	0,03009	1,52895	0,03058	1,58044	0,03161	1,46087	0,02922	1,50487	0,03010	1,58884	0,03178	1,47444	0,02949	1,53863	0,03077	1,59218	0,03184
60	1,59580	0,02660	1,64760	0,02746	1,71651	0,02861	1,60486	0,02675	1,62837	0,02714	1,67877	0,02798	1,56087	0,02601	1,60316	0,02672	1,70004	0,02833	1,57126	0,02619	1,63387	0,02723	1,69849	0,02831
70	1,70354	0,02434	1,74407	0,02492	1,82448	0,02606	1,70150	0,02431	1,72385	0,02463	1,77263	0,02532	1,65812	0,02369	1,69809	0,02426	1,80852	0,02584	1,66457	0,02378	1,72448	0,02464	1,80085	0,02573
80	1,81075	0,02263	1,83814	0,02298	1,93039	0,02413	1,79511	0,02244	1,81609	0,02277	1,86283	0,02329	1,75309	0,02191	1,79023	0,02238	1,91473	0,02393	1,75496	0,02194	1,81130	0,02264	1,89994	0,02375
90	1,91745	0,02131	1,93016	0,02145	2,03453	0,02261	1,88616	0,02096	1,90557	0,02117	1,94993	0,02167	1,84610	0,02051	1,88000	0,02089	2,01898	0,02243	1,84290	0,02048	1,89494	0,02105	1,99626	0,02218
100	2,02375	0,02024	2,02039	0,02020	2,13713	0,02137	1,97498	0,01975	1,99268	0,01993	2,03438	0,02034	1,93741	0,01937	1,96771	0,01968	2,12154	0,02122	1,92869	0,01929	1,97585	0,01976	2,09018	0,02090

Grafico 5. 5
Curvas de Fluidez a 20°C del modelo de Herschel-Bulkley

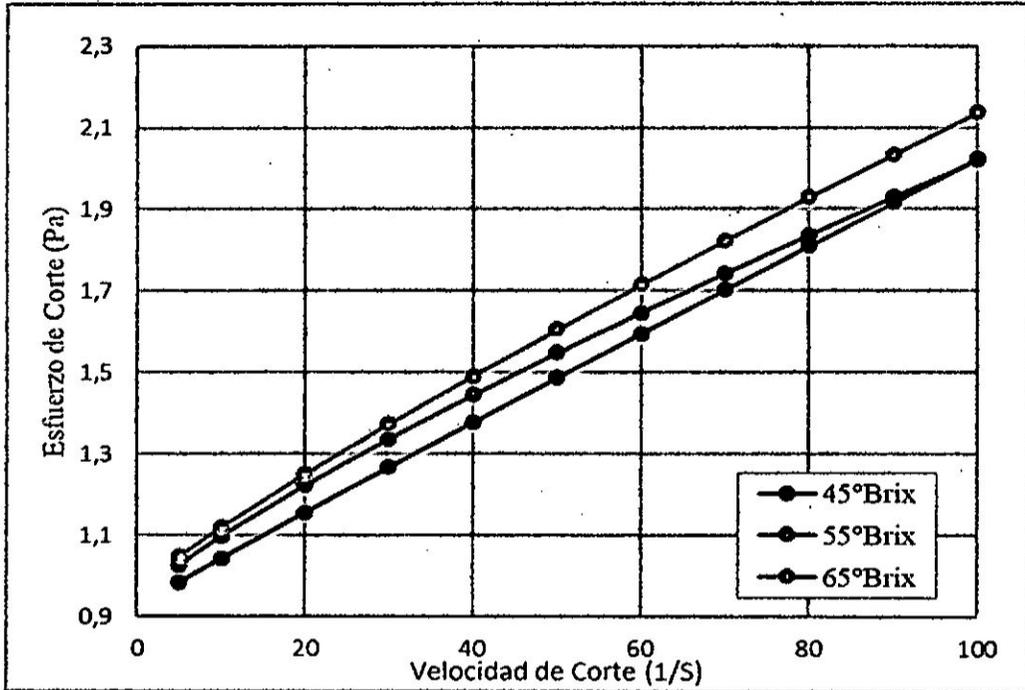


Grafico 5. 6
Curvas de viscosidad a 20°C del modelo de Herschel-Bulkley

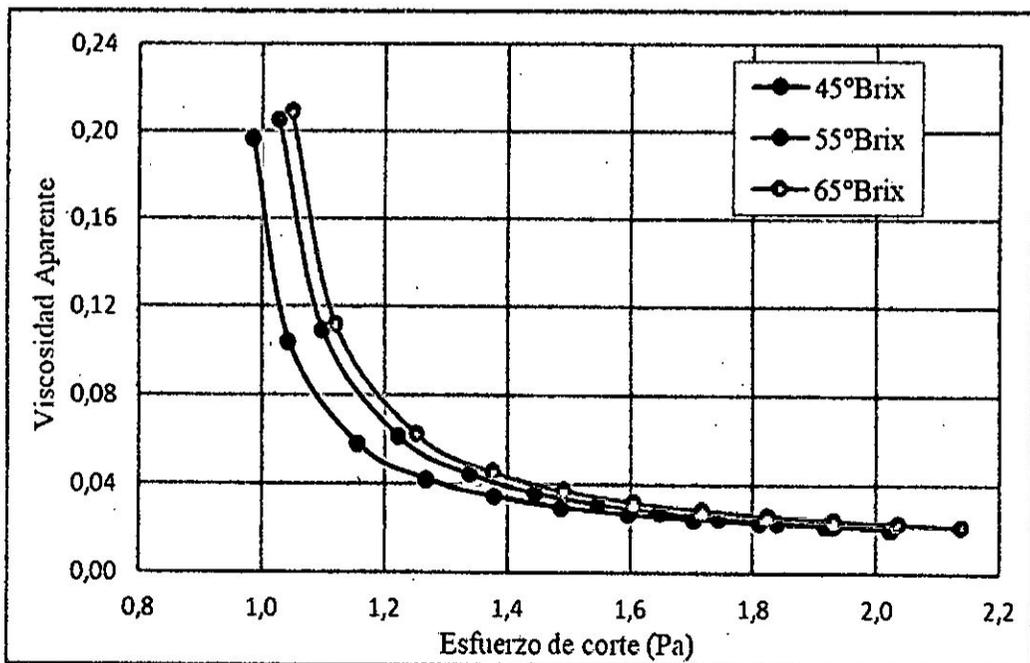


Grafico 5.7

Curvas de Fluidiez a 30°C del modelo de Herschel-Bulkley

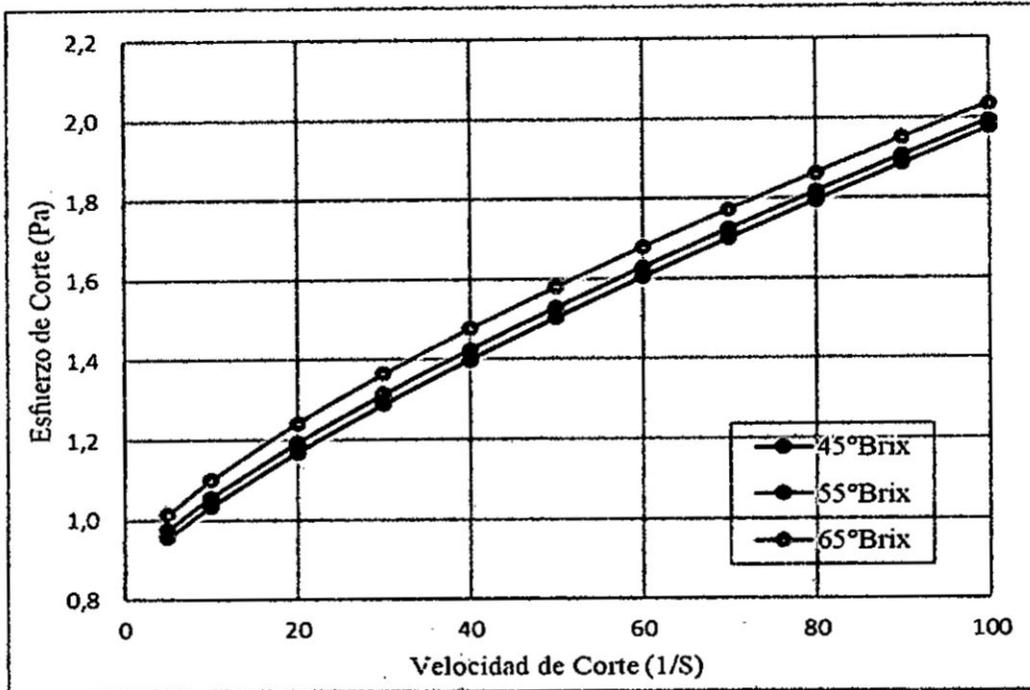


Grafico 5.8

Curvas de viscosidad a 30°C del modelo de Herschel-Bulkley

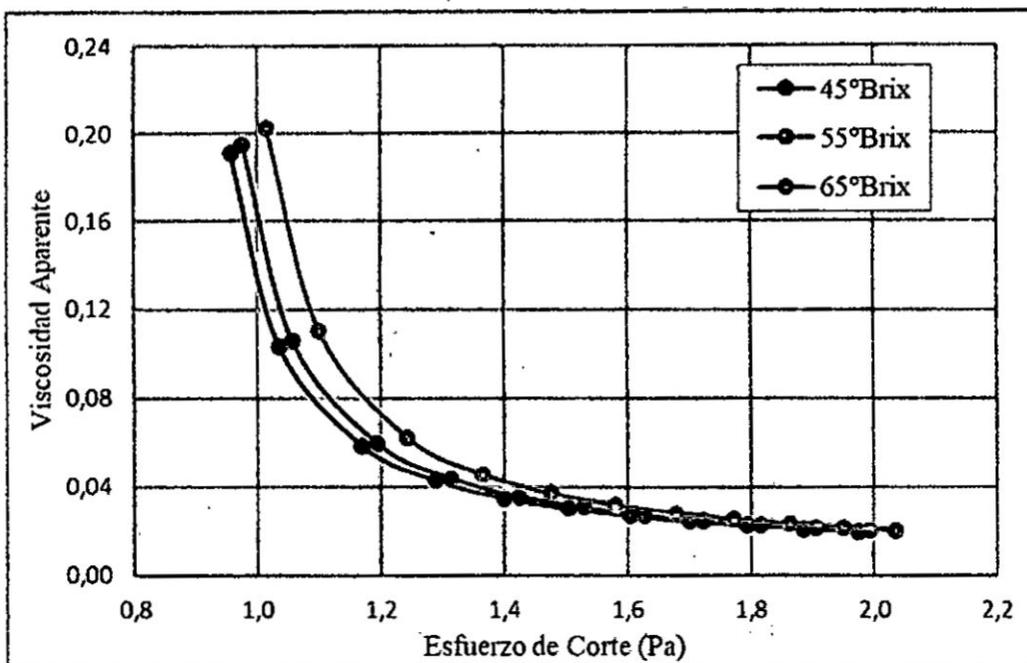


Grafico 5. 9
Curvas de Fluidez a 40°C del modelo de Herschel-Bulkley

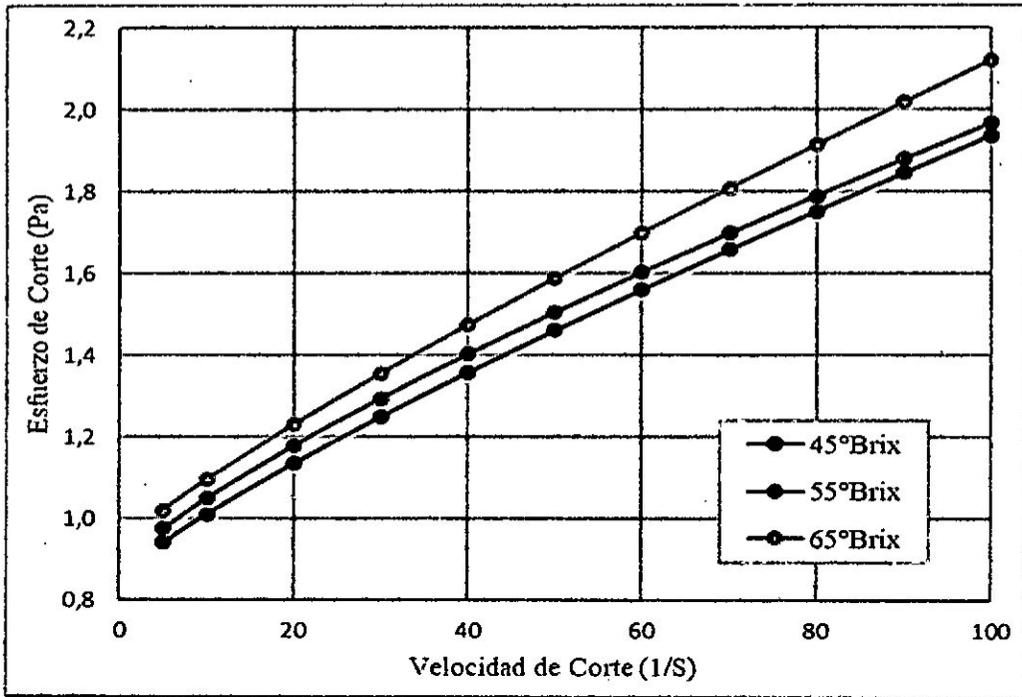


Grafico 5. 10
Curvas de viscosidad a 40°C del modelo de Herschel-Bulkley

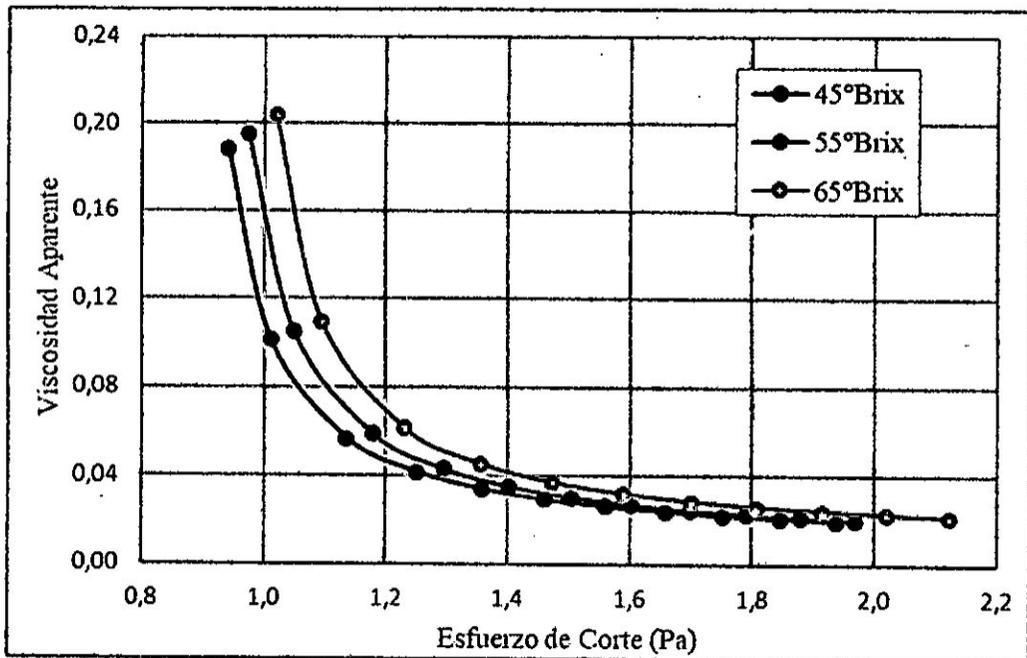


Grafico 5. 11

Curvas de Fluidez a 50°C del modelo de Herschel-Bulkley

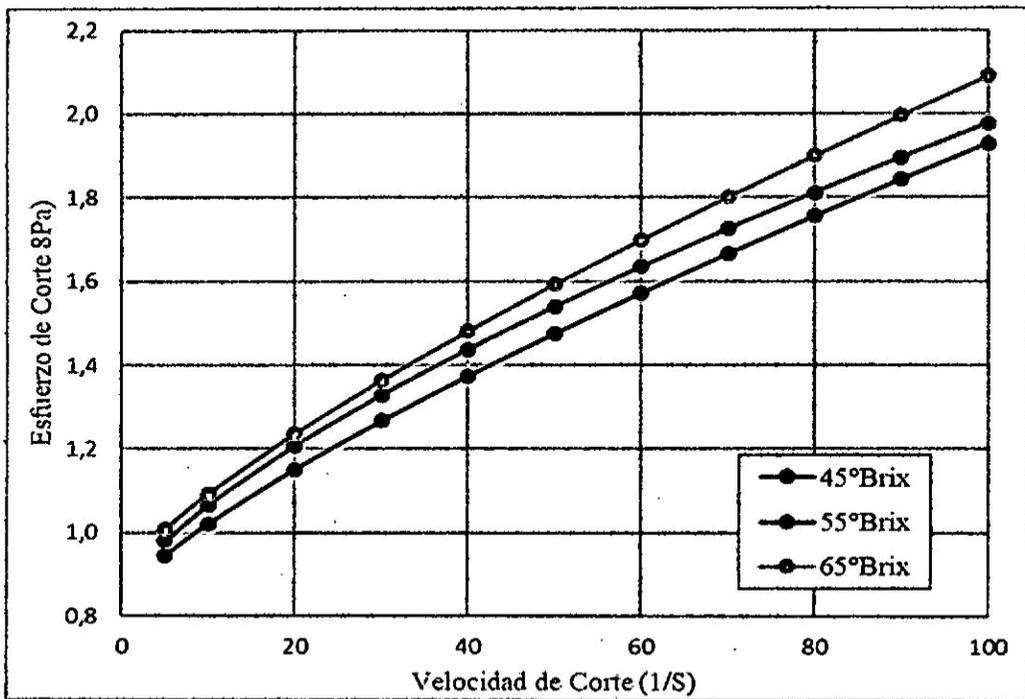
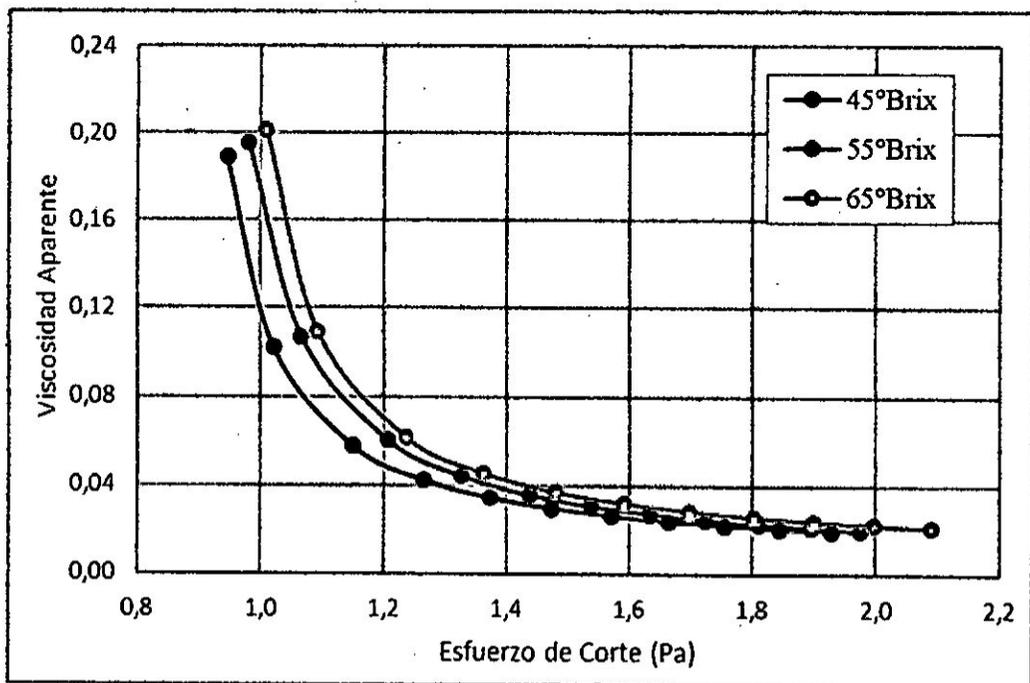


Grafico 5. 12

Curvas de viscosidad a 50°C del modelo de Herschel-Bulkley



5.1.2. Modelo Reológico de Vocadlo

Los datos obtenidos en los cuadros 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 son ajustados según el modelo de Vocadlo. A continuación, se muestran los parámetros del modelo.

