

**EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE FONDOS DE VACÍO SOBRE LA
VISCOSIDAD APARENTE DE SLURRIES Y LA VISCOSIDAD DE
COMBUSTÓLEOS EN LA GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA,
ECOPETROL S.A.**

EDWIS PÉREZ DÍAZ



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2017**

**EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE FONDOS DE VACÍO SOBRE LA
VISCOSIDAD APARENTE DE SLURRIES Y LA VISCOSIDAD DE
COMBUSTÓLEOS EN LA GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA,
ECOPETROL S.A.**

EDWIS PÉREZ DIAZ

Proyecto para optar por el título de Magíster en Ingeniería Química

Director:

ARLEX CHAVES GUERRERO

PhD en Ingeniería Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A mi madre quien además de enseñarme con su ejemplo el tesón y la fortaleza para salir adelante, desde muy corta edad me ha impulsado a seguir creciendo en todos los aspectos de mi vida.

A mis hijos Santiago y Alejandra quienes han sido mi motivación para nunca desfallecer y que con su luz hacen mi camino más claro.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a la Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL S.A. y muy especialmente al Ing. Orlando Diaz Montoya por el desarrollo de este convenio que vincula la industria con la academia; al Ing. Ernesto Gomez Cabarcas quien siempre ha sido un referente por su entusiasmo, conocimientos y entrega y a la Ing. Liliana Patricia Angulo Jimenez por su confianza y total apoyo.

A mi director de proyecto Arlex Chaves **Guerrero PhD** quien fue un permanente guía y apoyo durante todo el proceso de elaboración de este trabajo de aplicación con sus conocimientos técnicos y grandes consejos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	25
2.1 GENERALIDADES	25
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE REFINACIÓN EN LA GRB	26
2.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PREPARACIÓN DE COMBUSTÓLEO	28
2.4 CONTROL EN REGALO DE CALIDAD	32
2.5 VISCOSIDAD Y COMPORTAMIENTO REOLÓGICO	35
3. OBJETIVOS DEL PROYECTO	41
3.1 OBJETIVO GENERAL	41
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	41
4. METODOLOGÍA	42
4.1 REVISIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA DE VISCOSÍMETRO EN LÍNEA.	43
4.2 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO COMPONENTES COMBUSTÓLEO.	43
4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS COMPONENTES Y PRODUCTOS	46
4.3.1 Medidas de viscosidad y densidad en línea y en el laboratorio GRB	46
4.3.2. Evaluación de la reología de Combustóleo sin Fondos de vacío.	47
4.4 FACTORES QUE PODRÍAN AFECTAR EL COMPORTAMIENTO DEL VISCOSÍMETRO EN LÍNEA	47

4.5 FUNCIONAMIENTO DE VISCOSÍMETROS DE VIBRACIÓN	52
4.5.1 Principio de medición para los viscosímetros con diapasón	52
4.5.2 Ecuaciones para el cálculo de viscosidad	53
4.5.3 Ecuaciones para el cálculo de densidad	54
4.5.3 Cálculo de la viscosidad cinemática	55
4.5.4 Rangos de viscosidad	56
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.	57
5.1 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES Y PRODUCTOS	57
5.2 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE COMBUSTÓLEOS CON FONDOS DE VACÍO.	63
5.2.1. Mezcla # 1	64
5.2.2. Mezcla # 2	69
5.2.3. Mezcla # 3	74
5.2.4. Mezcla # 4	80
5.2.5. Mezcla # 5	84
5.2.6 Análisis General	89
6. CONCLUSIONES	92
7. RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	96

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Viscosidad en SSF a 122°F en tanques de slurry sin desvíos de fondos de vacío.	22
Figura 2. Viscosidad en SSF a 122°F en tanques de slurry con desvíos de fondos de vacío.	22
Figura 3. Diagrama general del proceso de refinación del petróleo en la GRB.	28
Figura 4. Diagrama de flujo general del sistema de almacenamiento y mezcla de combustóleo.	29
Figura 5. Diapasón.	30
Figura 6. Curva de respuesta de frecuencia del viscosímetro 7827.	31
Figura 7. Potencial de pérdida económica de regalo de calidad por viscosidad del Combustóleo Pesado	33
Figura 8. Potencial de pérdida económica de regalo de calidad por viscosidad del Combustóleo Liviano	34
Figura 9. Clasificación de los fluidos	38
Figura 10. Sistema de preparación de combustóleos pesados y livianos.	44
Figura 11. Instalación tipo “cámara” para evitar efectos de frontera.	51
Figura 12. Caso base LFO a 122°F, Viscosidad contra Velocidad de deformación	60
Figura 13. Caso base LFO a 122°F, Esfuerzo cortante contra Velocidad de deformación	61
Figura 14. Caso base LFO a 170°F, Viscosidad Vs Velocidad de deformación	62
Figura 15. Caso base LFO a 170°F, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación	63
Figura 16. Mezcla 1 HFO a 122°F con 12% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.	66

Figura 17. Mezcla 1 HFO a 122°F con 12% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.	67
Figura 18. Mezcla 1 HFO a 170°F con 12% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.	68
Figura 19. Mezcla 1 HFO a 170°F con 12% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación	68
Figura 20. Mezcla 2 HFO a 122°F con 13% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.	72
Figura 21. Mezcla 2 HFO a 122°F con 13% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.	72
Figura 22. Mezcla 2 HFO a 170°F con 13% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.	74
Figura 23. Mezcla 2 HFO a 170°F con 13% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación	74
Figura 24. Mezcla 3 HFO a 122°F con 18% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.	77
Figura 25. Mezcla 3 HFO a 122°F con 18% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.	78
Figura 26. Mezcla 3 HFO a 170°F con 18% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.	79
Figura 27. Mezcla 3 HFO a 170°F con 18% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.	79
Figura 28. Mezcla 4 LFO a 122°F con 8% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.	82
Figura 29. Mezcla 4 LFO a 122°F con 8% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.	82
Figura 30. Mezcla 4 LFO a 170°F con 8% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.	83
Figura 31. Mezcla 4 LFO a 170°F con 8% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.	84

Figura 32. Mezcla 5 LFO a 122°F con 4% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.	87
Figura 33. Mezcla 5 LFO a 122°F con 4% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.	87
Figura 34. Mezcla 5 LFO a 170°F con 4% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.	88
Figura 35. Mezcla 5 LFO a 170°F con 4% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación	89
Figura 36. Desviación reómetro/laboratorio Vs contenido de fondos de vacío.	90
Figura 37. Desviación reómetro/analizador Vs contenido de fondos de vacío.	90

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Condiciones de proceso en matriz de mezcla de combustóleo	29
Tabla 2. Precios de componentes y productos.	33
Tabla 3. Datos de viscosidad para varias sustancias a 20°C, adaptada de Barnes et al. (1989).	36
Tabla 4. Composiciones de las mezclas.	46
Tabla 5. Composición típica del slurry	48
Tabla 6. Distribución tamaño de partícula	49
Tabla 7. Resultados análisis GRB Caso Base (sin fondos de vacío). Las medidas fueron tomadas con el viscosímetro de combustóleo liviano.	58
Tabla 8. Composición mezcla Caso base y comparativo de resultados Reómetro vs Laboratorio GRB y Reómetro vs Analizador. Todas las viscosidades fueron medidas a 122°F	59
Tabla 9. Resultados de análisis GRB, Mezcla 1 HFO producto.	64
Tabla 10. Composición mezcla 1 HFO producto y comparativo de resultados Reómetro Vs Laboratorio GRB y Reómetro Vs Analizador. Todas las viscosidades en SSF a 122°F	65
Tabla 11. Resultados de análisis GRB, Mezcla 2 HFO producto	70
Tabla 12. Composición mezcla 2 HFO producto con 13% de fondos de vacío y comparativo de resultados Reómetro Vs Laboratorio GRB y Reómetro Vs Analizador. Todas las viscosidades en SSF a 122°F.	71
Tabla 13. Resultados de análisis GRB, Mezcla 3 HFO producto.	75
Tabla 14. Composición mezcla 3 HFO producto con 18% de fondos de vacío y comparativo de resultados Reómetro Vs Laboratorio GRB y Reómetro Vs Analizador. Todas las viscosidades en SSF a 122°F.	76
Tabla 15. Resultados de análisis GRB, Mezcla 4 LFO producto.	80