Cuadro 5.11

Parámetros de regresión para el modelo de Vocadlo

Forma estándar	Forma para regresión	Parámetros
$\tau = \left(\tau_0^{1/n} + k \frac{du}{dy} \right)^n$	$\tau = (\tau_0^{1/n} + k\gamma)^n$	τ_0, k, n

Cuadro 5.12

Resultados de los parámetros de Vocadlo a 20°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,929745955	0,958882928	0,976791921
k	0,01255454	0,023526694	0,021730522
n	0,905293017	0,588631496	0,661312177
R^2	0,9996792	0,9998972	0,9998124
Varianza	3,98E-05	1,28E-05	2,70E-05

Cuadro 5.13

Resultados de los parámetros de Vocadlo a 30°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,892435606	0,905833591	0,933099173
k	0,024204888	0,02726491	0,034439749
n	0,577371148	0,541207683	0,483249733
R^2	0,9996957	0,9998252	0,9996531
Varianza	3,78E-05	2,17E-05	4,31E-05

Cuadro 5.14

Resultados de los parámetros de Vocadlo a 40°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,886106348	0,908010492	0,950245986
k	0,018867736	0,023978969	0,021906563
n	0,660000082	0,573557038	0,659615133
R^2	0,9990708	0,9998592	0,9998199
Varianza	9,92E-05	1,75E-05	2,59E-05

Cuadro 5.15

Resultados de los parámetros de Vocadlo a 50°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,885681517	0,902464479	0,928749165
k	0,023097991	0,033442943	0,029441421
n	0,57567745	0,476636843	0,547866392
R^2	0,9994244	0,9998793	0,9998877
Varianza	6,14E-05	1,50E-05	1,61E-05

Grafico 5. 13

Curvas de Fluidez a 20°C para el modelo de Vocadlo

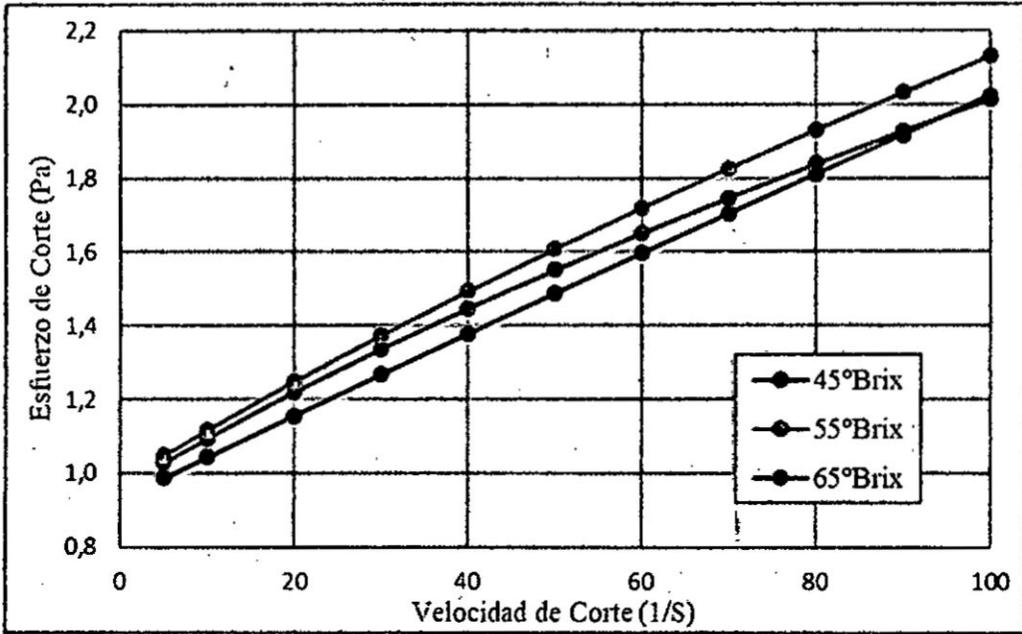


Grafico 5. 14

Curvas de viscosidad a 20°C para el modelo de Vocadlo

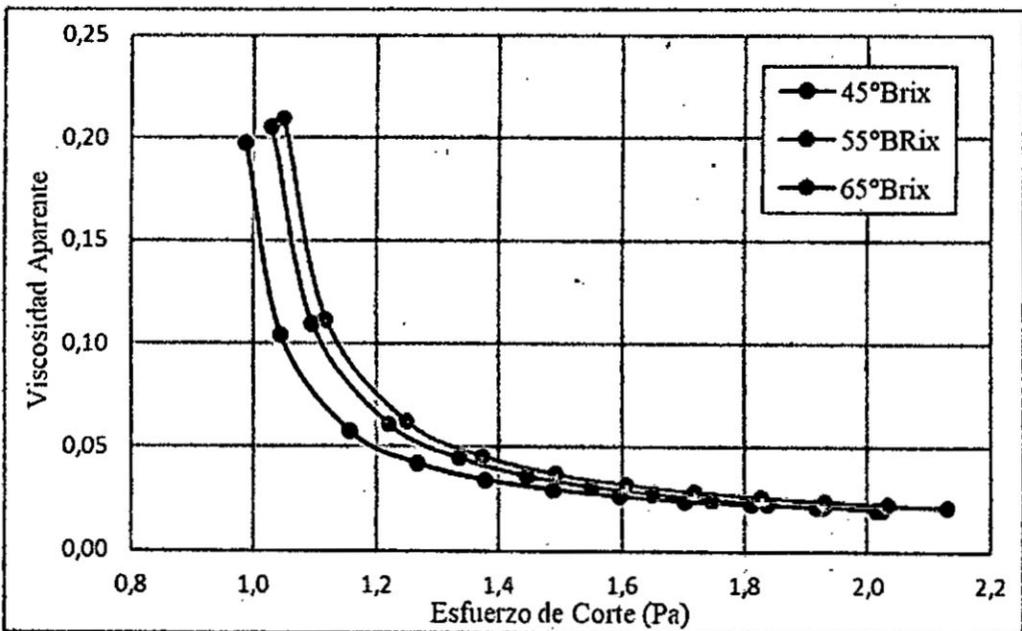


Grafico 5. 15
 Curvas de Fluidez a 30°C para el modelo de Vocadlo

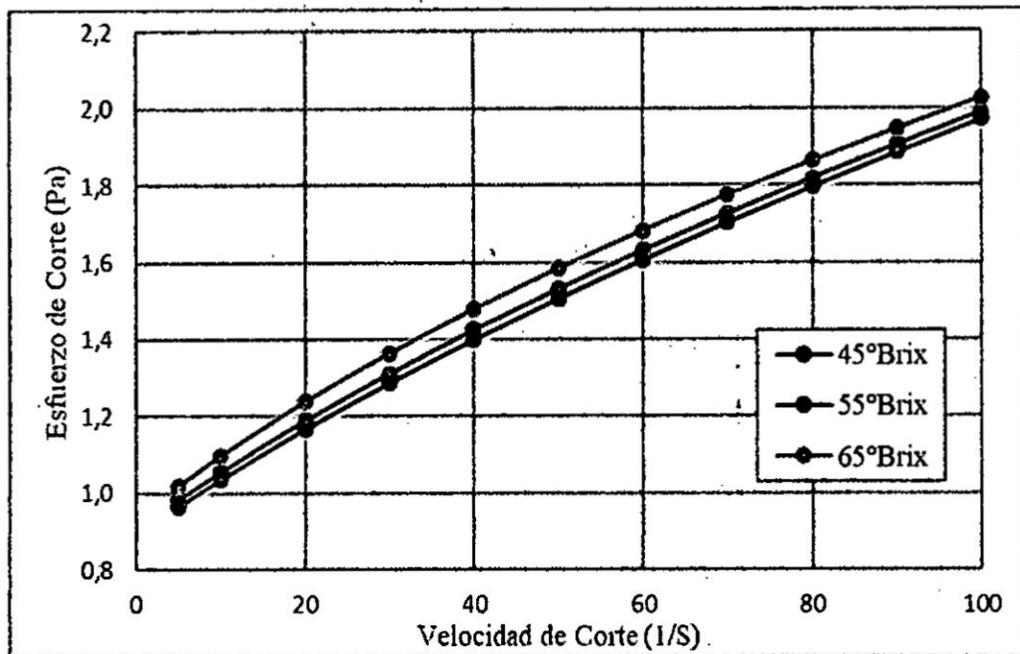


Grafico 5. 16
 Curvas de viscosidad a 30°C para el modelo de Vocadlo

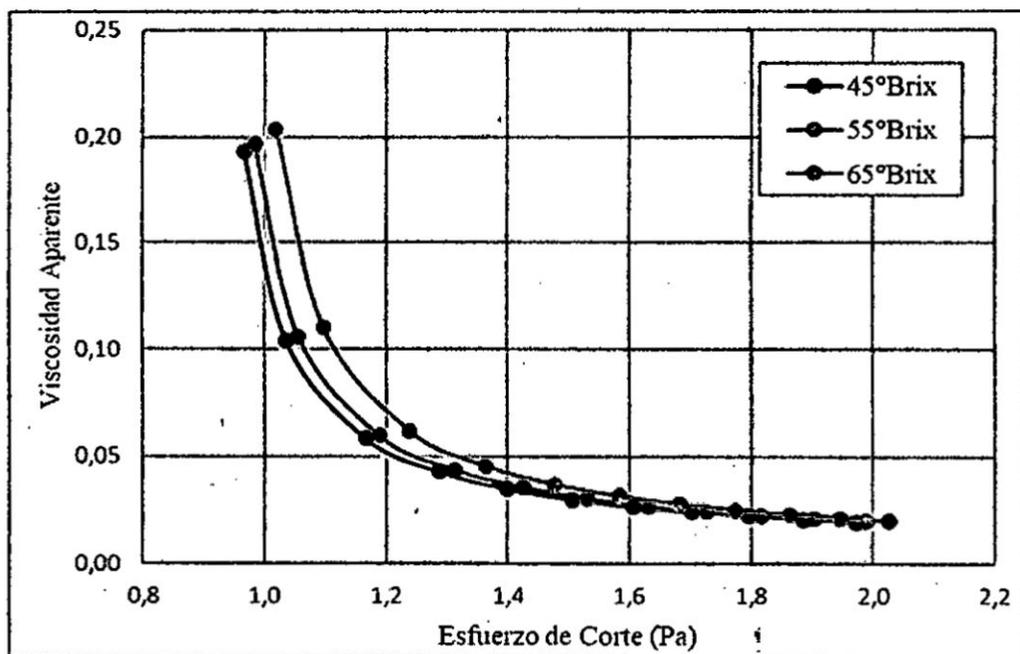


Grafico 5. 17
Curvas de Fluidez a 40°C para el modelo de Vocadlo

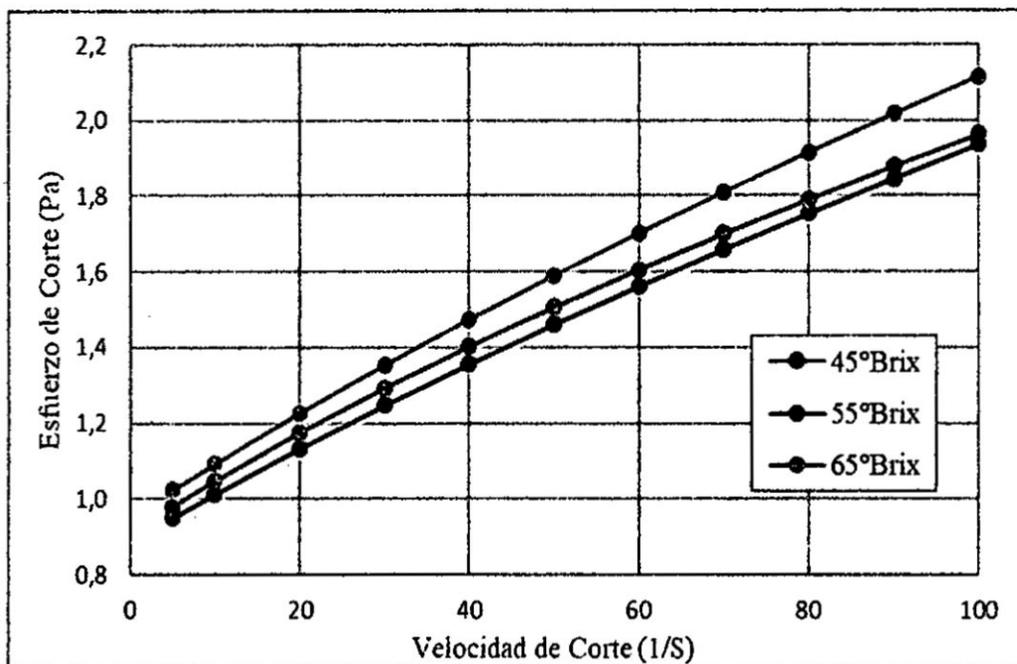
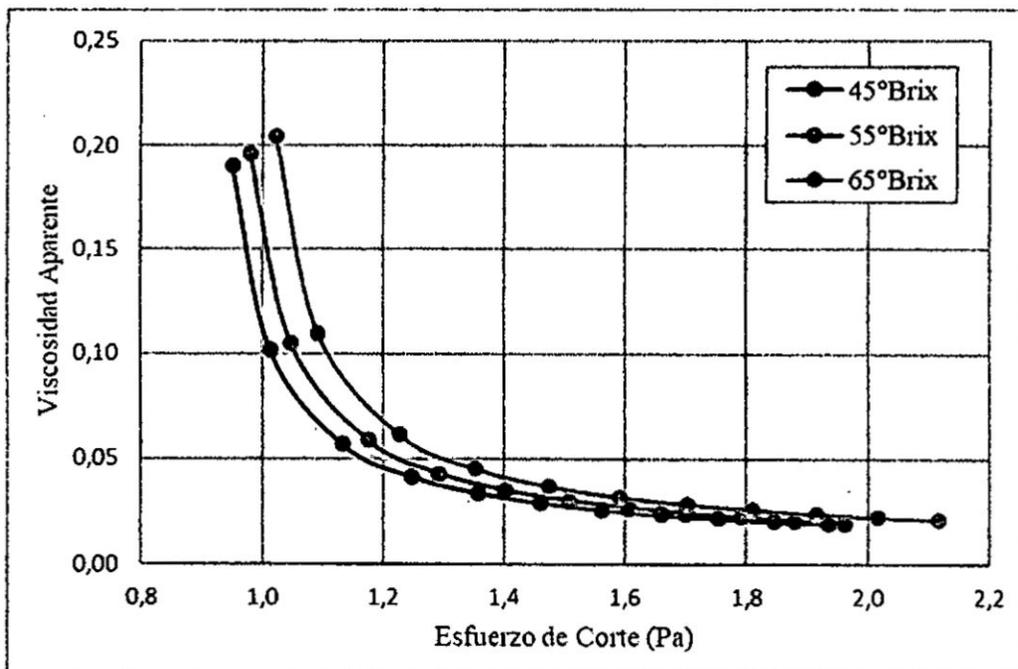


Grafico 5. 18
Curvas de viscosidad a 40°C para el modelo de Vocadlo



5.1.3. Modelo Reológico de Sisko

Los datos obtenidos en los cuadros 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 son ajustados según el modelo de Vocadlo. A continuación, se muestran los parámetros del modelo.

Cuadro 5.17
Parámetros para la regresión del modelo de Sisko

Forma estándar	Forma para regresión	Parámetros
$\tau = A \left(\frac{du}{dy}\right) + B \left(\frac{du}{dy}\right)^n$	$y = Ay + By^n$	A, B, n

Cuadro 5.18
Resultados de los parámetros de Sisko a 20°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
A	0,0105499	0,0091056	0,0104765
B	0,9061972	0,9184773	0,9519901
n	0,0146918	0,0432877	0,0316249
R^2	0,9997329	0,9994664	0,9996366
Varianza	3,32E-05	6,62E-05	5,22E-05

Cuadro 5.19
Resultados de los parámetros de Sisko a 30°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
A	0,008239059	0,008173794	0,008072655
B	0,782714918	0,80679068	0,848408091
n	0,084738074	0,08311876	0,082531458
R^2	0,9998002	0,9996548	0,9995613
Varianza	2,48E-05	4,28E-05	5,44E-05

Cuadro 5.20

Resultados de los parámetros de Sisko a 40°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
<i>A</i>	0,00861451	0,00843687	0,01021852
<i>B</i>	0,784778134	0,829483746	0,899132097
<i>n</i>	0,06935299	0,067267492	0,04547682
R^2	0,999575	0,999057	0,999803
Varianza	4,54E-05	1,17E-04	2,83E-05

Cuadro 5.21

Resultados de los parámetros de Sisko a 50°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
<i>A</i>	0,007954137	0,007365125	0,009203952
<i>B</i>	0,773933524	0,796104803	0,86065101
<i>n</i>	0,083991737	0,097544486	0,068721077
R^2	0,9998338	0,9994214	0,9989134
Varianza	1,77E-05	7,18E-05	1,56E-04

Cuadro 5.22

Resultados de la regresión para el modelo de Sisko

Velocidad de Corte (1/s)	20°C						30°C						40°C						50°C					
	45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix	
	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)
5	0,98063	0,19513	1,03028	0,20606	1,05408	0,21082	0,93822	0,18766	0,96314	0,19263	1,00929	0,20186	0,92152	0,18410	0,96651	0,19330	1,01850	0,20370	0,92573	0,18515	0,96826	0,19365	1,00732	0,20146
10	1,04288	0,10429	1,10580	0,11058	1,12866	0,11287	1,03374	0,10337	1,05870	0,10587	1,10670	0,11067	1,00681	0,10068	1,05281	0,10528	1,10058	0,11006	1,01861	0,10186	1,07024	0,10702	1,10024	0,11002
20	1,15797	0,05790	1,22776	0,06139	1,25612	0,06281	1,17369	0,05868	1,19838	0,05992	1,24783	0,06239	1,13129	0,05691	1,18341	0,05917	1,23473	0,06174	1,15444	0,05772	1,21360	0,06068	1,24147	0,06207
30	1,26913	0,04230	1,33734	0,04458	1,37439	0,04581	1,29134	0,04304	1,31559	0,04385	1,36553	0,04552	1,25199	0,04173	1,29583	0,04319	1,35609	0,04520	1,26846	0,04228	1,33027	0,04434	1,36339	0,04545
40	1,37866	0,03447	1,44173	0,03604	1,48885	0,03722	1,39950	0,03499	1,42323	0,03558	1,47324	0,03683	1,35115	0,03395	1,40058	0,03501	1,47210	0,03680	1,37319	0,03433	1,43549	0,03589	1,47713	0,03695
50	1,48730	0,02975	1,54324	0,03086	1,60119	0,03202	1,50231	0,03005	1,52549	0,03051	1,57535	0,03151	1,46111	0,02920	1,50102	0,03002	1,58513	0,03170	1,47269	0,02945	1,53425	0,03068	1,58631	0,03173
60	1,59537	0,02659	1,64292	0,02738	1,71219	0,02854	1,60162	0,02669	1,62429	0,02707	1,67384	0,02790	1,55135	0,02599	1,59871	0,02665	1,69626	0,02827	1,66882	0,02615	1,62882	0,02715	1,69255	0,02821
70	1,70305	0,02433	1,74132	0,02488	1,82225	0,02603	1,69863	0,02427	1,72064	0,02458	1,76980	0,02528	1,65170	0,02367	1,69446	0,02421	1,80607	0,02580	1,66259	0,02375	1,72045	0,02458	1,79673	0,02567
80	1,81045	0,02263	1,83877	0,02298	1,93162	0,02415	1,79379	0,02242	1,81520	0,02269	1,86387	0,02330	1,75765	0,02191	1,78879	0,02236	1,91489	0,02394	1,75460	0,02193	1,80990	0,02262	1,89940	0,02374
90	1,91762	0,02131	1,93550	0,02151	2,04047	0,02267	1,88750	0,02097	1,90836	0,02120	1,95650	0,02174	1,84751	0,02053	1,88202	0,02091	2,02297	0,02248	1,84526	0,02050	1,89766	0,02109	2,00089	0,02223
100	2,02462	0,02025	2,03166	0,02032	2,14889	0,02149	1,98023	0,01980	2,00042	0,02000	2,04797	0,02048	1,94152	0,01942	1,97438	0,01974	2,13046	0,02130	1,93484	0,01935	1,98407	0,01984	2,10145	0,02101