Tabla 16. Composición mezcla 4 LFO producto con 8% de fondos de vacío y comparativo de resultados Reómetro Vs Laboratorio GRB y Reómetro Vs Analizador. Todas las viscosidades en SSF a 122°F.	81
Tabla 17. Resultados de análisis GRB, Mezcla 5 LFO producto.	85
Tabla 18. Composición mezcla 5 LFO producto con 8% de fondos de vacío y comparativo de resultados Reómetro Vs Laboratorio GRB y Reómetro Vs Analizador. Todas las viscosidades en SSF a 122°F.	86

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Certificado de calibración	96

RESUMEN

TÍTULO: EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE FONDOS DE VACÍO SOBRE LA VISCOSIDAD APARENTE DE SLURRIES Y LA VISCOSIDAD DE COMBUSTÓLEOS EN LA GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA, ECOPETROL S.A

AUTORES: Edwis Pérez Díaz**

PALABRAS CLAVES: Viscosidad. Fondos de vacío. Combustóleo. Mezcla. Velocidad de deformación. Reología. Slurry. Fondos de viscorreductora

RESUMEN:

Debido a que la refinería de Ecopetrol en Barrancabermeja cuenta con cargas de crudo cada vez más pesadas, se está generando un mayor volumen de fondos en las unidades de destilación al vacío que superan la capacidad de manejo para una refinería de media conversión. La solución ha sido integrar esos volúmenes excedentes hacia las mezclas para las preparaciones de combustóleo liviano y pesado producto. Estos fondos han modificado radicalmente las mezclas típicas para la preparación de combustóleo con un incremento en el consumo de diluyente e incrementos en las desviaciones establecidas para la operación de los viscosímetros vibracionales utilizados para la medición y control de la viscosidad en línea; generando impactos económicos por reprocesos en las preparaciones de productos y los consecuentes retrasos en las entregas. Los estudios previos de estos fondos de vacío han demostrado que tienen un comportamiento reológico no newtoniano, donde la viscosidad no es proporcional a la velocidad de deformación y es justo esta naturaleza lo que estaría causando una pérdida en la confiabilidad de los resultados de los viscosímetros en línea. Para esto se realizó una evaluación reológica de mezclas en diferentes concentraciones de fondos de vacío desde el caso base sin fondos de vacío, hasta concentraciones del 18% de volumen en la mezcla que permitieran evidenciar su comportamiento no newtoniano y el grado de afectación sobre las mezclas preparadas; así mismo identificar las desviaciones sobre los sistemas de control de calidad en laboratorio y analizadores en campo y proponer soluciones que conlleven a asegurar las calidades de las preparaciones del combustóleo en línea.

* Project of grade

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química Maestría en Ingeniería Química. Director Arlex Chaves Guerrero PhD..

ABSTRACT

TITLE: EFFECT OF CONCENTRATION OF VACUUM FUNDS ON SLURRIES VISCOSITY AND THE VISCOSITY OF COMBUSTOLES IN THE MANAGEMENT REFINERY OF BARRANCABERMEJA, ECOPETROL S.A *

AUTHORS: Edwis Pérez Diaz **

KEY WORDS: B Viscosity. Empty backgrounds. Fuel oil. Mixture. Strain speed. Rheology. Slurry. Visor Reed Wallpapers

Description

Because the Ecopetrol refinery in Barrancabermeja has heavier and heavier oil loads, a greater volume of bottoms is being generated in the vacuum distillation units that exceed the handling capacity for a medium-conversion refinery. The solution has been to integrate those surplus volumes into the blends for the light fuel oil and heavy product preparations. These bottoms have radically altered the typical blends for the preparation of fuel oil with an increase in diluent consumption and increases in the deviations established for the operation of the vibrational viscometers used for the measurement and control of the viscosity in line, generating economic impacts due to reprocessing in product preparations and consequent delays in deliveries. The previous studies of these vacuum bottoms have shown that they have a non-Newtonian rheological behavior, where the viscosity is not proportional to the shear rate and it is just this nature which would be causing a loss in the reliability of the viscometers results in line. For this, a rheological evaluation of mixtures in different concentrations of vacuum bottoms from the base case without vacuum bottoms was carried out, to concentrations of 18% volume in the mixture that allowed to evidence its non-Newtonian behavior and the degree of affectation on the mixtures prepared; ás well as to identify the deviations on the quality control systems in the laboratory and field analyzers and to propose solutions that will ensure the quality of the preparations of the fuel oil in line, reduce the reprocessing and the quality gifts, improving the economic margins in the Mixing system for these products.

* Project of grade

** Physicochemical Faculty of Engineering. School of Engineering Chemical. Master of Chemical Engineering Director Arlex Chaves Guerrero PhD..

INTRODUCCIÓN

El combustóleo, también conocido como fuel oil No. 6, es un combustible elaborado a partir de productos residuales que se obtienen de los procesos de refinación del petróleo. Éste es un combustible de bajo precio usado como fuente de energía en diversas industrias y en centrales eléctricas. No obstante, se ha dado una reducción en la calidad de los combustóleos y en los volúmenes de producción diarios debido al continuo cambio tecnológico de las refinerías que permite procesos de refinación más eficientes (refinerías de alta conversión, 95%) hacia productos valiosos como la gasolina, el diésel y el jet. Por otro lado, las dietas de alimentación de las unidades de destilación, han disminuido su gravedad API ocasionando un incremento en la producción de combustóleos y fondos de vacío en las refinerías de media conversión. Estos cambios se reflejan en problemas en los equipos de producción del combustóleo, así como en los equipos de combustión que lo usan como combustible. Una de las propiedades físicas más importantes del combustóleo es la viscosidad, y desde un punto de vista más amplio el comportamiento reológico, el cual se puede ver fuertemente afectado por las propiedades físicas de sus componentes. Desde este punto de vista, una adecuada caracterización reológica del combustóleo y de los componentes utilizados para su preparación se hacen necesaria con el fin de garantizar los parámetros de calidad exigidos por el mercado, el transporte eficiente a través de oleoductos, así como adecuados procesos de combustión durante su uso final como fuente de energía.

El incremento de producciones de estas corrientes pesadas (Fondos de vacío) además de afectar la preparación del combustóleo, generan en la refinería cuellos de botella en el manejo de volúmenes debido a que en algunos casos, como el que se estudia en este trabajo, supera la capacidad de procesamiento instalado y

obliga a direccionar fracciones aún más pesadas hacia el sistema de combustóleo para su posterior evacuación a través de ventas adicionales de producto.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sistema de mezclado en línea para la preparación de combustóleo en la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB) fue concebido a finales de la década del 90 para mezclar en promedio 45 kbpd de fuel, no obstante sólo fue puesto en servicio a mediados del 2004¹. Este sistema tiene como objetivo la preparación de combustóleo liviano (LFO, de sus siglas en inglés) y pesado (HFO, de sus siglas en inglés) con viscosidades de 50 SSF (Seconds Saybolt Furol) a 122°F y 300 SSF a 122°F, respectivamente.

El LFO fue inicialmente preparado con una composición de 60% en peso de un residuo proveniente de la unidad viscorreductora, 30% de un producto llamado en la refinería “slurry”, proveniente del fondo de las unidades de craqueo catalítico y 10% de aceite liviano de ciclo.

De la misma forma, el HFO fue preparado inicialmente mezclando 75% de fondos de la unidad viscorreductora y 25% de slurry. El destino de los dos tipos de combustóleos preparados en la GRB es el terminal Nestor Pineda en Cartagena, donde son remezclados con los fondos de viscorreductora de la refinería de Cartagena con una viscosidad de 1000 SSF a 122°F para producir un combustóleo tipo exportación de viscosidad de 320 SSF a 122°F.

Sin embargo, durante el proceso de comisionamiento y puesta en servicio de los sistemas de mezclado usados en la preparación del combustóleo en el año 2004, se realizaron trabajos de comparación para determinar las desviaciones de las

¹ CT&F - CIENCIA, TECNOLOGÍA Y FUTURO Sistema de homogenización y control de viscosidad del combustóleo - Vol. 1 Núm. 2 Dic. 1996,

mediciones de viscosidad entre los analizadores en línea y los resultados de los análisis en el laboratorio de control de calidad.

Las desviaciones identificadas entre los analizadores fueron de 2.5 SSF para el viscosímetro de LFO por encima del dato reportado por el laboratorio y de más o menos 7 SSF para el HFO; estos valores de las desviaciones se utilizaban por el supervisor de mezclado de productos terminados, con el fin de realizar los ajustes necesarios durante el proceso de mezcla y así obtener productos ajustados a las especificaciones de calidad.

No obstante, con el declive en la producción de campos de crudo liviano en el país y el auge de crudos pesados², las cargas alimentadas a las refinerías han cambiado sustancialmente a mezclas de menor gravedad API. Este cambio ha impactado fuertemente en los procesos de transformación en la refinería de Barrancabermeja considerada de baja conversión, donde alrededor del 20 a 25% de los productos son asfaltos y combustóleos los cuales tienen bajos márgenes de ganancia. Esta variación en la composición de las cargas de alimentación ha obligado a la modificación de las mezclas para la preparación de los combustóleos en línea, pues se ha incrementado la producción de residuos de fondos de vacío entre 5 a 20 mil barriles por día (Kbpd) dependiendo de la composición de las cargas de crudo.

Estos mayores volúmenes diarios de fondos de vacío tienen en la refinería una estrategia definida para su distribución de acuerdo a las capacidades instaladas de los sistemas y unidades de la siguiente manera: la unidad Demex (Desmetalizado con solvente) carga 45 Kbpd, se entregan por carrotanques de 8 a 10 Kbpd de fondos de vacío como asfalto a clientes externos para usarlo en

² COLOMBIA ENERGÍA. Crudos pesados, la gran apuesta del sector. Edición 2, . Pag 22-23. enero 2013. [en línea] disponible en: www.colombiaenergia.com

construcción de vías y el restante, que varía entre 7 y 20 Kbpd, es enviado hacia los tanques de almacenamientos de slurry.

Este volumen adicional que termina en los tanques de combustóleo producto ha obligado a contratar más medios de transporte para evacuarlos de la refinería y es así que se entregan en promedio 10 Kbpd adicionales de fuel liviano por oleoducto, 8 Kbpd de HFO por carrotanques y un incremento de 10 Kbpd de fuel pesado por transporte fluvial en remolcadores. El manejo de estos últimos se ven seriamente comprometidos en épocas de verano cuando el río Magdalena baja su cota a niveles innavegables y se reduce considerablemente el transporte de este combustóleo por el río. Esta restricción ocasiona una congestión en todos los sistemas de manejo de productos pesados y la disminución del margen de maniobrabilidad por los altos inventarios en los tanques de almacenamiento, al punto que cualquier preparación fuera de especificaciones de calidad, se dificulta sobremanera la corrección de la desviación en el producto final. Lo anterior hace necesario garantizar la confiabilidad de los viscosímetros en línea que se utilizan para el control de calidad de la mezcla.

Por lo tanto, los desvíos de fondos de vacío hacia combustóleo han generado que la viscosidad del slurry pase de 60 SSF a 122°F en promedio a viscosidades superiores a los 600 SSF a 122°F y con picos máximos de 2700 SSF a 122°F; adicionalmente la temperatura del slurry también se ha visto afectada incrementándose de 120°F en promedio, a valores de entre 190-200°F y con ello la mezcla final ha incrementado sus valores de 140°F en promedio a 160-165°F.

Figura 1 Viscosidad en SSF a 122°F en tanques de slurry sin desvíos de fondos de vacío.

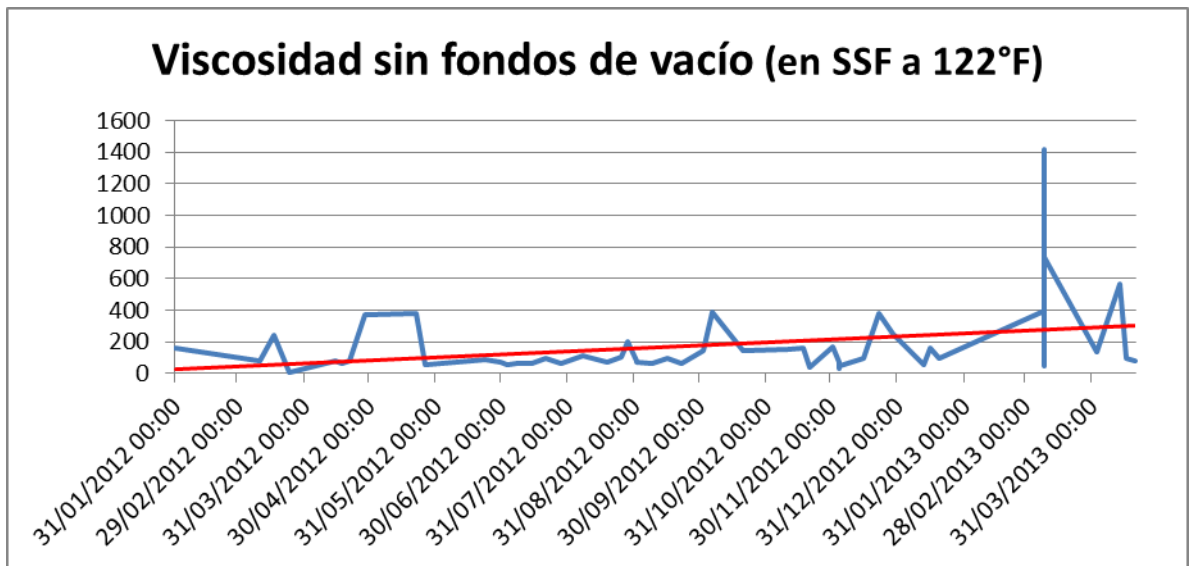
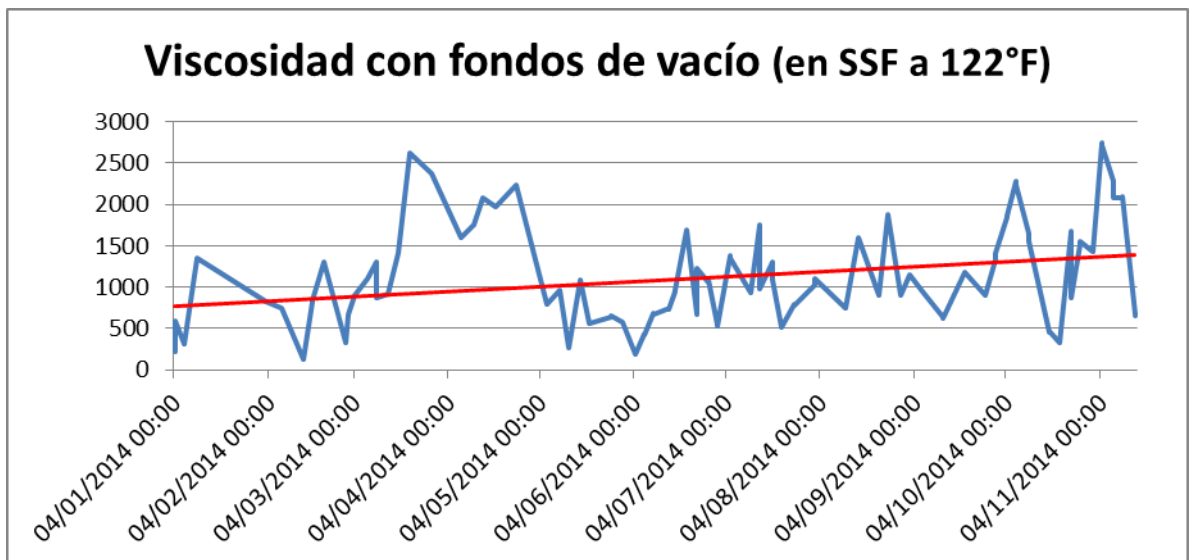


Figura 2. Viscosidad en SSF a 122°F en tanques de slurry con desvíos de fondos de vacío.



La Figura 1 muestra el comportamiento de la viscosidad de las muestras tomadas en los tanques de almacenamiento de slurry y se muestran los datos desde el año 2012 donde no existía la necesidad de desviar fondos de vacío hacia la

preparación de combustóleo. En ese tiempo, la viscosidad promedio de los componentes almacenados era de 80 SSF a 122°F. A mediados del 2013, se empieza el incremento de la viscosidad debido a pequeños y puntuales desvíos de fondos de vacío hacia slurry; pasando a valores de viscosidad en los tanques de slurry superiores a 200 SSF a 122°F.