Grafico 5. 21
Curvas de Fluidez a 20°C para el modelo de Sisko

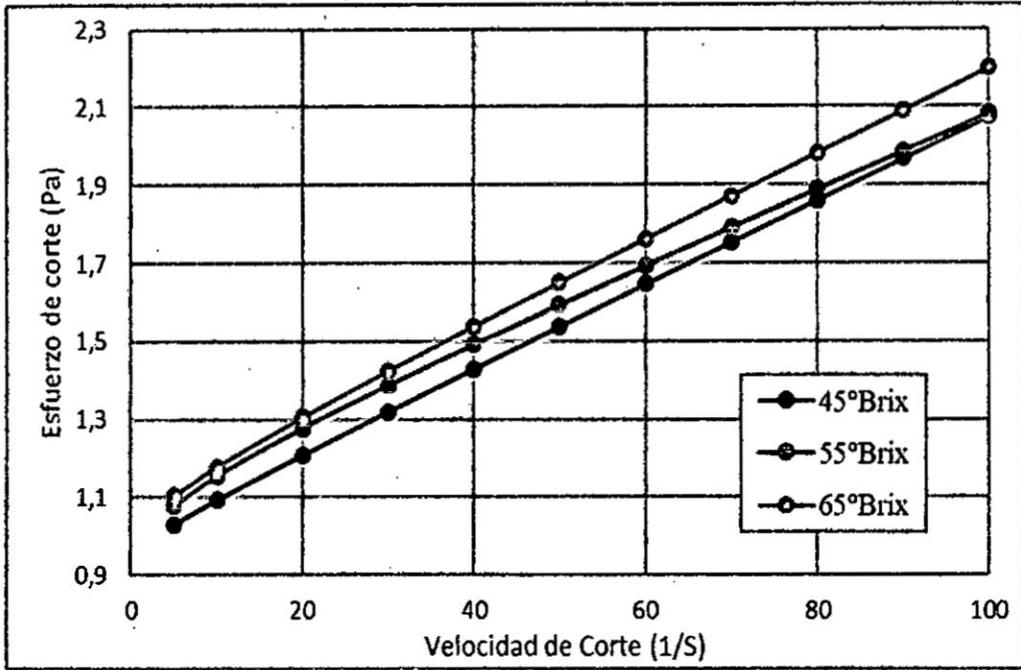


Grafico 5. 22
Curvas de viscosidad a 20°C para el modelo de Sisko

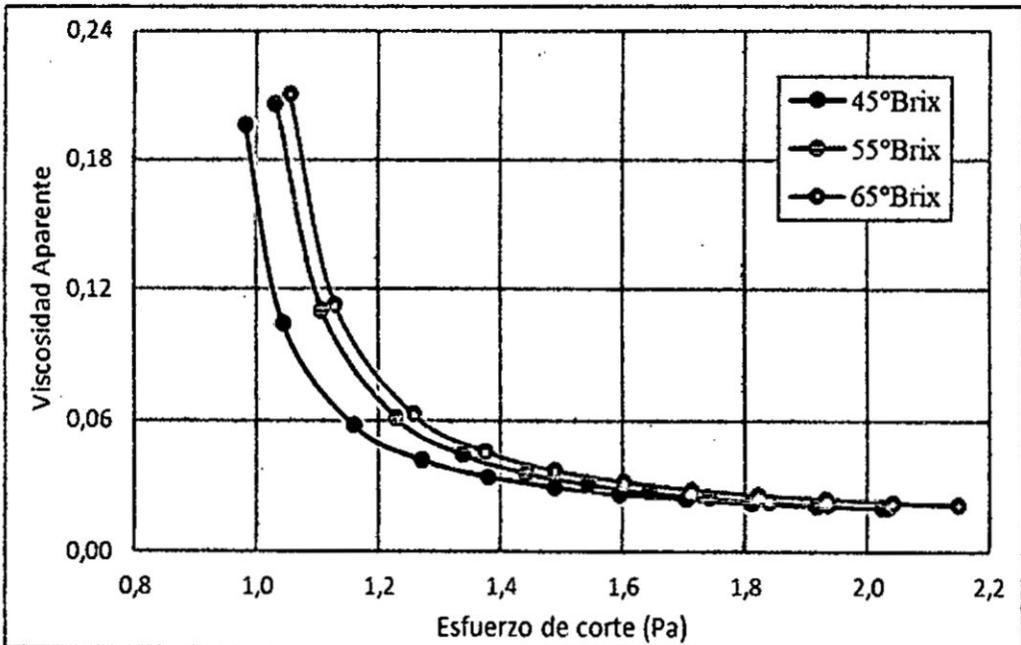


Grafico 5. 23
Curvas de Fluidiez a 30°C para el modelo de Sisko

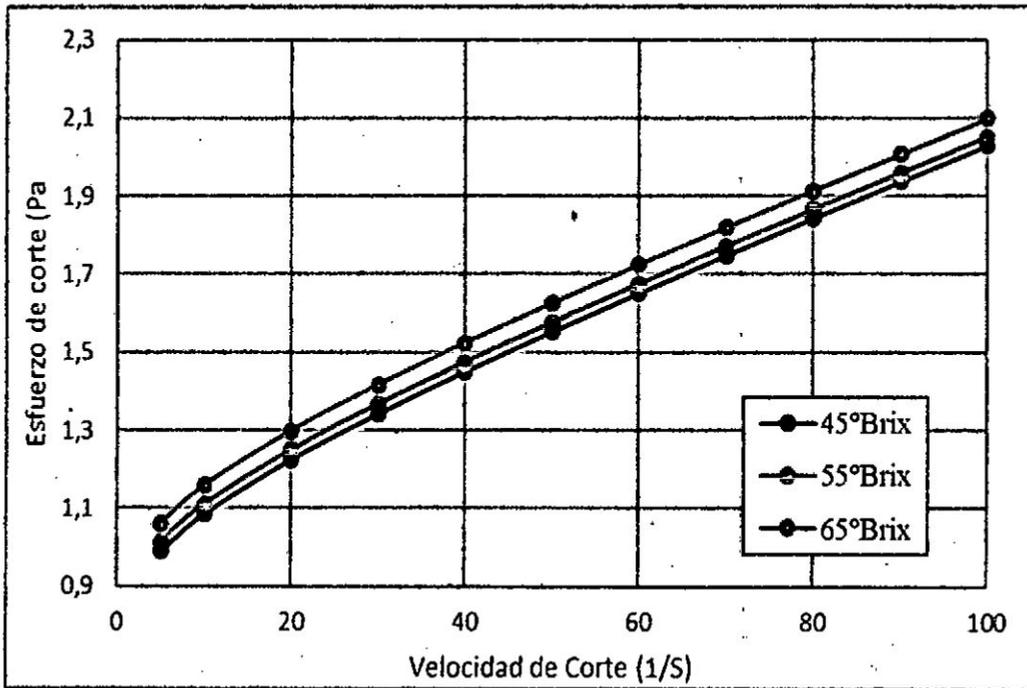


Grafico 5. 24
Curvas de viscosidad a 30°C para el modelo de Sisko

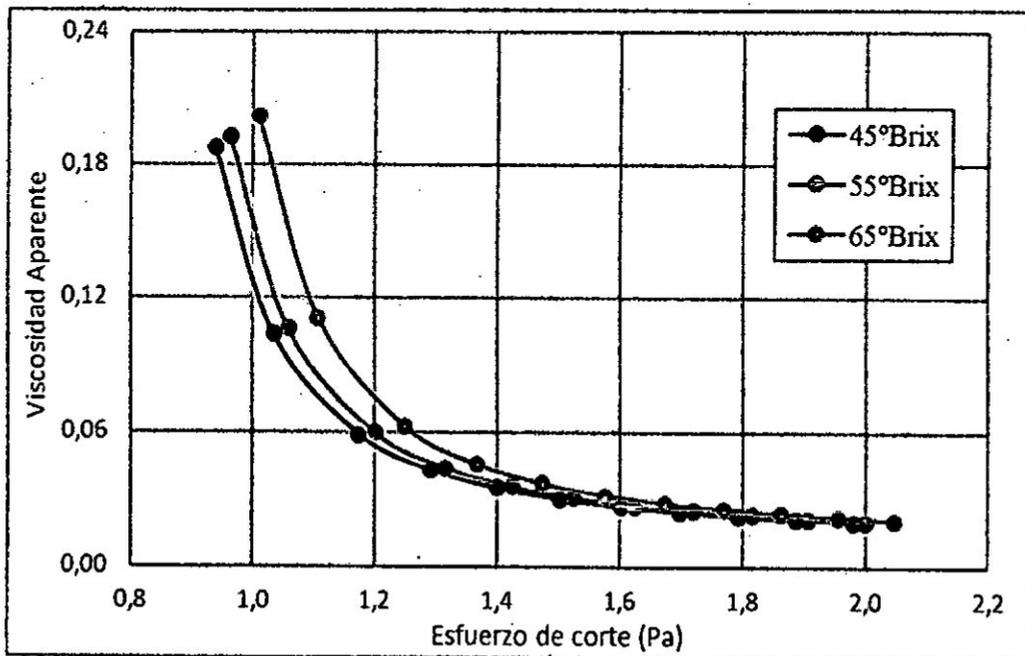


Grafico 5. 25
Curvas de Fluidiez a 40°C del modelo de Sisko

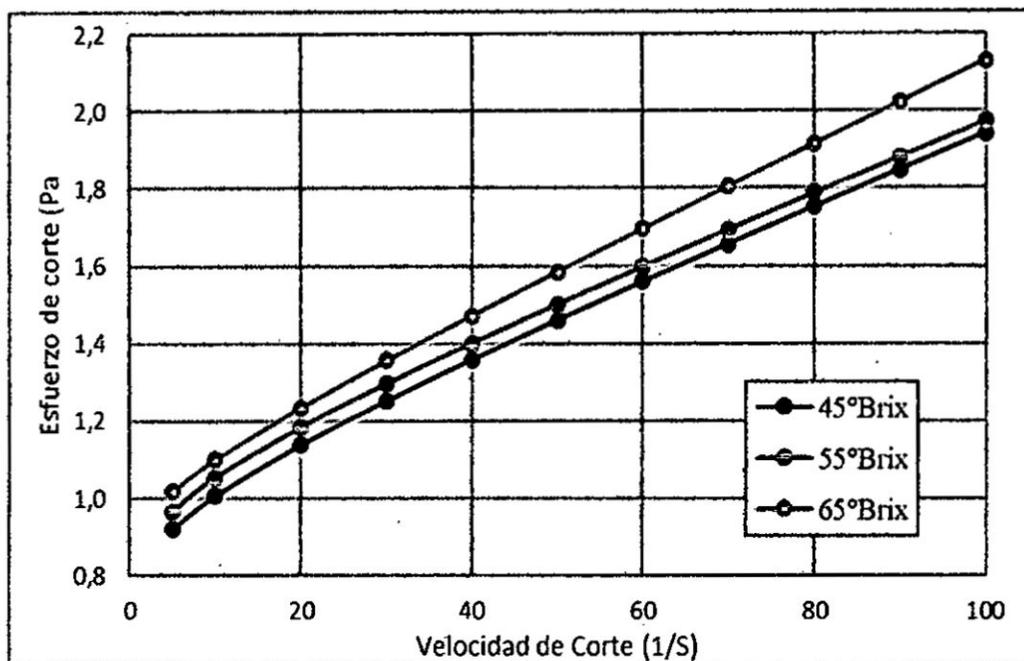


Grafico 5. 26
Curvas de viscosidad a 40°C del modelo de Sisko

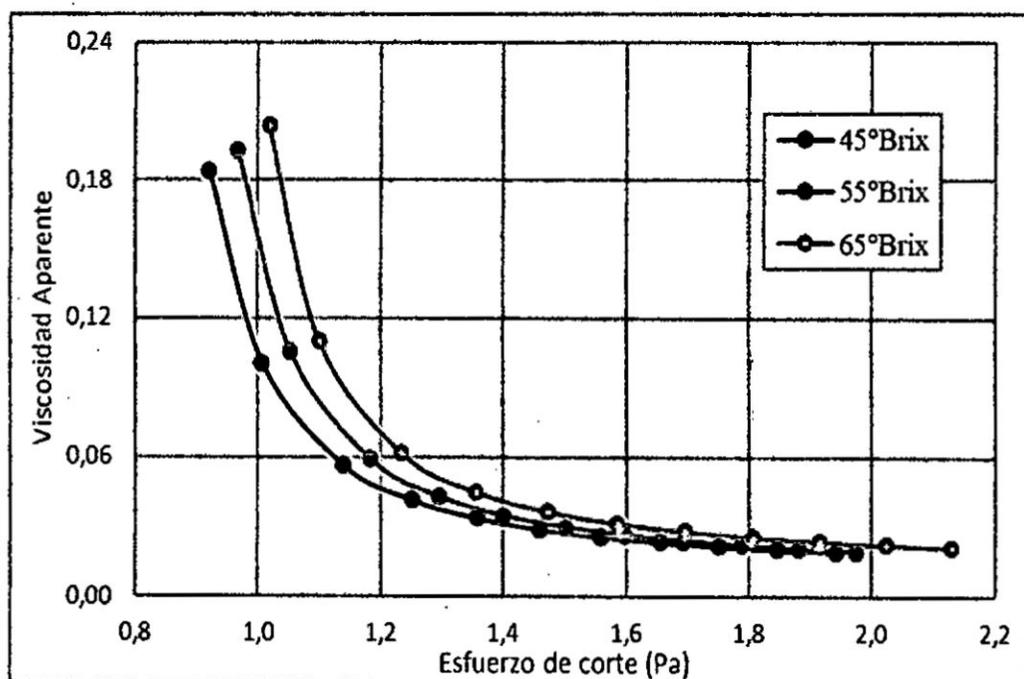


Grafico 5. 27
Curvas de Fluidiez a 50°C del modelo de Sisko

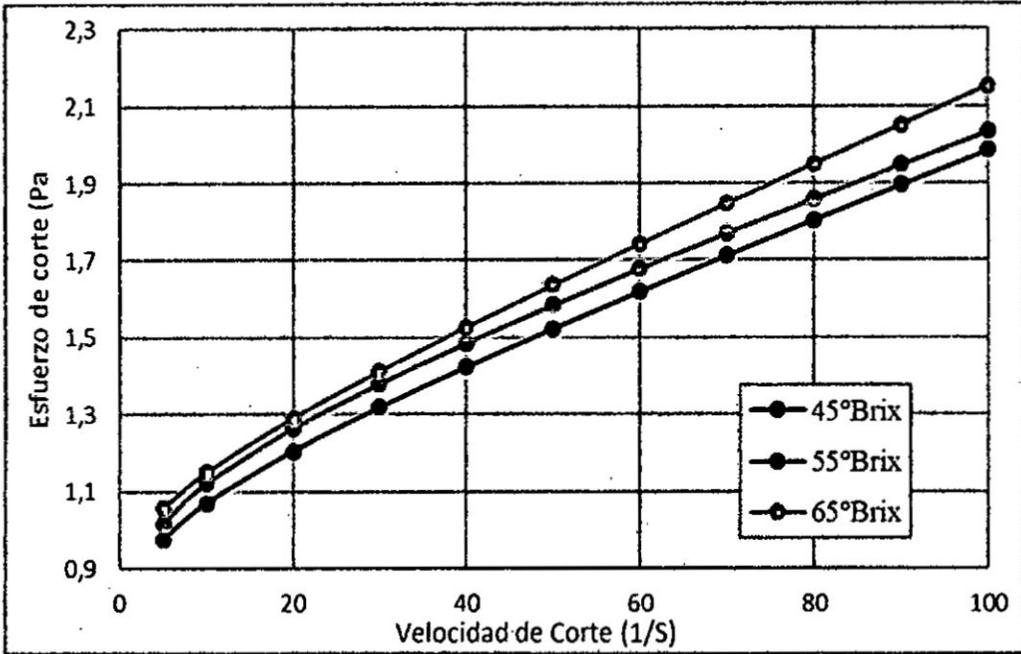
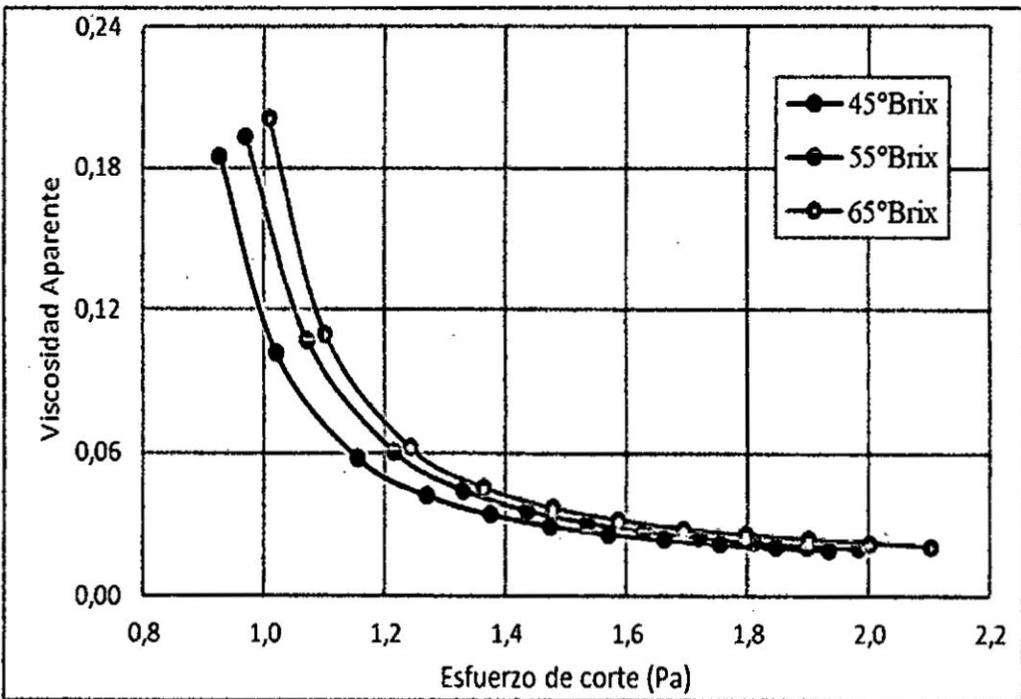


Grafico 5. 28
Curvas de viscosidad a 50°C del modelo de Sisko



5.1.4. Modelo Reológico de Casson

Los datos obtenidos en los cuadros 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 son ajustados según el modelo de Casson. A continuación, se muestran los parámetros del modelo.

Cuadro 5.23
Parámetros para la regresión del modelo de Casson

Forma estándar	Forma para regresión	Parámetros
$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + k \left(\frac{du}{dy} \right)^{1/2}$	$\tau = (\tau_0^{1/2} + k\gamma^{1/2})^2$	τ_0, k

Cuadro 5.24
Resultados de los parámetros de Casson a 20°

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,670925105	0,770904517	0,775338045
k	0,058306503	0,05283019	0,05601127
R^2	0,9898802	0,9931299	0,9893656
Varianza	1,12E-03	0,0007579	1,38E-03

Cuadro 5.25
Resultados de los parámetros de Casson a 30°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,684700323	0,713069219	0,76528195
k	0,057128787	0,056045588	0,054482551
R^2	0,9981422	0,9982031	0,9985077
Varianza	2,05E-04	1,98E-04	1,65E-04

Cuadro 5.26
Resultados de los parámetros de Casson a 40°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,658885169	0,706612439	0,731563627
k	0,056956949	0,055424689	0,058487187
R^2	0,9969037	0,9965488	0,9934943
Varianza	2,89E-04	3,81E-04	8,42E-04

Cuadro 5.27
Resultados de los parámetros de Casson a 50°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
τ_0	0,681929725	0,735135474	0,735443744
k	0,055535642	0,05448901	0,057915953
R^2	0,9981735	0,9991991	0,9966363
Varianza	1,71E-04	8,84E-05	4,35E-04

Cuadro 5.28
Resultados de la regresión del modelo de Casson

Velocidad de Corte (1/s)	20°C						30°C						40°C						50°C					
	45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix	
	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)
5	0,90151	0,18030	0,99230	0,19846	1,01159	0,20232	0,91243	0,18249	0,94043	0,18809	0,99327	0,19865	0,88187	0,17637	0,93033	0,18607	0,97239	0,19448	0,90245	0,18049	0,95891	0,19178	0,97434	0,19487
10	1,00698	0,10070	1,09218	0,10922	1,11864	0,11186	1,01631	0,10163	1,04380	0,10438	1,09640	0,10964	0,98373	0,09837	1,03199	0,10320	1,08216	0,10822	1,00282	0,10028	1,06030	0,10603	1,08311	0,10831
20	1,16609	0,05830	1,24161	0,06208	1,27921	0,06396	1,17279	0,05864	1,19920	0,05996	1,25095	0,06255	1,13729	0,05686	1,18477	0,05924	1,24742	0,06237	1,15381	0,05769	1,21238	0,06062	1,24677	0,06234
30	1,29609	0,04320	1,36275	0,04543	1,40973	0,04699	1,30045	0,04335	1,32574	0,04419	1,37644	0,04588	1,26266	0,04209	1,30914	0,04364	1,38218	0,04607	1,27684	0,04256	1,33599	0,04453	1,38015	0,04601
40	1,41102	0,03528	1,46928	0,03673	1,52468	0,03812	1,41320	0,03533	1,43736	0,03593	1,48689	0,03717	1,37345	0,03434	1,41881	0,03547	1,50116	0,03753	1,38540	0,03463	1,44485	0,03612	1,49786	0,03745
50	1,51632	0,03033	1,56645	0,03133	1,62969	0,03259	1,51641	0,03033	1,53943	0,03079	1,58774	0,03175	1,47492	0,02950	1,51909	0,03038	1,61006	0,03220	1,48471	0,02969	1,54429	0,03089	1,60556	0,03211
60	1,61478	0,02691	1,65697	0,02762	1,72763	0,02879	1,61286	0,02688	1,63472	0,02725	1,68175	0,02803	1,56977	0,02616	1,61270	0,02688	1,71179	0,02853	1,57745	0,02629	1,63704	0,02728	1,70615	0,02844
70	1,70806	0,02440	1,74245	0,02489	1,82022	0,02600	1,70417	0,02435	1,72488	0,02464	1,77060	0,02529	1,65960	0,02371	1,70125	0,02430	1,80809	0,02583	1,66522	0,02379	1,72473	0,02464	1,80134	0,02573
80	1,79723	0,02247	1,82396	0,02280	1,90858	0,02386	1,79143	0,02239	1,81097	0,02264	1,85535	0,02319	1,74545	0,02182	1,78579	0,02232	1,90010	0,02375	1,74905	0,02186	1,80839	0,02260	1,89226	0,02365
90	1,88305	0,02092	1,90220	0,02114	1,99347	0,02215	1,87536	0,02084	1,89373	0,02104	1,93675	0,02152	1,82806	0,02031	1,86707	0,02075	1,98859	0,02210	1,82966	0,02033	1,88878	0,02099	1,97970	0,02200
100	1,96607	0,01966	1,97772	0,01978	2,07546	0,02075	1,95651	0,01957	1,97372	0,01974	2,01535	0,02015	1,90795	0,01908	1,94560	0,01946	2,07414	0,02074	1,90757	0,01908	1,96642	0,01966	2,06422	0,02064