La Figura 2 muestra el comportamiento de la viscosidad promedio en los tanques de slurry para el año 2014, incrementándose de 600 SSF a valores cercanos a los 3000 SSF a 122°F. En este año, el desvío de fondos de vacío hacia la preparación de combustóleo se convirtió en obligatorio para controlar los altos inventarios en los sistemas de almacenamiento de fondos de vacío en la GRB.

El impacto de esta nueva composición en el slurry ha generado mucho más que el incremento lógico en el consumo de diluyente para las mezclas de LFO y de HFO, que antes no lo requería. Por ejemplo, también hay impactos negativos en los equipos de bombeo que están diseñados para viscosidades inferiores a 600 SSF a 122°F y están manejando valores superiores a 1000 SSF a 122°F, acortando la vida útil de los internos de los equipos y sometiénolos a condiciones de operación para los cuales no están diseñados.

Otro de estos impactos es la disminución en la confiabilidad de la medición de viscosidad, cuyas desviaciones son variables y no determinadas en la actualidad, lo que está afectando de manera significativa la viscosidad del combustóleo como producto final, tanto en liviano como pesado. Este hecho genera la necesidad de reprocesar los tanques de producto, inconformidades de los clientes por entrega de producto con valores superiores al límite máximo en viscosidad, o por el contrario pérdidas económicas por entregas de combustóleo con valores de viscosidad bajos; y retrasos en las entregas con la afectación por incumplimiento a los clientes finales.

Por tal razón, el objetivo de este trabajo de aplicación es realizar una caracterización reológica tanto de los slurries como de los combustóleos preparados actualmente en la GRB, con el fin de determinar si existen cambios apreciables del comportamiento reológico de éstos que pudieran estar afectando las medidas de viscosidad tomadas en los viscosímetros en línea.

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 GENERALIDADES

En la década de los 90 con el descubrimiento y explotación de los campos de crudo liviano Cusiana y Cupiagua, nuestro país pudo borrar de su horizonte cercano el fantasma de la importación de crudo; estos campos con una producción en su pico más alto de 500 KBPD satisfacían el consumo interno e incluso permitía exportar. Estos yacimientos se fueron agotando y los campos de crudo pesado como Castilla, Chichimene y Rubiales empezaron su desarrollo vertiginoso a partir del año 2000.

Este cambio sustancial en la calidad de los crudos impactó, no sólo las exportaciones de crudo del país, sino también las cargas a la refinería de Cartagena y, especialmente, las de Barrancabermeja, donde las corridas de crudo liviano en las unidades de refinación se hacen más cortas, dando paso a cargas de mezclas intermedias, es decir, con crudos de menor API.

En el proceso de refinación de petróleo el combustóleo es un subproducto pesado, con un alto volumen de producción de aproximadamente entre el 20-30% del volumen de crudo cargado. Por tal razón, refinerías de baja conversión como la de Barrancabermeja, requieren de altos consumos de diluyentes para el manejo de combustóleo debido a las altas viscosidades, diluyentes que deberían ser valorizados en el proceso de mezclas como corrientes intermedias hacia Diesel.

Este combustóleo preparado en la GRB es enviado a Cartagena donde se realiza una mezcla final para el cumplimiento de la calidad tipo exportación.

El control de la calidad en términos de viscosidad es muy importante en este producto, ya sea para uso como combustible de calderas, porque la estabilidad de la mezcla influye en la calidad de la atomización para obtener una combustión eficiente. Con esto se logra reducir las emisiones contaminantes y además se evita el rechazo por el incumplimiento de la calidad exigida internacionalmente.³

Adicional a lo anteriormente descrito, se encuentra el tema económico asociado de igual manera a la viscosidad y tiene que ver con los regalos de calidad o la entrega de producto con valores por debajo de los máximos permitidos para el cumplimiento de la especificación y que tienen un impacto económico negativo por la necesidad de utilizar mayores volúmenes de componentes livianos que tienen mayor valor.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE REFINACIÓN EN LA GRB

Un diagrama de flujo de los principales procesos de la GRB se muestra en la Figura 3. La Refinería de Barrancabermeja tiene una capacidad de carga máxima 252.000 BPD para procesarlos y obtener los combustibles y demás derivados. En este complejo industrial, además de producir combustibles como la gasolina, el diésel y el GLP, también se producen petroquímicos e industriales. El primer paso de la refinación del petróleo crudo se cumple en las torres de “destilación primaria” o “destilación atmosférica”. En su interior, estas torres operan a una presión cercana a la atmosférica y están divididas en numerosos compartimientos a los que se denominan “bandejas” o “platos”. Cada bandeja tiene una temperatura diferente y cumple la función de fraccionar los componentes del petróleo.

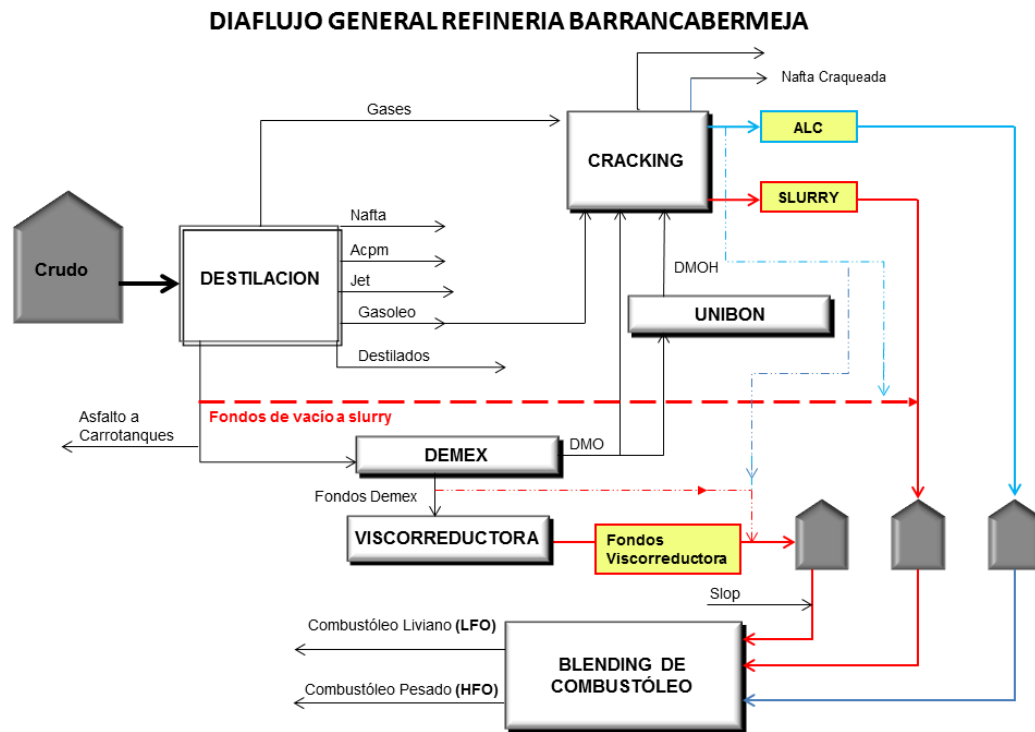
³ GROSSO et al., Sistema de homogenización y control de viscosidad del combustóleo, CT&F – Ciencia, tecnología y futuro – Vol. 1 Núm. 2 Dic. 1996.

El crudo llega a estas torres después de pasar por un horno, donde se calienta a temperaturas de hasta 750°F que lo convierten en vapor. Esos vapores entran por la parte inferior de la torre de destilación y ascienden por entre las bandejas. A medida que suben pierden calor y se enfrían. Cuando cada componente vaporizado asciende y encuentra su propia temperatura, se condensa y se deposita en su respectiva bandeja

Al fondo de la torre cae el “crudo reducido”, es decir, aquel que no alcanzó a evaporarse en esta primera etapa. Se cumple así el primer paso de la refinación. De abajo hacia arriba se han obtenido, en su orden: crudo reducido, gasóleos, acpm, Jet A1, nafta y gases ricos en butano y propano. De estas corrientes solo el Jet A1 es producto final. Las demás corrientes se envían a otras torres y unidades para someterlas a nuevos procesos, al final de los cuales se obtendrá el resto de los derivados del petróleo. Así, entonces, la torre de “destilación al vacío” recibe el crudo reducido de la primera etapa y saca gasóleos pesados, bases parafínicas y fondos (Asfalto). Este último derivado es sometido a un proceso de extracción líquido – líquido en la Unidad de Demex, cuyo producto de fondo se conoce como fondos demex; estos fondos son sometidos a altas temperaturas con el objetivo de fraccionar las moléculas más pesadas y disminuir la viscosidad de esta corriente, el resultado de este proceso se denomina *fondos de viscorreductora*.

La Unidad de Craqueo Catalítico o Cracking recibe gasóleos y crudos reducidos de crudos livianos para producir fundamentalmente gasolina y gas propano como producto de cima, *Aceite Liviano de Ciclo* (ALC) como uno de los productos intermedios y sus fondos tales como *Slurry*. Con la mezcla de estos tres componentes slurry, ALC y fondos de viscorreductora en diferentes proporciones se obtienen los Combustóleos Liviano y Pesado.

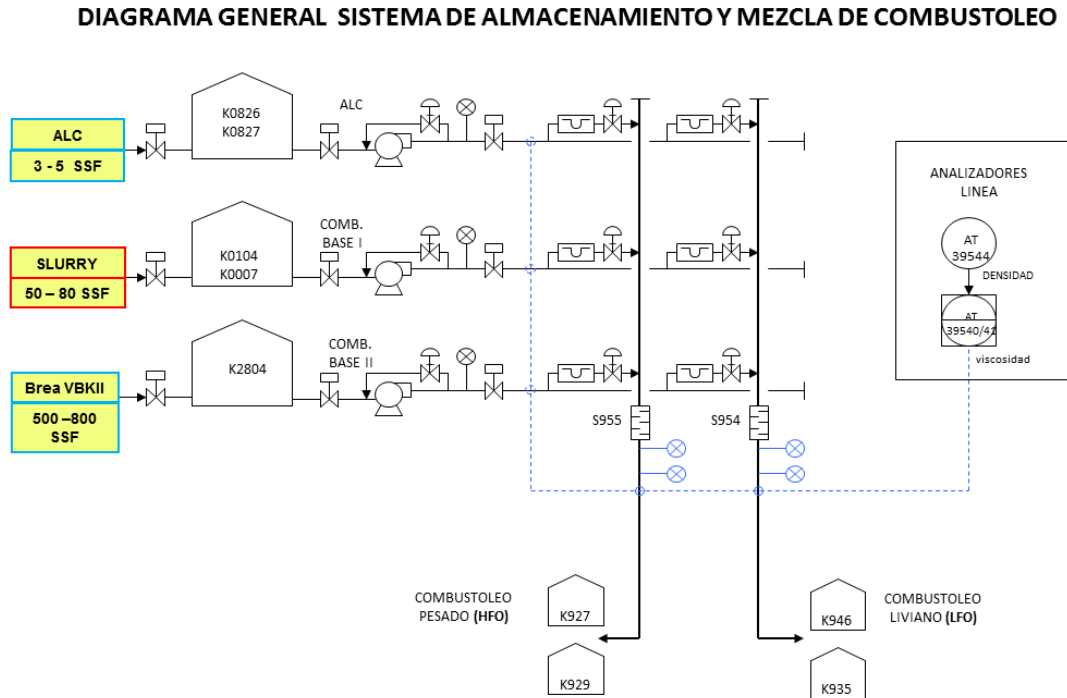
Figura 3. Diagrama general del proceso de refinación del petróleo en la GRB.



2.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PREPARACIÓN DE COMBUSTÓLEO

La refinería de Barrancabermeja cuenta con un sistema de control de mezcla que consta de tanques de almacenamiento de componentes y de producto final (donde se toman muestras para seguimiento y visto bueno para el despacho final); bombas para el despacho de componentes a la matriz de mezcla, lazos de control de flujo y analizador de viscosidad y densidad en línea. En la figura 4, se presenta un diagrama de flujo general del sistema de almacenamiento y mezcla de combustóleo.

Figura 4. Diagrama de flujo general del sistema de almacenamiento y mezcla de combustóleo.



El sistema de preparación de mezclado en línea para combustóleo liviano y pesado permite el análisis de las siguientes corrientes, a las condiciones de proceso especificadas a continuación:

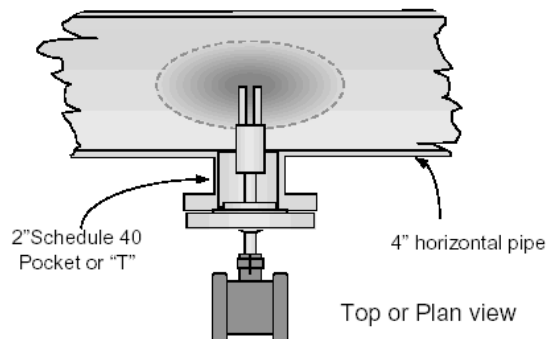
Tabla 1. Condiciones de proceso en matriz de mezcla de combustóleo

Corrientes	Presión (psi) en línea	Temperatura (°F)
ALC	35 – 181	90 – 120
SLURRY+FONDOS VACÍO	35 – 126	140 – 210
FONDOS VRII	35 – 189	119 – 200
COMBUSTÓLEO LIVIANO	23 – 66	120 – 200
COMBUSTÓLEO PESADO	23 – 32	120 – 200

Todas las corrientes mencionadas, son llevadas desde el cabezal de proceso hasta el sistema de alineamiento de bombas, que fue diseñado para mantener un flujo constante de muestra hasta el sistema de acondicionamiento de muestra y los analizadores en línea. Este sistema permite tener un fluido homogéneo sin gas o burbujas que generen problemas de cavitación o remolinos que afecten la medición de viscosidad en los viscosímetros en línea.

El sistema de combustóleo cuenta con analizadores en línea para el control de calidad durante la preparación del combustóleo: densitómetros, analizador de azufre y viscosímetros. El principio de operación de este último es básicamente el siguiente: un elemento vibrante, donde el elemento es un diapasón (“tuning fork”) que es excitado en oscilaciones por un elemento piezo-resistivo posicionado en la raíz de él. Al mismo tiempo, la frecuencia de vibración es detectada por una segunda pieza de cristal piezo-eléctrico asegurado de la segunda punta.

Figura 5. Diapasón.



El sensor del transductor es mantenido en su primera frecuencia resonante natural, la cual es modificada por el fluido que lo rodea y por un circuito amplificado localizado en el compartimiento electrónico.

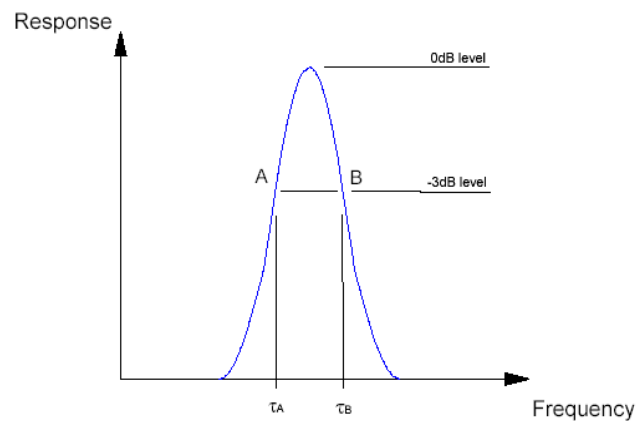
El circuito electrónico actualmente excita el sensor en oscilaciones alternadas a dos posiciones en la curva de respuesta de frecuencia como lo muestra la figura 6,

con esto, el factor de calidad (Q), del resonador puede ser determinado tan bien como la frecuencia resonante.

Para derivar la viscosidad dinámica del fluido se toma la curva de resonancia en dos puntos de frecuencia de oscilación en el transductor; posteriormente es manipulada para calcular el factor de calidad del transductor (Q), y luego es calibrada contra la viscosidad actual determinada por el estándar primario.⁴

El factor de calidad del analizador es calibrado contra la viscosidad dinámica en centiPoise (cP).

Figura 6. Curva de respuesta de frecuencia del viscosímetro 7827.