Grafico 5.29
Curvas de Fluidez a 20°C Según del modelo de Casson

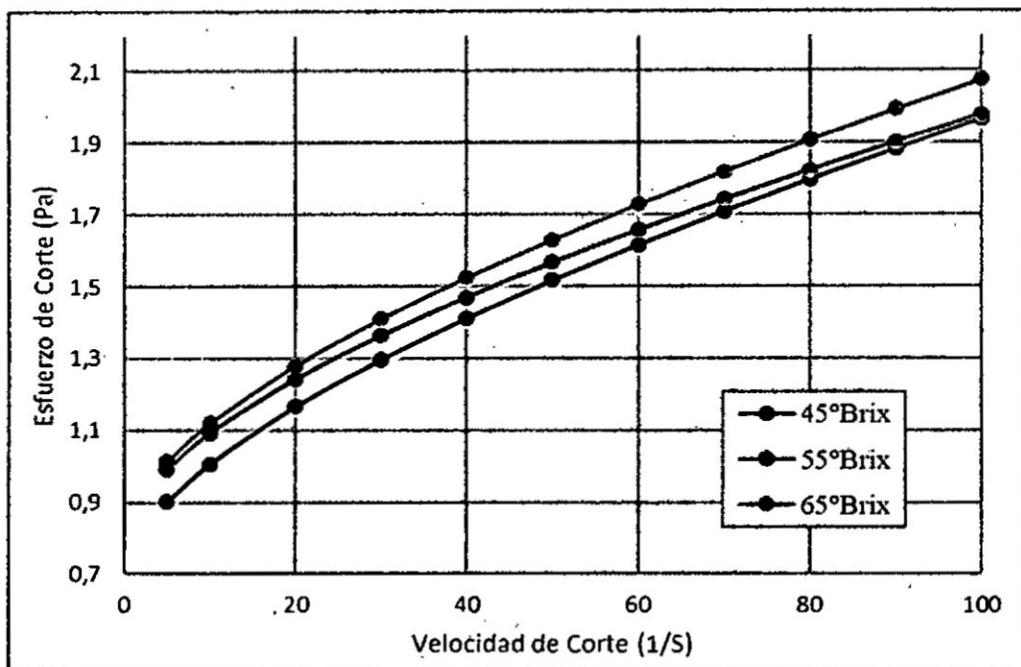


Grafico 5.30
Curvas de Viscosidad a 20°C del modelo de Casson

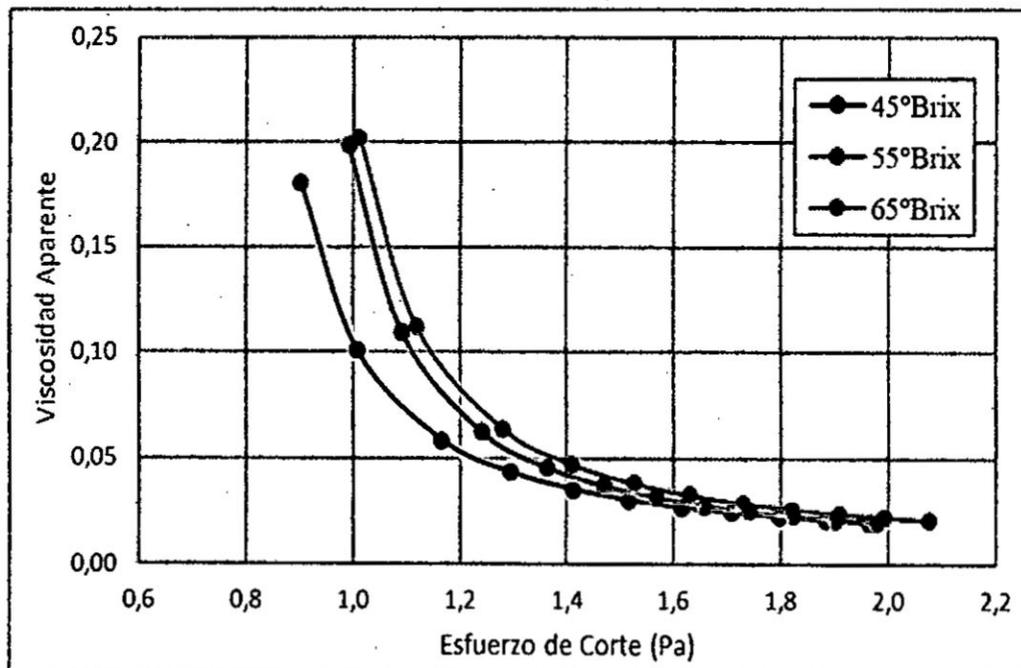


Grafico 5.31
Curvas de Fluidez a 30°C del modelo de Casson

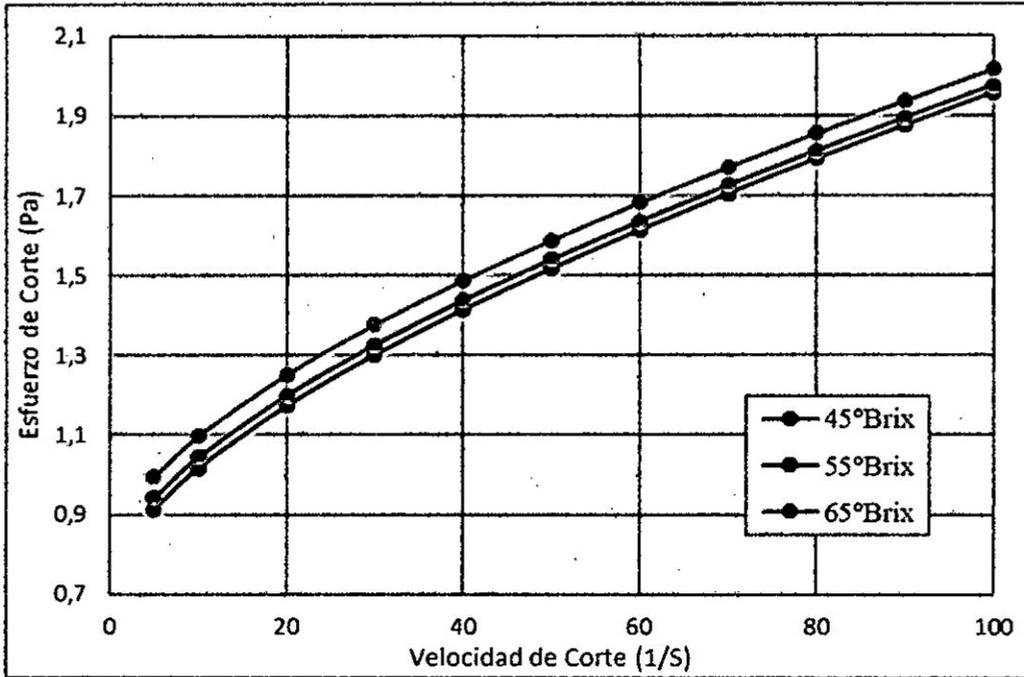


Grafico 5.32
Curvas de Viscosidad a 30°C del modelo de Casson

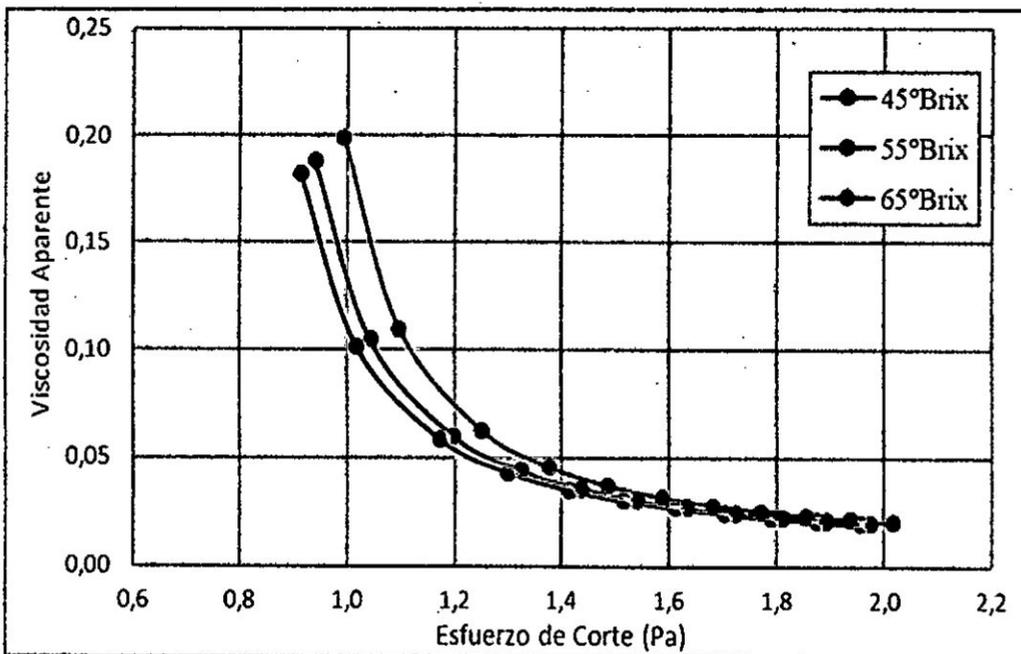


Grafico 5.33

Curvas de Fluidez a 40°C del modelo de Casson

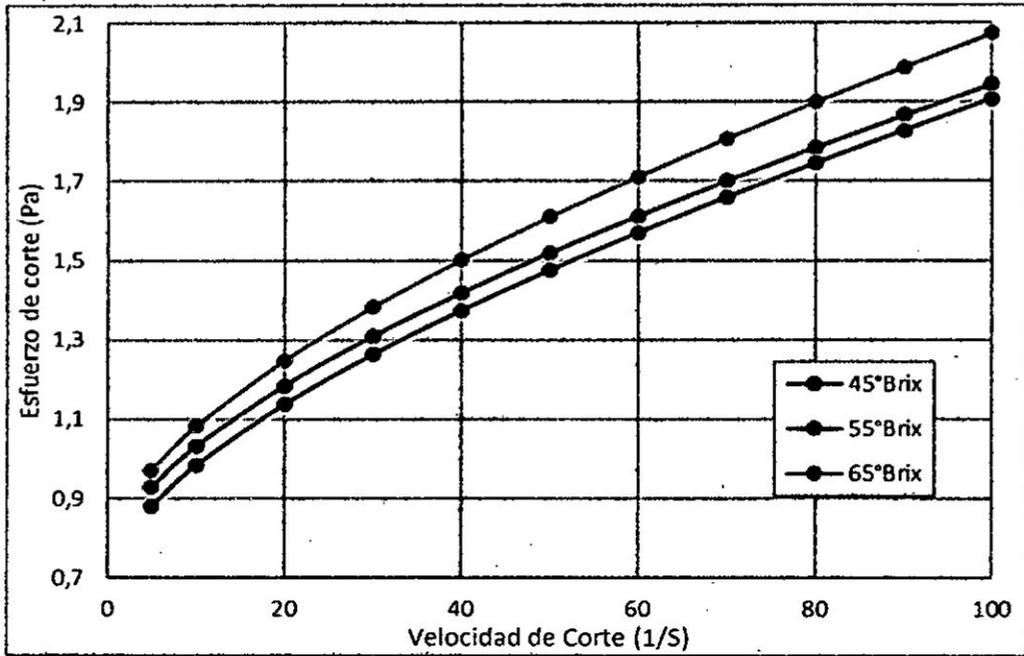


Grafico 5.34

Curvas de Viscosidad a 40°C del modelo de Casson

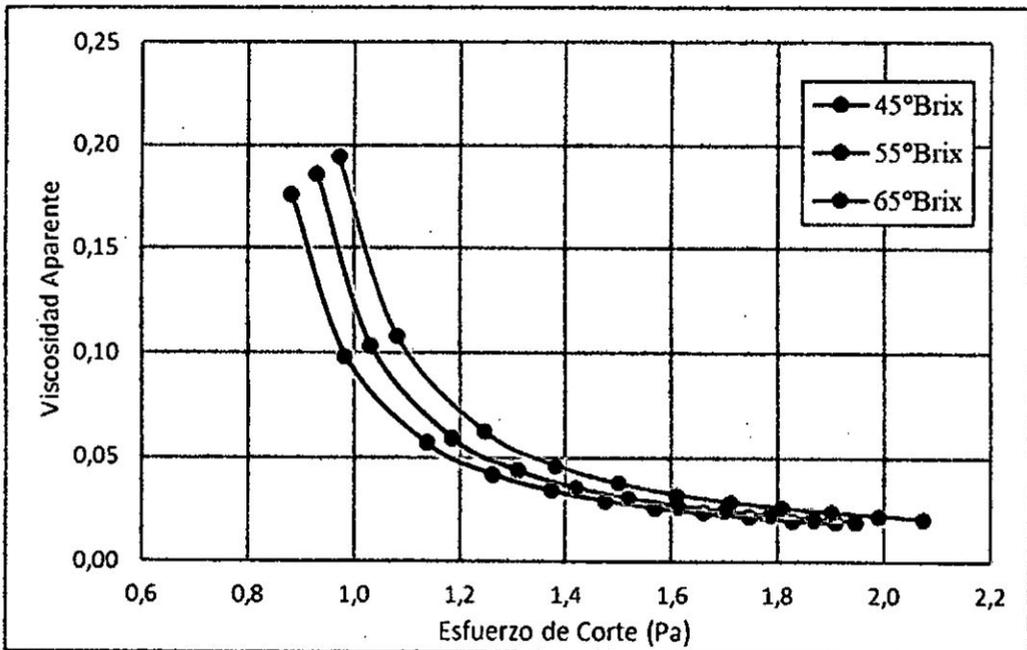


Grafico 5.35
Curvas de Fluidiez a 50°C del modelo de Casson

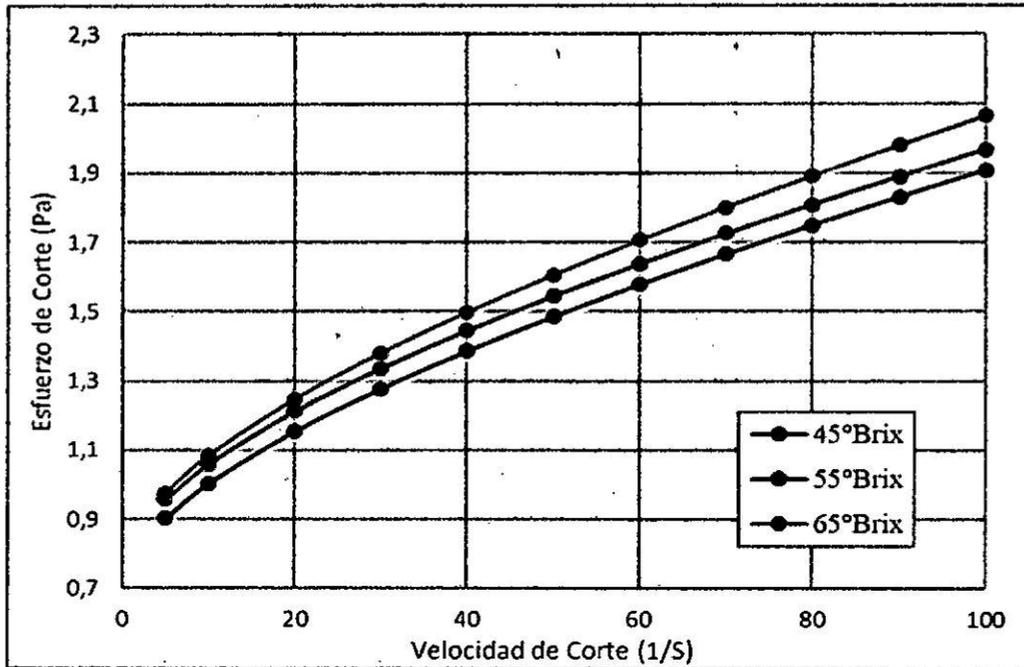
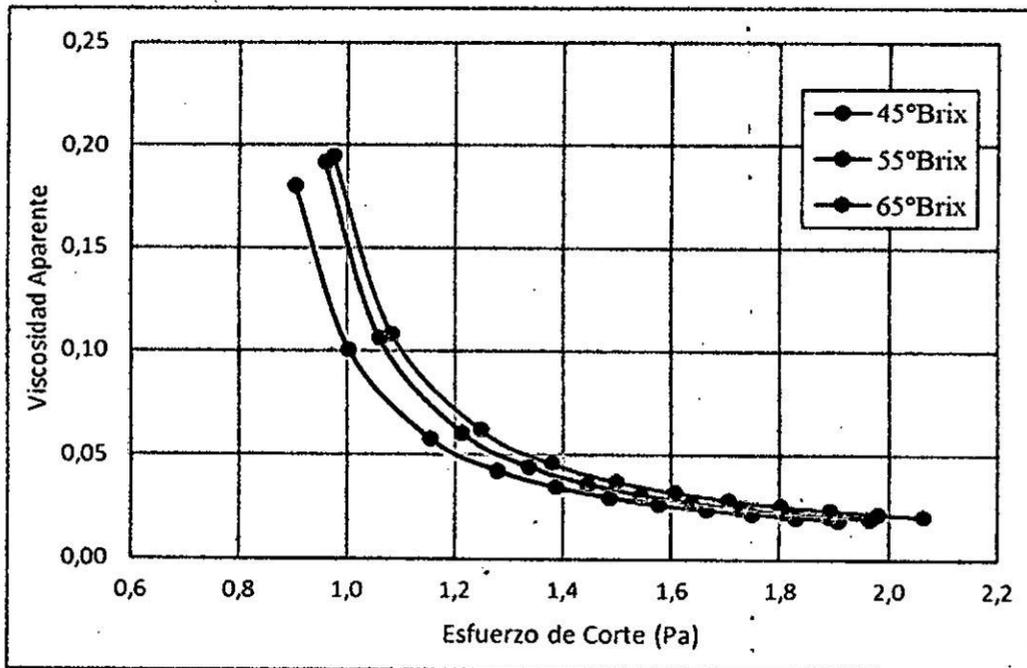


Grafico 5.36
Curvas de Viscosidad a 50°C del modelo de Casson



5.1.5. Modelo Reológico de Ostwald de Waele

Los datos obtenidos en los cuadros 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 son ajustados según el modelo de Ostwald de Waele. A continuación, se muestran los parámetros del modelo.

Cuadro 5.29

Parámetros del modelo de Ostwald de Waele

Forma estándar	Forma para regresión	Parámetros
$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n$	$\tau = ky^n$	k, n

Cuadro 5.30

Resultados de los parámetros de Ostwald de Waele 20°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
k	0,496004027	0,637955799	0,661486343
n	0,290961222	0,234722708	0,235513434
R^2	0,9503661	0,9338978	0,9141905
Varianza	5,48E-03	7,29E-03	1,11E-02

Cuadro 5.31

Resultados de los parámetros de Ostwald de Waele a 30°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
k	0,49366182	0,533424065	0,61328101
n	0,2923916	0,276325393	0,24787759
R^2	0,9746918	0,9705804	0,9652587
Varianza	2,79E-03	3,25E-03	3,83E-03

Cuadro 5.32

Resultados de los parámetros de Ostwald de Waele a 40°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
k	0,469554239	0,525040751	0,577908178
n	0,297219817	0,277303119	0,267339167
R^2	0,976407	0,9623154	0,9459721
Varianza	2,20E-03	4,16E-03	6,99E-03

Cuadro 5.33

Resultados de los parámetros de Ostwald de Waele a 50°C

Parámetro	45°Brix	55°Brix	65°Brix
k	0,495225714	0,556407471	0,5711238
n	0,285385743	0,266542624	0,2698954
R^2	0,9774658	0,9733458	0,9556836
Varianza	2,10E-03	2,94E-03	5,73E-03

Cuadro 5.34

Resultados de la regresión del modelo Ostwald de Waele

Velocidad de Corte (1/s)	20°C						30°C						40°C						50°C					
	45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix		45°Brix		55°Brix		65°Brix	
	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)	Esfuerzo de Corte (Pa)	Viscosidad Aparente (Pa.s)
5	0,79224	0,15845	0,93080	0,18616	0,96636	0,19327	0,79032	0,15806	0,83218	0,16644	0,91394	0,18279	0,75759	0,15152	0,82039	0,16408	0,88863	0,17773	0,78393	0,15679	0,85447	0,17089	0,88182	0,17636
10	0,96927	0,09693	1,09525	0,10953	1,13772	0,11377	0,96788	0,09679	1,00785	0,10079	1,08527	0,10853	0,93091	0,09309	0,99425	0,09943	1,06954	0,10695	0,95541	0,09554	1,02786	0,10279	1,06323	0,10632
20	1,18586	0,05929	1,28876	0,06444	1,33946	0,06697	1,18533	0,05927	1,22062	0,06103	1,28871	0,06444	1,14387	0,05719	1,20496	0,06025	1,28729	0,06436	1,16439	0,05822	1,23644	0,06182	1,28195	0,06410
30	1,33435	0,04448	1,41744	0,04725	1,47368	0,04912	1,33453	0,04448	1,36533	0,04551	1,42497	0,04750	1,29037	0,04301	1,34835	0,04495	1,43467	0,04782	1,30723	0,04357	1,37755	0,04592	1,43021	0,04767
40	1,45085	0,03627	1,51646	0,03791	1,57698	0,03942	1,45164	0,03629	1,47830	0,03696	1,53029	0,03826	1,40556	0,03514	1,46032	0,03651	1,54936	0,03873	1,41908	0,03548	1,48734	0,03718	1,54568	0,03864
50	1,54817	0,03096	1,59800	0,03196	1,65208	0,03324	1,54951	0,03099	1,57232	0,03145	1,61732	0,03235	1,50194	0,03004	1,55354	0,03107	1,64460	0,03289	1,51239	0,03025	1,57849	0,03157	1,64163	0,03283
60	1,63252	0,02721	1,66787	0,02780	1,73500	0,02892	1,63435	0,02724	1,65356	0,02756	1,69209	0,02820	1,58558	0,02643	1,63410	0,02724	1,72675	0,02878	1,59317	0,02655	1,65709	0,02762	1,72443	0,02874
70	1,70741	0,02439	1,72933	0,02470	1,79915	0,02570	1,70970	0,02442	1,72552	0,02465	1,75800	0,02511	1,65991	0,02371	1,70547	0,02436	1,79939	0,02571	1,66482	0,02378	1,72659	0,02467	1,79769	0,02568
80	1,77505	0,02219	1,78439	0,02230	1,85662	0,02321	1,77778	0,02222	1,79038	0,02238	1,81716	0,02271	1,72712	0,02159	1,76981	0,02212	1,86479	0,02331	1,72949	0,02162	1,78915	0,02236	1,86365	0,02330
90	1,83694	0,02041	1,83441	0,02038	1,90885	0,02121	1,84007	0,02045	1,84961	0,02055	1,87099	0,02079	1,78865	0,01987	1,82857	0,02032	1,92444	0,02138	1,78861	0,01987	1,84621	0,02051	1,92385	0,02138
100	1,89412	0,01894	1,88034	0,01880	1,95681	0,01957	1,89764	0,01898	1,90425	0,01904	1,92050	0,01921	1,84555	0,01846	1,88278	0,01883	1,97942	0,01979	1,84321	0,01843	1,89880	0,01899	1,97934	0,01979

Grafico 5.37
Curvas de Fluidez a 20°C del modelo de Ostwald de Waele

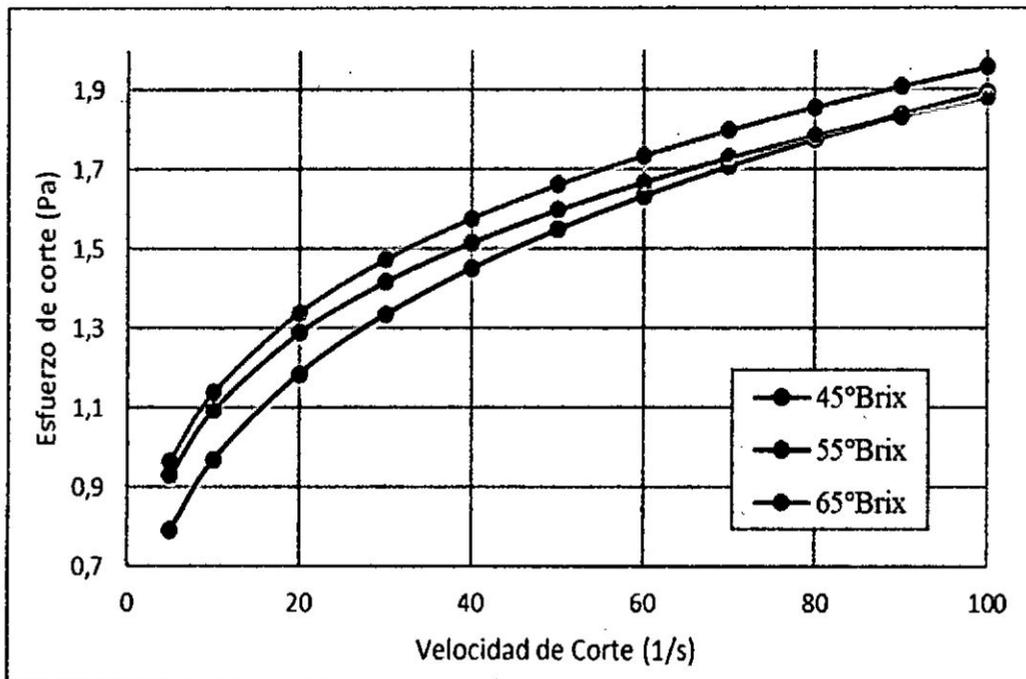


Grafico 5.38
Curvas de Viscosidad a 20°C del modelo de Ostwald de Waele

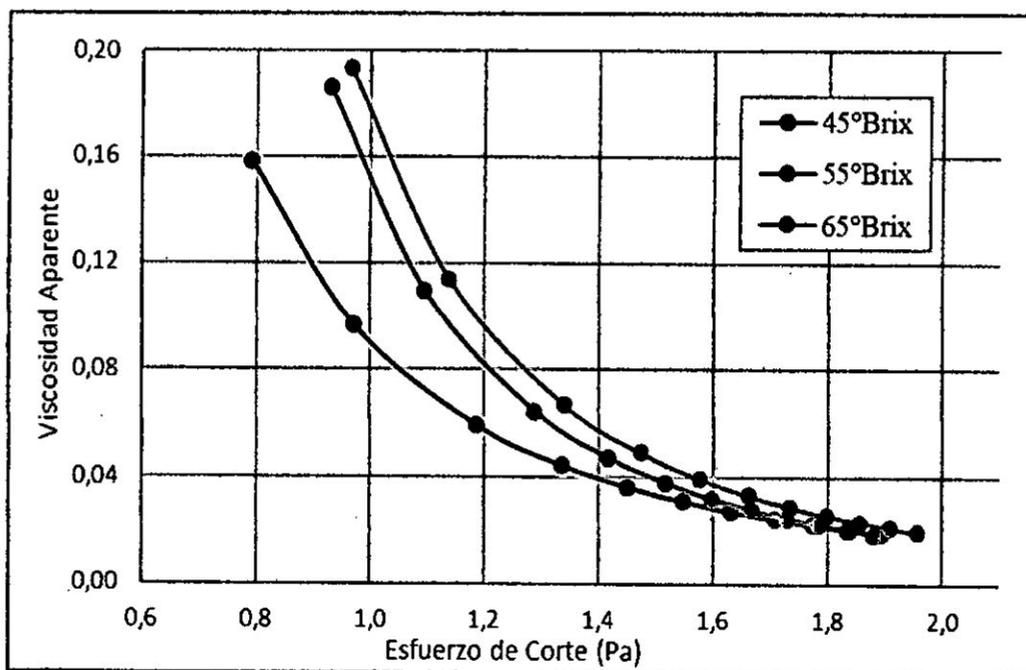


Grafico 5.39
Curvas de Fluidez a 30°C del modelo de Ostwald de Waele.