Si las especificaciones finales no son alcanzadas en el proceso, o son variables con el tiempo, se generan costos adicionales para alcanzar la calidad final requerida. La instalación del sistema de control automático de la viscosidad en línea del combustóleo, previamente evaluado a escala piloto, ha facilitado y optimizado su preparación, minimizando la variación de la viscosidad, dosificando un volumen adecuado de diluyente, que es monitoreado desde un sistema de control distribuido.

⁴ SOLARTRON MOBREY. Technical Manual No. 78275003. 7827 Viscometer.

El viscosímetro mide las siguientes propiedades del fluido:

- Viscosidad dinámica (medida en centiPoise)
- Densidad (medida en kg/m^3)
- Temperatura (medida en $^{\circ}\text{C}$ o $^{\circ}\text{F}$)

De estas propiedades, las siguientes pueden ser deducidas:

- Viscosidad cinemática, deducida en centiStokes.
- Viscosidad cinemática, deducida a segundos saybolt furol, que para nuestro caso es mostrada en el display del equipo ajustada a 122°F y es la misma señal llevada a los sistemas de control.

Los detalles de las ecuaciones utilizadas por el analizador para calcular la viscosidad son referidos en el capítulo 5.

2.4 CONTROL EN REGALO DE CALIDAD

La economía de mezclado se fundamenta en disponer de los componentes de una manera tal que se cumpla con la cantidad, calidad y oportunidad de los productos, al menor costo, y obtener productos incrementales los cuales maximicen el margen o ganancia de la refinería.

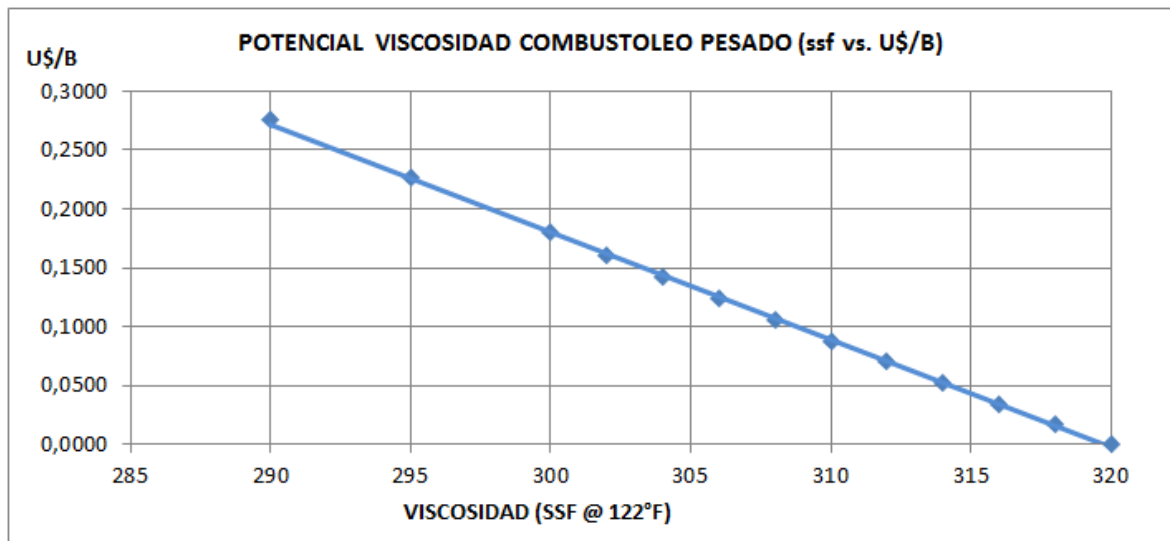
En la tabla 2 se especifica el detalle de los componentes y productos del combustóleo con su respectivo potencial económico, y en cada una de las gráficas se representa el mismo factor para las corrientes de producto.

Tabla 2. Precios de componentes y productos.

CORRIENTE	PRECIO (U\$ / BARRIL)
ALC	49,06
Slurry	27,76
Brea VBK II	18,36
Combustóleo Liviano	29,25
Combustóleo Pesado	27,76

Fuente: Programa semanal de producción de la refinería de Barrancabermeja para la semana del 15 al 27 de Diciembre de 2015.

Figura 7. Potencial de pérdida económica de regalo de calidad por viscosidad del Combustóleo Pesado



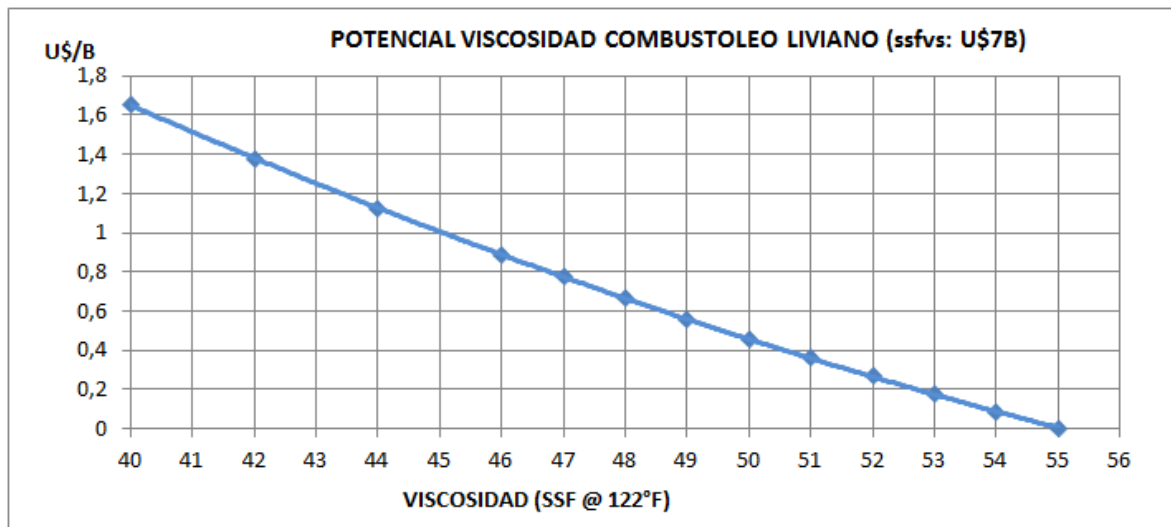
Fuente: Programa semanal de producción de la refinería de Barrancabermeja para la semana del 15 al 27 de Diciembre de 2015.

El potencial económico de contar con estos analizadores calibrados de forma adecuada que nos permita un mejor control de viscosidad, disminuir el regalo de calidad y eliminar los reprocesos se muestra en la siguiente tabla, utilizando como base U\$ 0,08 por cada 10 SSF a 122°F por barril y con los volúmenes entregados de fuel pesado por botes y carrotanques durante el año 2016. No se incluyó el

combustóleo liviano debido a que no está contemplado en el programa de producción su preparación.

2016	VOLUMEN	CALIDAD (SSF a 122°F)	POTENCIAL A 310 SSF (en U\$)
HFO BOTES	8.021.651	298	705.905
HFO CTQS	3.971.939	301	285.980
TOTAL			U\$ 991.885

Figura 8. Potencial de pérdida económica de regalo de calidad por viscosidad del Combustóleo Liviano



Fuente: Programa semanal de producción de la refinería de Barrancabermeja para la semana del 15 al 27 de Diciembre de 2015.

2.5 VISCOSIDAD Y COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

Una de las primeras y más claras definiciones del término viscosidad llegó de la mano con Sir Isaac Newton, quien en su obra "Philosophiae Naturalis. Principia Mathematica" afirmó que la resistencia ejercida y que se genera a raíz de una falta en el deslizamiento de un fluido, es proporcional a la velocidad a la cual las partes de un fluido son separadas entre sí, siempre y cuando no se alteren los demás factores del sistema⁵.

La viscosidad es una propiedad característica fundamental de todos los líquidos. Cuando fluye un líquido, tiene una resistencia interna al flujo. La viscosidad es una medida de esta resistencia al flujo o a la deformación. La viscosidad también se puede denominar como fuerza de arrastre y es una medida de las propiedades de fricción del fluido⁶.

Al ser una característica inherente de los líquidos es necesario conocer su naturaleza y toma relevancia su medición en los procesos para el control de calidad, diseñar y definir condiciones de equipos y sistemas para su manejo, así como calcular la potencia requerida para operar equipos para transporte y almacenamiento, entre otras.

Las características de flujo de los líquidos dependen principalmente de la viscosidad y se dividen en dos categorías: Fluidos Newtonianos y no Newtonianos.