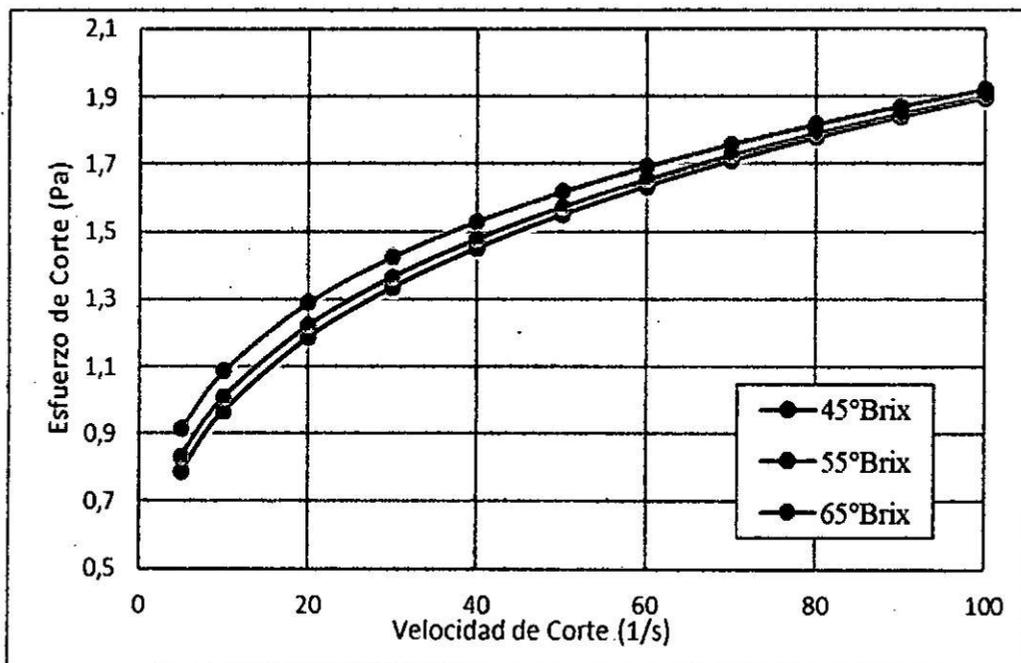


Grafico 5.40
Curvas de Viscosidad a 30°C del modelo de Ostwald de Waele.

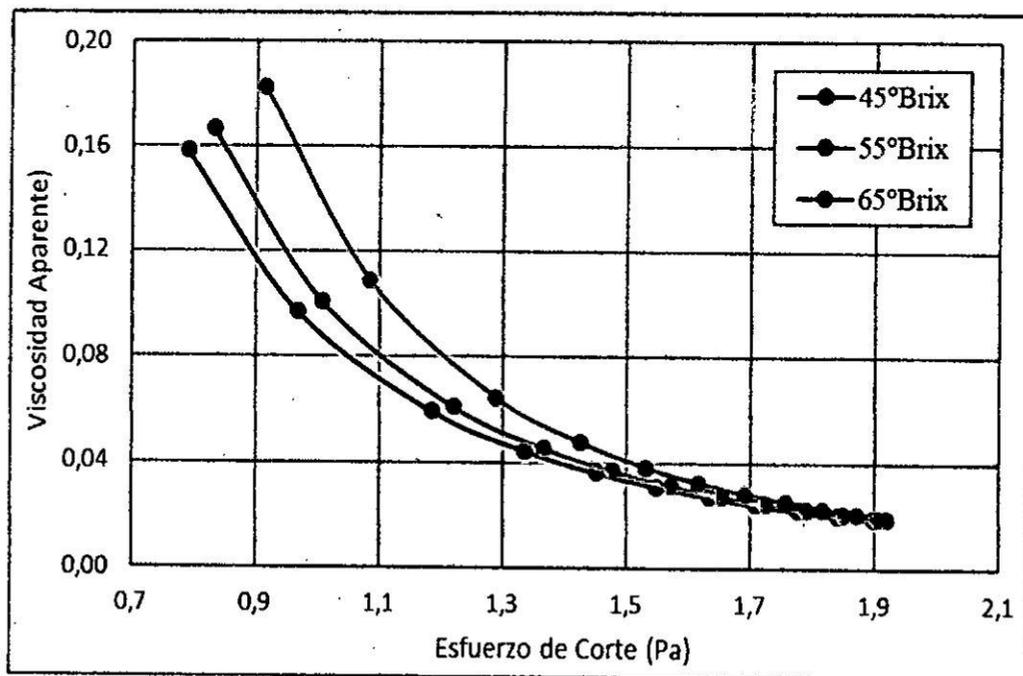


Grafico 5.41
Curvas de Fluidez a 40°C del modelo de Ostwald de Waele.

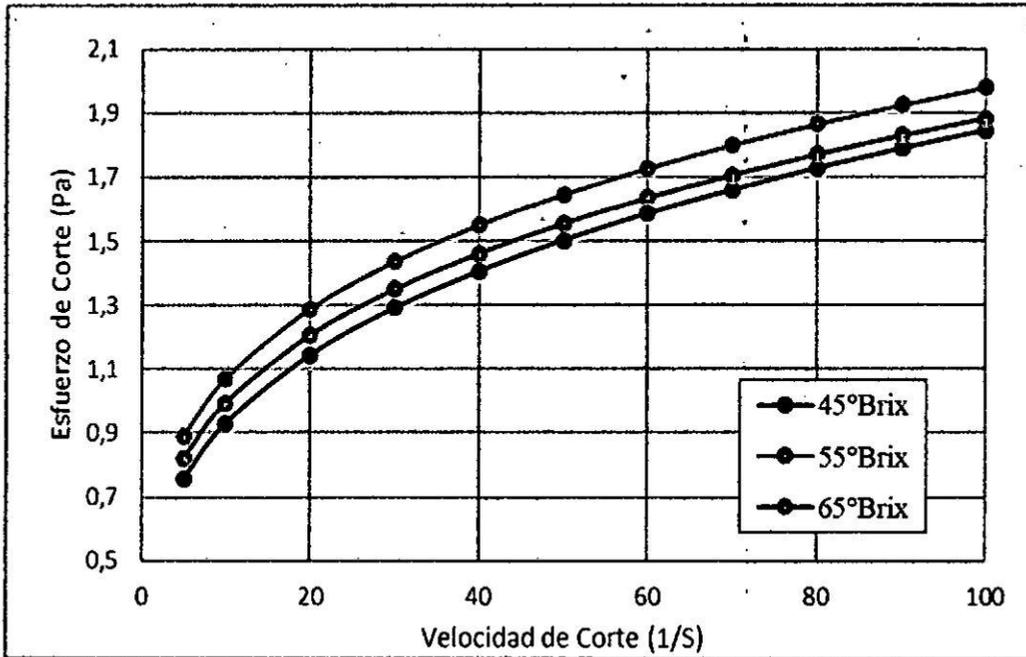


Grafico 5.42
Curvas de Viscosidad a 40°C del modelo de Ostwald de Waele

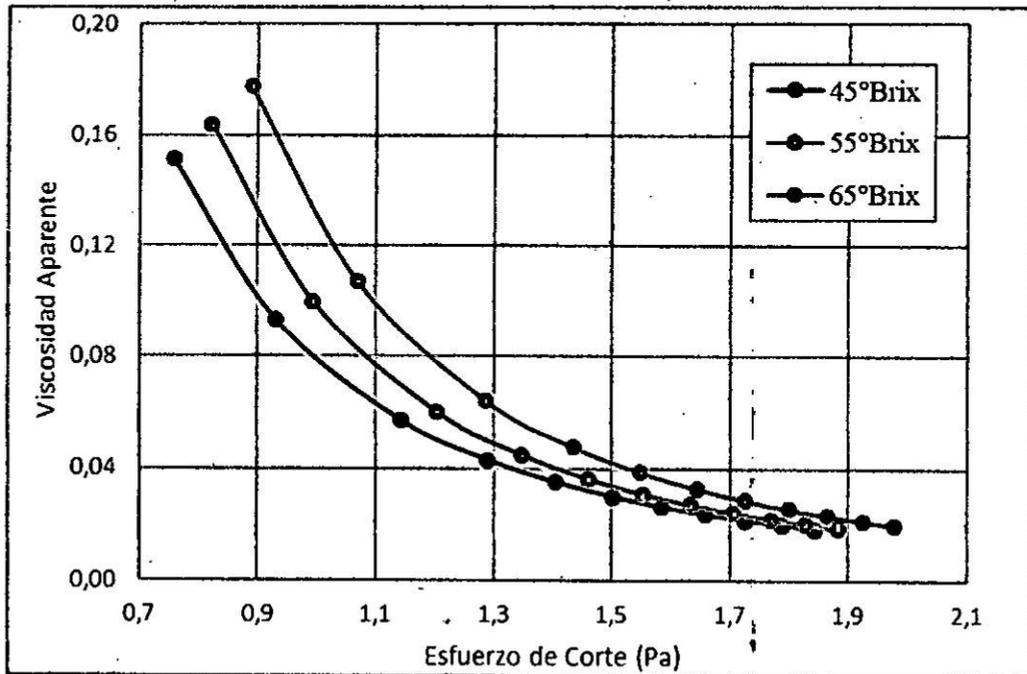


Grafico 5.43
Curvas de Fluidez a 50°C del modelo de Ostwald de Waele

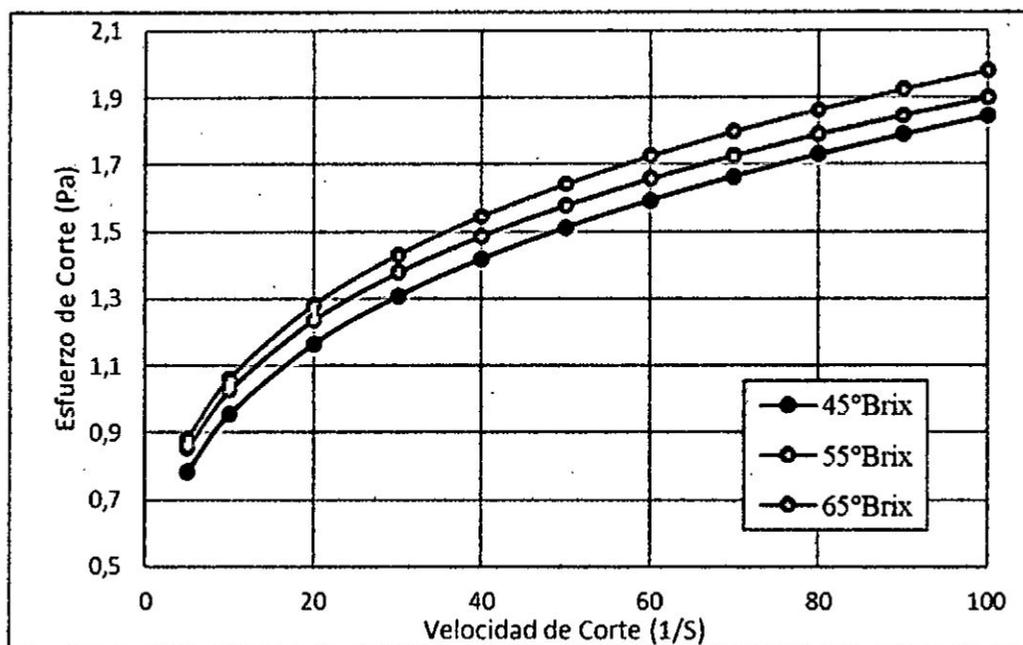
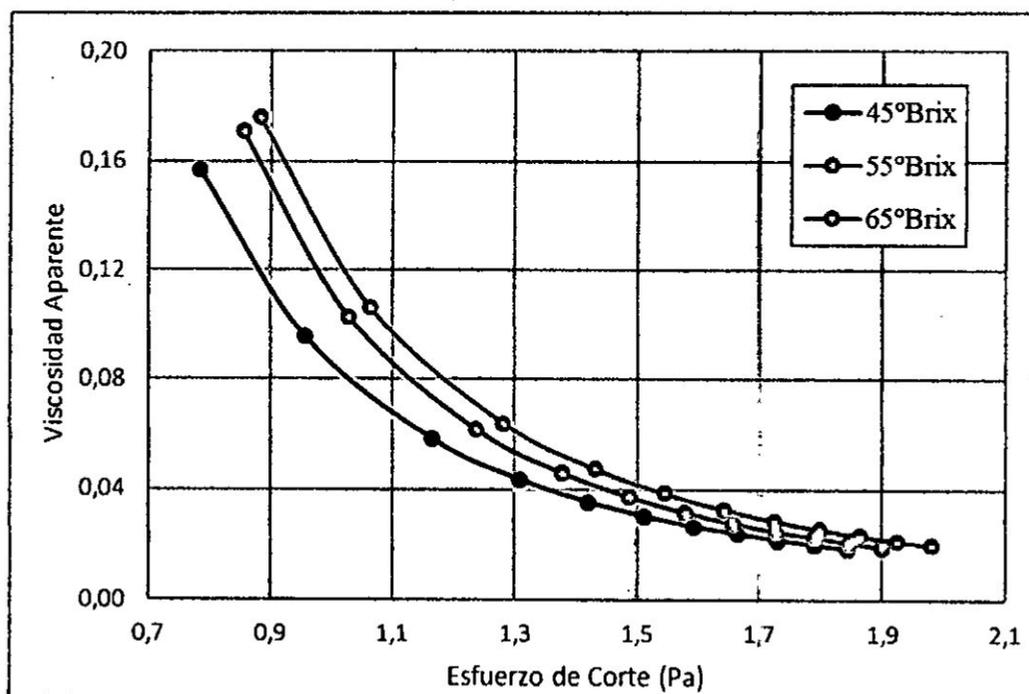


Grafico 5.44
Curvas de Viscosidad a 50°C del modelo de Ostwald de Waele.



VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación de hipótesis con los resultados

6.1.1. Hipótesis Específicas

- La primera hipótesis específica señala que existe una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado a las soluciones azucaradas, lo cual se demuestra en los reogramas de esfuerzo de corte y velocidad de corte de los datos experimentales recolectados del equipo. En los gráficos 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 visualizamos dicha relación, razón por la cual es necesario ajustarlos a los modelos reológicos mediante la regresión no lineal.
- La segunda hipótesis específica señala que el tratamiento estadístico de los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte permite obtener los parámetros de los modelos asociados a las soluciones azucaradas, lo cual fue comprobado en el momento de hacer los cálculos de la regresión no lineal. Procedimientos estadísticos como el cálculo del coeficiente de determinación (R^2) y la varianza nos indican cuantitativamente el cálculo correcto de los parámetros de cada modelo en estudio.
- La tercera hipótesis específica señala que los reogramas de las soluciones azucaradas tienen el comportamiento típico de un fluido no newtoniano específicamente al del fluido dilatante. Esta hipótesis se planteó en bases a estudios anteriores de reología de soluciones azucaradas en el proceso de evaporación-cristalización, donde las condiciones de temperatura y concentración eran similares, sin embargo, la influencia de los cristales modificó el comportamiento reológico de la solución. Por lo cual al observar los gráficos 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 podemos notar que el comportamiento de las soluciones azucaradas medidas a las temperaturas y concentraciones de nuestra experimentación, presentan un comportamiento no newtoniano de tipo pseudoplástico con mínimo esfuerzo de fluencia, debido a la relación gráfica que presentan el esfuerzo de corte y velocidad de corte.

6.1.2. Hipótesis General

La hipótesis general señala que las soluciones azucaradas tienen un comportamiento reológico de tipo dilatante y que se ajusta a los modelos de Ostwald de Waele, Herschel Bulkley y Casson. Sin embargo según los reogramas hemos podido observar un comportamiento pseudoplástico con mínimo esfuerzo de fluencia, razón por la cual los modelos reológicos que mejor ajustan a nuestros datos son aquellos que presentan como parámetro al τ_0 , el cual viene a ser el esfuerzo de fluencia en los modelos de Herschel- Bulkley, Vocadlo y Casson, al mismo tiempo y debido a que nuestros datos reológicos presentan un comportamiento similar a un plástico real, hemos podido realizar el ajuste al modelo de Sisko, el cual también representa de manera óptima el comportamiento de nuestro fluido. Asimismo, también hemos realizado el ajuste usando el modelo de Ostwald corroborando que nuestro fluido en estudio presenta un comportamiento no newtoniano de tipo pseudoplástico debido a que los valores del parámetro " n " (índice de comportamiento) son menores que 1.

6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares

De las gráficas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 podemos notar que el comportamiento de las soluciones azucaradas tiende a ser pseudoplástico con un mínimo esfuerzo de fluencia. Sin embargo, esto se llega a corroborar de manera más concreta cuando realizamos el cálculo de parámetros del modelo de Ostwald de Waele, en los cuadros 5.30, 5.31, 5.32 y 5.33 podemos observar que el valor del índice de comportamiento del fluido es menor que la unidad y que según lo argumentado en la sección 2.10.2, al ser el valor del índice de comportamiento menor que la unidad el fluido se comporta como pseudoplástico. Sin embargo, ya que presenta un mínimo de esfuerzo de fluencia los mejores modelos de ajuste son los Herschel-Bulkley y Vocadlo.