Los fluidos newtonianos llevan el nombre de Sir Isaac Newton (1642-1726), quien describió el comportamiento del flujo de fluidos como una simple relación lineal entre el esfuerzo cortante [Pa] y la velocidad de deformación [1/s]. Esta relación es

⁵ NEWTON Isaac, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, 1687

⁶ DABIR S. Viswanath, Viscosity_of_Liquids, 2007

hoy conocida como Ley de Newton de la viscosidad, donde la constante de proporcionalidad η es la viscosidad [Pa·s] del fluido⁷:

$$\underbrace{\tau}_{\text{Shear Stress}} = \underbrace{\eta}_{\text{Viscosity}} \times \underbrace{\dot{\gamma}}_{\text{Shear Rate}}$$

La viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre. Ejemplos característicos de fluidos Newtonianos son la glicerina y el agua. Para la glicerina, por ejemplo, la viscosidad tiene una magnitud de 1000 mPa·s aproximadamente, en cambio para el agua la viscosidad vale 1 mPa·s, es decir, es mil veces menos viscosa que la glicerina.

Por lo tanto, como la viscosidad de un fluido es sensible a la temperatura, la medición de temperatura debe ser muy precisa a fin de mantener una buena medición de viscosidad. Un 0,1°C de desviación en la temperatura, puede generar más del 2% de error en la medición de viscosidad. Un incremento de temperatura le da más libertad a las moléculas para moverse entre ellas (en el caso de líquidos) y como consecuencia la resistencia al flujo es reducida.⁸

Tabla 3. Datos de viscosidad para varias sustancias a 20°C, adaptada de Barnes et al. (1989).

Sustancia	Viscosidad (mPa.s)
Aire	0,02
Agua	1
Jet A1	10
Crudo 25° API	100
Glicerina	1000

⁷ BLOOMER, J.J., Practical fluid mechanics for engineering applications. Marcel Dekker Inc, Pennsylvania, 2000

⁸ OLIVIER Réglat. Measuring oil viscosity in pipelines – Not easy since it's often non-newtonian., [en línea] [citado en Octubre 18, 2012] disponible en: <http://vionectechnologies.wordpress.com>;

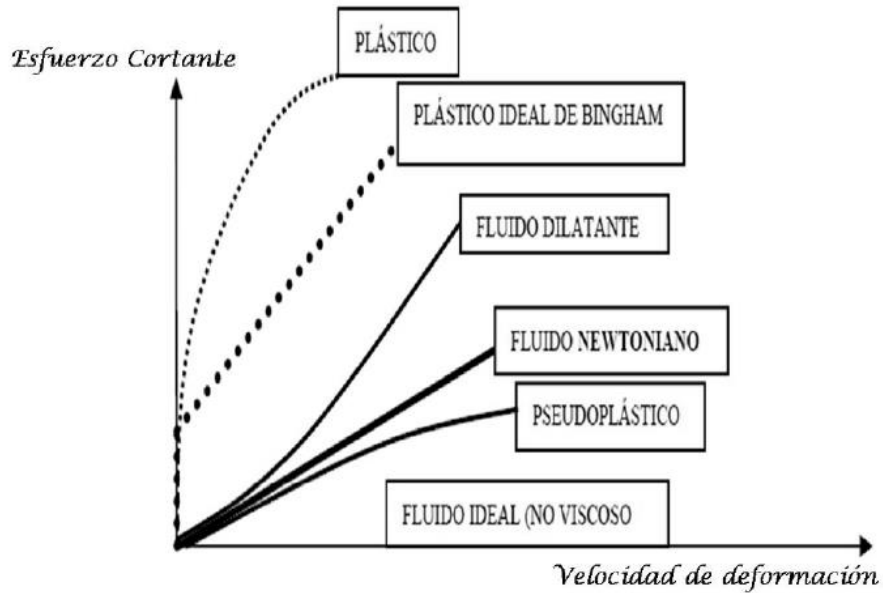
Sustancia	Viscosidad (mPa.s)
Miel	10000
Crudo 8° API	500000
Asfalto	10^{11}
Vidrio fundido (500°C)	10^{15}
Vidrio	10^{43}

Los fluidos no newtonianos son aquellos cuya relación esfuerzo de corte y gradiente de deformación no es lineal y pueden ser clasificados como dependientes e independientes del tiempo. En el último caso y dependiendo de cómo varía la viscosidad aparente con la tasa de deformación el comportamiento se puede caracterizar como:

- Pseudoplástico: la viscosidad aparente disminuye con la velocidad de deformación.
- Fluido dilatante: la viscosidad aparente aumenta con la velocidad de deformación.
- Fluido plástico: exhibe el llamado esfuerzo umbral o esfuerzo de fluencia, se debe aplicar cierto esfuerzo para que ocurra el flujo.⁹

⁹ ROJAS O. et al, Fundamentos de la reología, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2012.

Figura 9. Clasificación de los fluidos



Fuente: Adaptado de GRAY, G. R., DARLEY, H. C. H., & ROGERS, W. F. Composition and properties of oil well drilling fluids. Houston: Gulf Pub. Co., Book Division. 1980

Fue justamente estos comportamientos de algunos fluidos como los anteriormente descritos, que no cumplían con la relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación lo que llevó a muchos investigadores a determinar las diferentes relaciones entre el esfuerzo y la deformación y qué tan distantes o tan cercanos estaban del comportamiento de corte para líquidos Newtonianos.

Estas investigaciones condujeron a lo que hoy conocemos como la reología; la reología es una disciplina científica que se dedica al estudio de la deformación y flujo de la materia¹⁰; su objetivo está restringido a la observación del comportamiento de materiales sometidos a deformaciones muy sencillas¹¹. Por medio de la observación y del conocimiento del campo de deformación aplicado, el reólogo puede, en muchos casos, desarrollar una relación constitutiva o modelo

¹⁰ BIRD, R.B., W.E. STEWART & E.N. LIGHTFOOT. Transport phenomena. 2a ed., John Wiley & Sons, 2002

¹¹ DARBY, R. Chemical Engineering Fluid Mechanics. En cap. 1-2, Marcel Dekker, Inc. New York, 1996.

matemático que permite obtener, en principio, las funciones materiales o propiedades que caracterizan el material.

El primero en escribir sobre la reología propiamente dicha fue Robert Hooke en 1678 en su libro “Verdadera teoría de la elasticidad”, Dicha teoría se resumía en lo siguiente: “Si se duplica la tensión, se duplica la deformación para materiales en estado sólido”. Nueve años después, Isaac Newton publicó en “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” una hipótesis asociada al estado simple de cizalladura (o corte): “La resistencia derivada de la falta de deslizamiento de las partes de un líquido es proporcional a la velocidad con que se separan unas de otras dentro de él”. Este deslizamiento es lo que ahora se denomina “Viscosidad dinámica o molecular”, sinónimo de fricción interna. Dicha viscosidad es una medida de la resistencia a fluir.¹²

Ahora bien, en el tema que nos compete, que son los parámetros reológicos de fluidos derivados del petróleo, éstos son importantes para el diseño de sistemas de transporte, en el control de calidad de crudos pesados y en la producción de asfaltos y combustóleos. A pesar de la demanda de parámetros reológicos de crudos como una función de composición, sólo un número limitado está disponible para fluidos pesados ricos en resinas y asfáltenos. El enfoque de la mayoría de los autores es en el efecto de sólo un parámetro; normalmente la presión o la temperatura (Evdokimov et al.,1999)¹³.

Y es justamente debido a esa importancia y al gran impacto económico en la industria del petróleo que se han sugerido y desarrollado un número alternativo de

¹² RAMÍREZ N., Juan Sebastián. Introducción a la reología de los alimentos. Revista ReCiTeIA, 2006, Cali, Colombia.

¹³ EVDOKIMOV, I. N and ELISEEV, N. Y. Characteristics of Viscous Flow of Liquid Media with Resines and Asphaltenes. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, vol. 35, N° 6, 1999, pp. 377-381.

modelos reológicos, por diversos autores como Taylor (1973)¹⁴, Robertson-Stiff (1975)¹⁵, Ganivet-Wick (1987), Bayley (1996) y Al-Zharani (1997), con los que se pretende proporcionar la caracterización de fluidos en un rango mayor y más amplio de esfuerzos cortantes. A pesar de su impacto, los efectos de estos modelos han tenido una limitada aceptación en la industria, principalmente por la complejidad de la obtención de los parámetros reológicos y por la incertidumbre asociada con la selección apropiada de las lecturas para los viscosímetros rotacionales usados en la obtención de estos parámetros.