El comportamiento pseudoplástico de las soluciones azucaradas también fue explicado en la investigación "*Rheological Properties of Sucrose Solution and Suspensions*" realizado por M.Mathlouthi y J.Genotelle en 1995, en el cual se explica que las soluciones de sacarosa pueden presentar tanto comportamiento de

fluido pseudoplástico como dilatante dependiendo de la concentración, cristalización y la influencia de otros iones presentes en la solución. Además, en el 2003 Ana Isabel Berto, Ana Carolina A. Gratao, Alfredo A. Vitali y Vivaldo Silveria JR. publicaron la investigación "*Rheology of Sucrose-CMC Model Solution*", llegando a la conclusión que las soluciones de sacarosa al 65% en peso y 0.1% de CMC tienen un comportamiento de fluido pseudoplástico.

VII. CONCLUSIONES

- Se determinó los modelos reológicos que mejor describen el comportamiento de las soluciones azucaradas, encontrándose en el modelo de Ostwald que el índice de comportamiento (" n ") es menor que la unidad, por tanto, podemos decir que el fluido tiene comportamiento pseudoplástico. En los modelos de Herschel-Bulkley, Vocadlo y Casson, se encontró que las soluciones azucaradas presentan un pequeño valor de punto de fluencia y por ello podríamos decir que presenta un comportamiento de flujo no newtoniano de tipo plástico real a las condiciones de temperatura y concentración dadas en la experimentación. El modelo reológico de Sisko también describe de forma óptima el comportamiento reológico de las soluciones azucaradas esto debido al rango en el cual se encuentra la velocidad de corte (0.1 a 1000 s^{-1}).
- La relación numérica entre la velocidad de corte y esfuerzo de corte para las soluciones azucaradas se expresa de manera más adecuada a través del modelo de Herschel-Bulkley, debido a que mejor describe el comportamiento reológico de las soluciones azucaradas. Esto debido a que presenta los mejores valores de coeficiente de determinación y varianza para la regresión no lineal.
- El tratamiento estadístico de regresión no lineal permitió obtener los parámetros de los modelos reológicos que mejor describen el comportamiento de las soluciones azucaradas. Siendo uno de estos parámetros el punto de fluencia (yield point). Los modelos reológicos de Herschel-Bulkley y Vocadlo son los que mejor caracterizan este parámetro teniendo un valor de $0,8-0,9 \text{ Pa}$
- Se obtuvieron los reogramas de las soluciones azucaradas a las temperaturas de prueba, demostrándose un comportamiento de fluido pseudoplástico con un valor de punto de fluencia muy pequeño.

VIII. RECOMENDACIONES

- El comportamiento de las soluciones azucaradas se desvía de un comportamiento newtoniano conforme se aumenta la concentración de sólidos solubles, esto nos lleva a recomendar un estudio más allá de los grados brix tratados en esta investigación, es decir estudiar soluciones en las cuales los azúcares hayan sido invertidos para superar el límite de solubilidad y alcanzar mayores grados Brix.
- Se recomienda como un complemento a esta investigación profundizar en el estudio del comportamiento reológico de soluciones azucaradas bajo la influencia de aditivos espesantes como CMC u otros, ya que también son usados en la industria de alimentos.
- En la presente investigación no se realizó un estudio tixotrópico dado que nuestras soluciones tenían bajos niveles de viscosidad y no fueron relevantes los cambios en el tiempo. El estudio de tixotropía es recomendable en los fluidos con altos valores de viscosidad dado que este tipo de fluidos tienden a recuperarse lentamente o no en el tiempo cuando han sido sometidos a cambios en el esfuerzo de corte, este comportamiento es muy importante en las industrias de pinturas, alimentos etc.
- Se recomienda el uso del sistema de medición CC29 para estudiar el comportamiento reológico de fluidos o mezclas homogéneas. Esto debido a que este sistema de medición deja un espacio mínimo entre la espiga y la Copa que garantiza un flujo laminar adecuado. El reómetro permite realizar el estudio y comparación de los puntos de fluencia de diferentes fluidos, tales como salsa de tomate, pinturas, chocolate, etc.
- Es recomendable ajustar el rango de velocidades de corte o esfuerzo de corte, dependiendo del tipo de estudio que se esté realizando en el reómetro (CSR o CSS). Esto debido a que cuando los fluidos no tienen grandes valores de viscosidad y se estudian en un rango muy amplio, arrojan pocos puntos experimentales. Sin embargo, cuando se reduce el rango de estudio el reómetro

arroja mayor cantidad de puntos experimentales facilitando de esta manera el análisis del comportamiento reológico y su posterior ajuste a los modelos.

- En el tratamiento de datos es recomendable hacer uso de un software estadístico reconocido para el cálculo de los parámetros. Esto debido a que dichos valores deben ser reproducibles por cualquier persona en cualquier momento; además de ser una herramienta robusta para tratar los cálculos iterativos ya que las ecuaciones tienden a complicarse paulatinamente y existe la necesidad de evaluar valores iniciales en cada iteración.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANTON PAAR. **ReolabQC reometro rotacional para control de calidad.**
Disponible en:
<http://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=53547&L=6>. Artículo web. Consultado en abril 2016.
2. ANTON PAAR. **GTR: DSR Evaluation and Geometry Recommendation.**
Disponible en:
https://www.asphaltpavement.org/PDFs/Engineering_ETGs/Binder_201604/03%20Hunter%20GTR%20DSR%20Evaluation%20and%20Geometry%20Recommendation.pdf. Artículo web. Consultado en junio 2017.
3. BADUI, SALVADOR. **La ciencia de los alimentos en la práctica.** México. Editorial Pearson Educación, S.A. Primera Edición. 2012.
4. BADUI, SALVADOR. **Química de los Alimentos.** México. Editorial Alhambra Mexicana, S.A. Segunda Edición. 1990.
5. BARNES Howard A. **A Handbook of Elementary Rheology.** Aberystwyth. Universidad de Gales. Primera Edición. 2000.
6. BATES, F. PHELPS, F. y SNYDER, C. **Saccharimetry, The properties of commercial sugars and their salutions. International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology, Volumen 2.** New York. National Research Council & Mc Graw Hill Book Company, Inc. Primera Edición electrónica. 2003.
7. BERTO, MARÍA ISABEL; A. GRÁTATO, CAROLINA; A. VITALI, ALFREDO. **Rheology of sucrose-CMC model solution.** *Journal of Texture.* Vol.34: 391-400. Octubre 2003.
8. BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES. **More Solutions to Sticky Problems.** Disponible en:
http://www.brookfieldengineering.com/download/files/more_solutions.pdf
Artículo web. consultado marzo del 2016.

9. BROWN, THEODORE L. **Química, La ciencia central**. México. Editorial Pearson Educación, S.A. Novena Edición. 2004.
10. CARINA FIGUEROA, Selva. **Modelo de Regresión no Lineal**. Tesis de Licenciatura. Buenos Aires. Universidad de Buenos Aires. 2013.
11. CASTELLAN, Gilbert. W. **Fisicoquímica**. U.S.A. Addison-Wesley Iberoamericana. Segunda Edición. 1987.
12. CENGEL, Y; CIMBALA, J. **Mecánica de Fluidos**. México. Editorial Mc Graw Hill Interamericana de México, S.A. Primera Edición. 2006.
13. DINGER, DENNIS R. **Reología para Ceramistas**. Editorial Lulu Enterprises, Inc. Primera Edición. 2010.
14. DUARTE AGUDELO A. & NIÑO VICENTE J.R. **Introducción a la Mecánica de Fluidos**. Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Tercera Edición. 2004.
15. FENNEMA, O. **Química de los Alimentos**. Zaragoza. Editorial Acribia, S.A. 2000.
16. GARCÍA QUESADA, J. **Reología**. Disponible en:
<http://ocw.ua.es/es/ingenieria-y-arquitectura/reologia-2006.html>. Artículo web. Consultado abril 2016.
17. G. MEZGER THOMAS. **The Rheology Handbook**. Hanover. Editorial Vincentz Network. Cuarta Edición. 2014.
18. GUTIERREZ PULIDO H. & DE LA VARA SALAZAR R. **Análisis y Diseño de Experimentos**. México D.F. Editorial McGraw-Hill. Segunda Edición. 2008.
19. IBARROLA, E. L. **Introducción a los fluidos no newtonianos**. Disponible en:
<http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/aero/Asignaturas/MecFluid/material/introducci%C3%B3n%20no%20newtonianos.pdf>. Artículo web. Consultado en marzo del 2016.

20. IBARZ, A. **Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos**. Madrid. Editorial Mundi Prensa. 2005.
21. LLUMIQUINGA SUQUILLO, J. E. **Estudio de las viscosidades medias en tuberías de sistemas de distribución de fluidos no newtonianos tipo barbotina en la empresa FV para propósitos de aumento de eficiencia en procesos de producción**. Proyecto para la obtención de Ingeniero Mecánico Quito. Escuela Politécnica Nacional 2012.
22. MAESTRO GARRIGA, A. **Reología de espesantes celulósicos para pinturas al agua: modelización y mecanismo de espesamiento asociativo**. Tesis doctoral. Barcelona. Universidad de Barcelona 2002.
23. MARTINEZ GOMEZ, A., SANCHEZ BAZAN , I., OSORIO MIRON, A., LÓPEZ ZAMORA, L., SANCHEZ BAZÁN, L., & HERNANDEZ AGUILAR, E. **Caracterización reológica de soluciones azucaradas para el proceso de evaporación-cristalización**. *Nexo*. Vol.24: 61 a 71. Junio 2011.
24. M.MATHLOUTHI, J. GÉNOTELLE. **Rheological Properties of Sucrose Solutions and Suspensions**. disponible en:
https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4615-2676-6_6. Artículo web. Consultado en mayo 2017.
25. MORENO, RODRIGO. **Reología de Suspensiones Cerámicas**. Madrid. Editorial CSIS-CSIC. Press. 2005.
26. MOTT, ROBERT L. **Mecánica de Fluidos**. México. Editorial Pearson Educación, S.A. Sexta Edición. 2006.
27. QUINTÁNS RIVEIRO, L. C. **Reología de Productos Alimentarios**. Tesis doctoral. Galicia. Universidad Santiago de Compostela, Departamento de Ingeniería Química. 2008.
28. RAMÍREZ NAVAS, J. S. **Introducción a la Reología de los Alimentos**. Cali. Editorial ReCiTeIA. 2006.

29. REGALADO MÉNDEZ, A., & NORIEGA RAMOS, O. A. (2008). **Comportamiento reológico de un fluido.** *Ciencia y Mar* . Vol 36: 35-42. Setiembre. 2008.
30. RODRIGUEZ, V. **Bases de la Alimentación Humana.** España. Editorial Netbiblo, S.L. Primera Edición. 2008.
31. ROJAS Orlando, BRICEÑO, María I., & Avendaño, Jorge. **Fundamentos de la reologia.** Disponible en:
<http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S521C.pdf>. Artículo web.
Consultado abril 2016.
32. SOLOMON, E; BERG, L; MARTIN, D. **Biología.** México. Editorial Mc Graw Hill Interamericana, S.A. de C.V. Quinta Edición. 2001.
33. WADE, LEROY. **Química Orgánica.** Madrid. Editorial Pearson Educación, S.A. Quinta Edición. 2004.

APENDICE

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO: MODELOS REOLÓGICOS ASOCIADOS A SOLUCIONES AZUCARADAS

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuáles son los modelos reológicos asociados a soluciones azucaradas?	Determinar los modelos reológicos asociados a las soluciones azucaradas.	Las soluciones azucaradas tienen un comportamiento reológico característico de los fluidos dilatantes como los de Ostwald de Waele, Herschel Bulkley, Casson y otros.	$Y =$ Modelos de flujo no newtoniano asociado a las soluciones azucaradas	Reproducibilidad de los datos experimentales mediante los modelos reológicos asociados al comportamiento de soluciones azucaradas.	Los índices de correlación múltiple y análisis de la varianza.	Correlacionando las variables X_1 , X_2 y X_3 .
SUB – PROBLEMA	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
a. ¿Cuál es la relación numérica entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte determinado experimentalmente para las soluciones azucaradas?	a. Obtener en forma experimental la relación numérica entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte para las soluciones azucaradas	Existe una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado a las soluciones azucaradas.	$X_1 =$ La relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado a las soluciones azucaradas	Análisis cualitativo de la relación entre la velocidad de corte y esfuerzo de corte.	Diferencias respecto a la relación lineal	Grafico
b. ¿Cómo debe ser la correlación no lineal de los datos experimentales conducentes a obtener los parámetros reológicos asociados a las soluciones azucaradas?	b. Obtener los parámetros reológicos de los modelos asociados a soluciones azucaradas mediante el tratamiento estadístico de regresión no lineal.	El tratamiento estadístico de los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte permite obtener los parámetros de los modelos asociados a las soluciones azucaradas.	$X_2 =$ Tratamiento estadístico de los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte para obtener los parámetros de los modelos asociados a las soluciones azucaradas.	Correlación cuantitativa entre los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte asociados a las soluciones azucaradas.	Índice de correlación y varianza	Regresión no lineal.
c. ¿Cómo son los reogramas asociados a las soluciones azucaradas a temperaturas diversas?	c. Obtener los reogramas asociados a las soluciones azucaradas a las temperaturas de prueba.	Los reogramas de las soluciones azucaradas tienen el comportamiento típico de un fluido no newtoniano específicamente al del fluido dilatante.	$X_3 =$ Los reogramas asociados a las soluciones azucaradas.	Forma típica de los reogramas de los modelos que representan el comportamiento reológico de las soluciones azucaradas.	Desviación respecto al comportamiento a las propiedades del fluido newtoniano.	Grafico

Relación de Variables: $Y=f(X_1, X_2, X_3)$

$X_1 =$ La relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado a las soluciones azucaradas

$X_2 =$ Tratamiento estadístico de los datos de esfuerzo corte y velocidad de corte para obtener los parámetros de los modelos asociados a las soluciones azucaradas.

$X_3 =$ Los reogramas asociados a las soluciones azucarada

TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS.

A continuación, se detallan el procesamiento estadístico y cálculos de los parámetros reológicos para el modelo de Herschel-Bulkley a 20°C y 55°Brix.

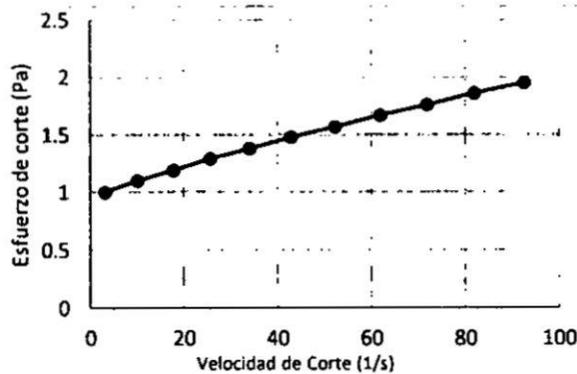
- **Datos obtenidos del reómetro**

Cuadro A1
Lectura del reómetro a 20°C y 55°Brix

Velocidad de Corte ($\dot{\gamma}$)	Esfuerzo de Corte (τ)
3.1	1
10.1	1.1
17.8	1.19
25.6	1.29
34	1.38
42.9	1.48
52.3	1.57
61.9	1.67
71.9	1.76
82	1.86
92.6	1.95

El grafico muestra la relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte de los datos obtenidos del reómetro en el cuadro A1.

Grafico A1
Curva de fluidez



- **Estimación de parámetros**

Se observa que se han realizado 40 iteraciones hasta lograr la convergencia.

Cuadro A3
Resultados de los parámetros de Herschel-Bulkley

Parámetro	Estimación	Error estándar	Intervalo de confianza de 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
τ_0	0.935743	.006	.923	.949
k	0.024348	.001	.021	.027
n	0.824411	.011	.800	.849

Para una correcta resolución de los parámetros, los Residuos deben tener un comportamiento Normal.

- **Análisis de Varianza (ANOVA)**

Cuadro A4
Anova de la regresión no lineal

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	24.998	3	8.333
Residuo	1.27E-04	8	1.59E-05
Total sin corrección	24.999	11	
Total corregido	.993	10	

- **Calculo del Coeficiente de determinación (R^2)**

Del cuadro de ANOVA se realiza en siguiente calculo

$$R^2 = 1 - \frac{\text{suma cuadros de residuo}}{\text{suma de cuadrados Total corregido}}$$

$$R^2 = 1 - \frac{1.27 * 10^{-4}}{0.993}$$

$$R^2 = 0.9998717$$

- **Calculo de la varianza**

En el cuadro de ANOVA ya se encuentra calculada la varianza.

$$\sigma^2 = 1.59 * 10^{-5}$$

- **Análisis de Residuos.**

Cuadro A5

Valores experimentales y ajustados del esfuerzo de corte

N	γ	τ	$\hat{\tau}$	$e_i = \tau - \hat{\tau}$
1	3.1	1	0.99762295	0.0023771
2	10.1	1.1	1.09959086	0.0004091
3	17.8	1.19	1.19715616	-0.0071562
4	25.6	1.29	1.28846785	0.0015322
5	34	1.38	1.38143584	-0.0014358
6	42.9	1.48	1.47560575	0.0043942
7	52.3	1.57	1.57139487	-0.0013949
8	61.9	1.67	1.66613688	0.0038631
9	71.9	1.76	1.76211458	-0.0021146
10	82	1.86	1.85669468	0.0033053
11	92.6	1.95	1.95377958	-0.0037796

Donde:

$\hat{\tau}$ es el valor de esfuerzo de corte calculado de la regresión.

e_i es el valor de los residuos.

- **Prueba de Normalidad**

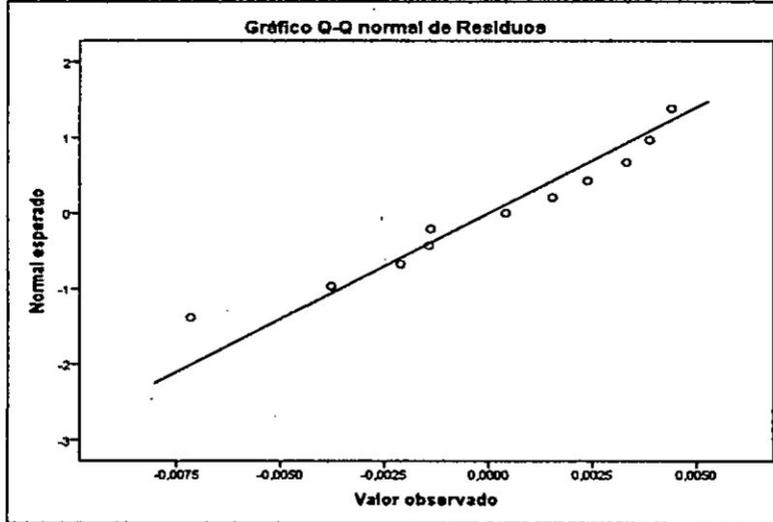
Cuadro A6

Resultados de la prueba de normalidad

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Residuos	.947	11	.602

Se observa que el valor-p de significancia es 0.602 y por lo tanto mayor a 0.05. Podemos decir que tiene un comportamiento normal.

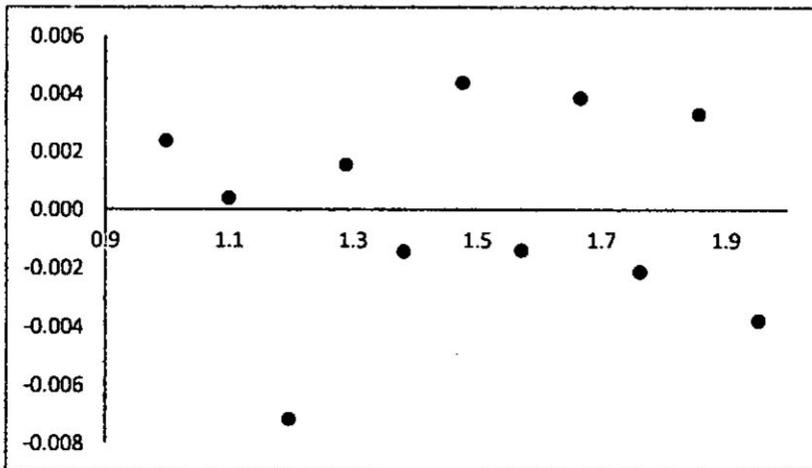
Grafico A2
Gráfico normal de residuos



- **Varianza Constante**

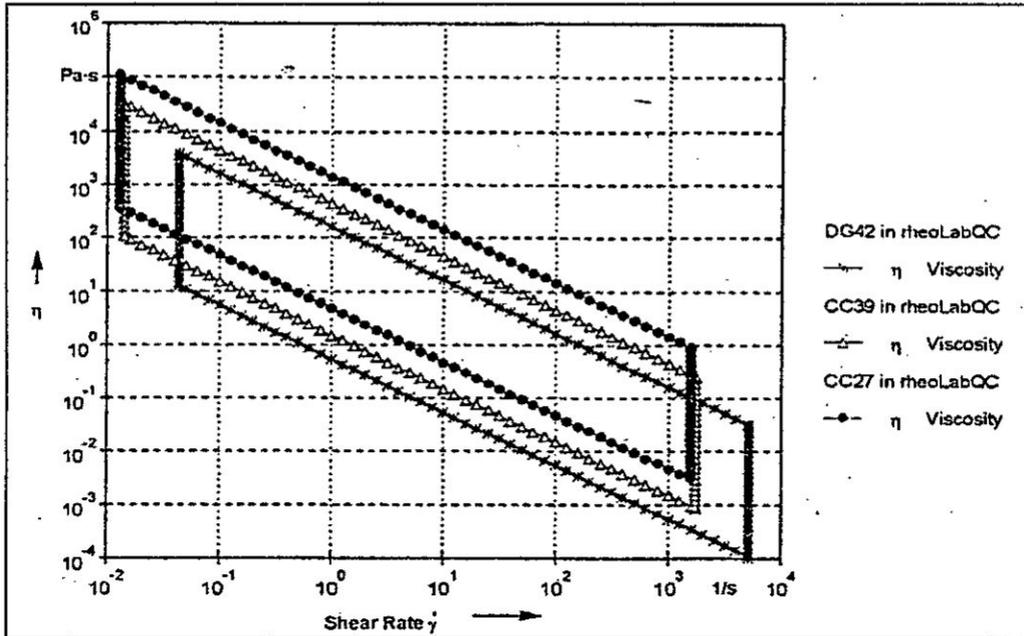
Una forma de verificar el supuesto de Varianza constante es graficando los residuos (e_t) versus los valores calculados de la regresión (\hat{f}). Se debe observar un comportamiento aleatorio de los residuos respecto a los valores calculados, de este modo se asegura la calidad del ajuste no lineal de forma cualitativa.

Grafico A3
Comportamiento aleatorio de los residuos

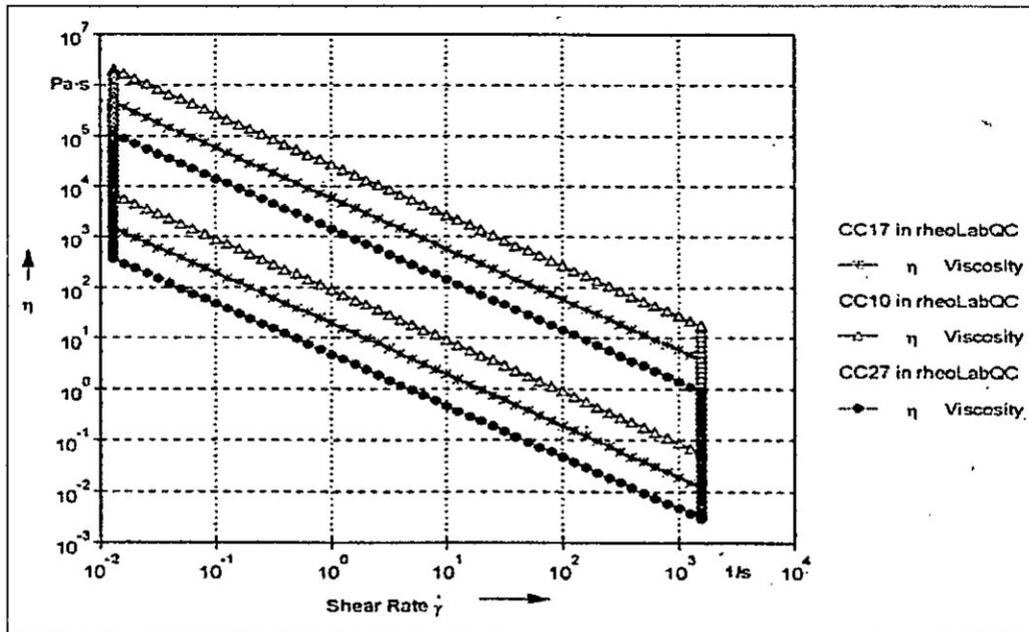


ANEXOS

A.1. SISTEMAS E INTERVALOS DE MEDICIÓN DEL REÓMETRO RHEOLAB.



Fuente: ANTON PAAR s.f.



Fuente: ANTON PAAR s.f.

A.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE AZÚCAR

Informe de Ensayo N° 117742

DATOS DEL CLIENTE

Solicitante	ANALYTICAL S.A.C.
Domicilio legal	CAL.CHICAMA NRO. 225 DPTO. 101 (ALT CDRA 7 DE AV LOS PATRIOTAS)LIMA - LIMA - SAN MIGUEL
Contacto	Davis Berrospi Diaz
Dirección de entrega	CAL.CHICAMA NRO. 225 DPTO. 101 (ALT CDRA 7 DE AV LOS PATRIOTAS)LIMA - LIMA - SAN MIGUEL

DATOS DEL PRODUCTO

Producto	AZÚCAR BLANCA		
Ensayos realizados en	Av. La Marina 3035 San Miguel - Lima		
Fecha de recepción	2016.08.17	Fecha de inicio de análisis	2016.08.17
Referencia	COT 66134	Fecha de término de análisis	2016.08.20
Procedencia	Muestra proporcionada por el Cliente		
Custodia dirimencia	No aplica por ser muestra única		

DATOS DE LA MUESTRA: M - 171426

Identificación	Cantidad	Descripción / Presentación	Precinto	FV	FP
AZÚCAR BLANCA	250g aprox.	Bolsa plástica con cierre hermético, identificada	--	--	--

DATOS DEL SERVICIO

Identificación	Análisis ⁽¹⁾	Unidad	Resultado
AZÚCAR BLANCA	Polarización (°Z) (a 20°C)	-	99.94

Métodos

Polarización: NTP 207.004 - 1 2005. Azúcar rubia y azúcar blanco directo. Método de ensayo para determinar el porcentaje de polarización por polarimetría. Parte 1.

⁽¹⁾ Subcontrata - Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao

El muestreo no es parte del alcance de la acreditación del laboratorio de ensayo de NSF INASSA SAC.

NSF INASSA S.A.C

Emma Aguinaga Makca
Jefe de División de Laboratorios
C.I.P. N° 29217

Lima, 29 de agosto de 2016

"El presente informe no podrá ser reproducido parcial o totalmente, excepto con la aprobación por escrito de NSF Inassa. Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto ni la autorización de uso de la Marca NSF. Los resultados se refieren únicamente a los elementos analizados, en la condición de muestra ingresada al laboratorio". De tener alguna queja o apelación presentarla mediante el correo inassa@nsf.org, con la información sustentatoria."



**LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

Instituto de Certificación, Inspección y Ensayos



INFORME DE ENSAYOS

N° 006881 - 2016

SOLICITANTE : DAVIS BERROSPI DIAZ
DIRECCIÓN LEGAL : ASENT. H. LOS OLIVOS DE PRO SECT. C MZ O LTE 31
: RUC: --- Teléfono: 948595334
PRODUCTO : AZUCAR BLANCA
NÚMERO DE MUESTRAS : Uno
IDENTIFICACIÓN/MTRA. : S.I
CANTIDAD RECIBIDA : 631,2 g (+ envase) de muestra proporcionada por el solicitante.
MARCA(S) : S.M
FORMA DE PRESENTACIÓN : Envasado, la muestra ingresa en bolsa sellada
SOLICITUD DE SERVICIO : S/S N°EN-004110 -2016
REFERENCIA : PERSONAL
FECHA DE RECEPCIÓN : 16/08/2016
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO/QUÍMICO
PERÍODO DE CUSTODIA : 3 Meses, a partir de la fecha de recepción.
RESULTADOS :

ENSAYOS FÍSICOS/QUÍMICOS :

ALCANCE : N.A.

ENSAYO	RESULTADO
1.- Azúcares Reductores (g / 100 g de muestra original)	0,01
2.- Cenizas (g / 100 g de muestra original)	0,04
3.- Humedad(g / 100 g de muestra original)	0,01

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO :

- 1.- NTP 207.022 2005
- 2.- NTP 207.006 2005
- 3.- NTP 207.005 2003

FECHA DE EJECUCION DE ENSAYOS: Del 16/08/2016 Al 22/08/2016.

ADVERTENCIA :

- 1.- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento y transporte de la muestra hasta su ingreso a La Molina Calidad Total - Laboratorios son de responsabilidad del Solicitante.
- 2.- Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente Informe sin la autorización de La Molina Calidad Total - Laboratorios.
- 3.- Válido sólo para la cantidad recibida. No es un Certificado de Conformidad ni Certificado del Sistema de Calidad de quien lo produce.
- 4.- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INACAL-DA.

La Molina, 22 de Agosto de 2016



LA MOLINA CALIDAD TOTAL LABORATORIOS-UNALM

Pág 1/1

Cecilia Arnedo
Ing. Mg. Sc. Cecilia Arnedo
DIRECTORA TÉCNICA
CR N° 185315

Av. La Molina S/N (frente a la puerta principal de la Universidad Agraria) - La Molina - Lima - Perú
Telf.: (511) 3495840 - 3492507 Fax: (511) 3495794
E-mail: mktg@lamolina.edu.pe - Página Web: www.lamolina.edu.pe/calidadtotal - La Molina Calidad Total

A.3. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DESIONIZADA USADA PARA PREPARAR LAS SOLUCIONES AZUCARADAS



Pag. 1 de 1

ITS REF.: PER/0815-16

CERTIFICADO DE CALIDAD N° 0978/16

SOLICITANTE : PALACIO DE AGUA S.A.C.
 DOMICILIO LEGAL : JR. BELGICA N° 1442 INT. 1, LA VICTORIA - LIMA.
 PRODUCTO : AGUA TRATADA
 INFORMACION DE MUESTRA :

PUNTO DE TOMA DE MUESTRA	CANTIDAD	DESCRIPCION
GRIFO DE AGUA DE LA ZONA DE DESPACHO	05 Lecturas de campo	Frascos de Vidro x 500 ml.

FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 09 DE FEBRERO DE 2016
 ENSAYOS EFECTUADOS POR : INTERTEK TESTING SERVICES PERU S.A.
 INFORME DE INSPECCIÓN : 0452/2016/A
 REPORTE DE EVALUACIÓN : 0624A/16
 REFERENCIA:
 ❖ Solicitud de Certificación : N° 0228A/16
 ❖ PER : PER/0815A-16

RESULTADOS

ALCANCE: Sistema No. 1: La muestra del producto de la referencia ha sido proporcionada por el cliente, y la conclusión es sólo para la muestra analizada en base a las especificaciones proporcionada.

ENSAYO	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO	OBSERVACIÓN
Conductividad (26,1 °C) (µS/cm)	< 1,00	0,00	CUMPLE

MÉTODOS DE ENSAYO:

Conductividad (26,1 °C): Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22nd Ed. 2012 Part 2510 B. Conductivity Laboratory Method

ESPECIFICACIÓN: Proporcionada por el cliente.

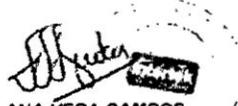
CONCLUSIÓN: LA MUESTRA DE LA REFERENCIA **ES CONFORME** CON LA ESPECIFICACIÓN DETALLADA PARA LOS ENSAYOS ARRIBA INDICADOS

PERIODO DE VALIDEZ: NOVENTA DÍAS (90) A PARTIR DE LA FECHA DE EMISIÓN DE ESTE CERTIFICADO

MUESTRA DE DIRIMENCIA: NO SE GUARDARA MUESTRA DIRIMENTE

NOTAS:

- ESTE CERTIFICADO NO DEBE SER REPRODUCIDO PARCIAL O TOTALMENTE SIN LA APROBACIÓN POR ESCRITO DE INTERTEK TESTING SERVICES PERÚ S.A.


 ING. ANA VERA CAMPOS
 JEFE DE CERTIFICACIONES
 Lima, 09 de febrero de 2016

Intertek Testing Services Perú S.A.

Calle Mariscal José de La Mar N° 200 - Urb. Industrial Residencial el Pino - San Luis - LIMA - PERU / Teléfono: (511) 399 0940
 Correo electrónico: intertekeru@intertek.com / Web: http://www.intertek.com.pe

CERTIFICADO DE CALIDAD N° 0884/16

SOLICITANTE : PALACIO DE AGUA S.A.C.
 DOMICILIO LEGAL : JR. BELGICA N° 1442 INT. 1, LA VICTORIA - LIMA.
 PRODUCTO : AGUA TRATADA

INFORMACIÓN DE MUESTRA DE LABORATORIO

❖ PRESENTACIÓN : ENVASE DE PLASTICO
 ❖ CANTIDAD DE MUESTRA : 02 MUESTRAS DE 01 GALON CADA UNA
 FECHA RECEPCIÓN DE MUESTRA : 02 DE FEBRERO DE 2016
 FECHA DE ANÁLISIS : 03 AL 05 DE FEBRERO DE 2016
 ENSAYOS EFECTUADOS POR : INTERTEK TESTING SERVICES PERU S.A.
 INFORME DE ENSAYO : 1517A/16
 REPORTE DE EVALUACIÓN : 0571/16
 REFERENCIA:
 ❖ Solicitud de Certificación : N° 0187A/16
 ❖ PER : PER/0620A-16

RESULTADOS

ALCANCE: Sistema No. 1: La muestra del producto de la referencia ha sido proporcionada por el cliente, y la conclusión es sólo para la muestra analizada en base a las especificaciones proporcionadas por el solicitante.
 Los métodos de ensayo han sido los acordados con el solicitante.

ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN
PH (24,9 °C)	---	6,98	6,5 - 7,5
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	0,00	0,00
Sólidos totales disueltos	mg/L	0,7	< 5,00

MÉTODOS DE ENSAYO:

pH: Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater 22nd Edition 2011, Part 4500-H + B. pH VALUE. Electrometric Method.
 Dureza: Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater 22nd Edition 2012 Part 2340C. Hardness EDTA Titrimetric Method.
 Sólidos totales disueltos: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22nd, Ed. 2012, Part 2540C. Total Dissolved Solids Dried at 180 °C.

ESPECIFICACIÓN: Especificaciones proporcionadas por el solicitante.

CONCLUSIÓN: La muestra de la referencia **ES CONFORME** con las especificaciones detalladas, para los ensayos arriba indicados.

PERIODO DE VALIDEZ: NOVENTA DÍAS (90) A PARTIR DE LA FECHA DE EMISIÓN DE ESTE CERTIFICADO

MUESTRA DE DIRIMENCIA: NO SE GUARDARA MUESTRA DIRIMENTE

NOTAS:

1. ESTE CERTIFICADO NO DEBE SER REPRODUCIDO PARCIAL O TOTALMENTE SIN LA APROBACIÓN POR ESCRITO DE INTERTEK TESTING SERVICES PERÚ S.A.



ING. ANA VERA CAMPOS
 JEFE DE CERTIFICACIONES
 Lima, 08 de febrero de 2016

Intertek Testing Services Perú S.A.

Calle Mariscal José de La Mar N° 200 - Urb. Industrial Residencial el Pino - San Luis - LIMA - PERU / Teléfono: (511) 399 0940
 Correo electrónico: intertekperu@intertek.com / Web: <http://www.intertek.com.pe>