Varios autores han desarrollado modelos empíricos que describen la curva de flujo de diversos materiales (Barnes, 1989; Al-Zahrani, 1997)¹⁶. Un modelo reológico que representa el comportamiento lineal entre el esfuerzo/velocidad, a bajas velocidades de corte, es el modelo de plástico de Bingham de dos parámetros, el esfuerzo de cedencia y la viscosidad aparente (Bingham, 1916).

Este trabajo de aplicación, busca justamente describir el comportamiento reológico, a dos temperaturas, de los componentes y productos en la preparación de combustóleo pesado y liviano con diferentes porcentajes de fondos de vacío y determinar si existe en estos últimos un comportamiento no newtoniano que permita establecer una posible afectación en la medición de viscosidad cinemática en los analizadores en línea.

¹⁴ TAYLOR, R. and SMALLING, D., A New and practical Application of Annular Hydraulics. : Annual fall meeting of the SPE of AIME, Las Vegas, NV, Sep 30 a Oct 3, 1973.

¹⁵ ROBERTSON, R and STIFF, H. An improved Mathematical Model for Relating Shear Stress to Shear Rate in Drilling Fluids and Cement Slurries. SPE 5333, Soc. Petrol. Eng., vol 16, No. 1, 1976, pp. 31-36.

¹⁶ BARNES, H.A; HUTTON J.F and Walters K. An Introduction to Rheology: Elsevier, Amsterdam, 1989, pp. 199.

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de los fondos de vacío sobre el comportamiento reológico de slurries y combustóleo preparados en la GRB, y sus posibles incidencias en la confiabilidad de viscosímetros en línea del sistema de mezclas de combustóleo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una caracterización reológica de slurries y combustóleos preparados con las concentraciones iniciales de diseño de la planta de preparación de combustóleos de la GRB.
- Realizar la caracterización reológica de los slurries y combustóleos preparados en la GRB incluyendo proporciones típicas de fondos de vacío usadas actualmente a 122 y 170 °F.
- Determinar si posibles cambios en el comportamiento reológico del slurry tienen incidencia en la pérdida de confiabilidad de los viscosímetros en línea usados en el sistema de preparación de combustóleo de la GRB y plantear alternativas de solución.

4. METODOLOGÍA

Este capítulo está dedicado a describir el conjunto de actividades que se desarrollaron para conocer, explicar y concluir sobre los comportamientos observados en las variables analizadas.

Las pruebas de reología fueron desarrolladas en Laboratorio de Investigaciones de la UIS en el Parque Tecnológico de Guatiguará y en el laboratorio de la GRB. Los objetos de estudio fueron muestras de slurry, aceite liviano de ciclo, fondos de viscorreductora y combustóleos liviano y pesado producto que hacen parte del sistema de mezclado.

Las variables principales a estudiar son la viscosidad y/o esfuerzo cortante como función de la velocidad de deformación a partir de las cuales se puede determinar el comportamiento reológico de los combustóleos.

Cada análisis reológico fue realizado con una muestra nueva de aproximadamente 10 g para cada uno de los componentes y productos por separado; manteniendo una temperatura de 122°F en el primer análisis y posteriormente con otra muestra a una temperatura de 170°F cumpliendo con el estándar de la norma ASTM D445. La velocidad de deformación usada está en el rango de 0 hasta 100 s⁻¹. El sistema se dejó estabilizar durante 10 minutos para alcanzar la temperatura requerido para el análisis.

4.1 REVISIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA DE VISCOSÍMETRO EN LÍNEA.

Se realizó una detallada revisión de los manuales del viscosímetro, que comprendió desde su principio de funcionamiento, límites de operación e instalación hasta la revisión de las mejores prácticas y recomendaciones del fabricante para realizar las calibraciones en sitio.

4.2 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO COMPONENTES COMBUSTÓLEO.

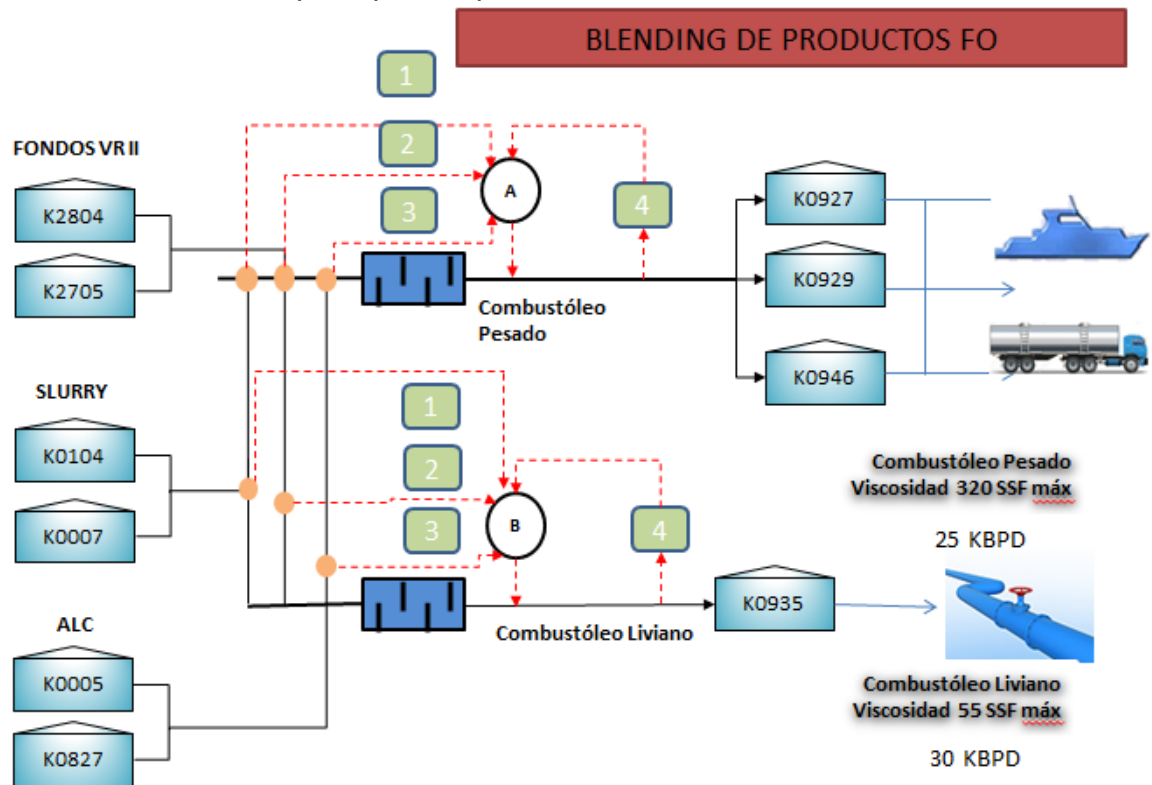
El criterio utilizado para definir las mezclas a caracterizar fue la concentración de fondos de vacío en el slurry, desde el caso base (sin fondos de vacío), hasta valores cercanos a los 20 kbpd de fondos de vacío desviados hacia las mezclas de combustóleo, equivalente al 18% en volumen de la mezcla total.

Las muestras no fueron preparadas en laboratorio debido al riesgo que se corre al tomar y manipular muestras de fondos de vacío por las altas temperaturas (+/- 400°F) en sistemas que no tienen concebidos ni instalados los toma muestras especiales requeridos para tal fin; por esa razón las muestras de slurry más fondos de vacío se tomaron del tanque al cual llegan y se mezclan, a una temperatura menor (aproximadamente, 200°F) y con sistemas de muestreo acondicionados para tal fin. Este mismo procedimiento se aplicó para todas las muestras que fueron tomadas en línea antes de entrar al mezclador estático donde se unen las 3 corrientes (ALC, slurry y Fondos VRII) para formar el combustóleo. Esto implicó, la configuración de tuberías, válvulas y bombas que permitirán pasar por el viscosímetro en línea cada una de las corrientes de manera individual; y proveyendo el tiempo suficiente (10min) para que los valores de viscosidad arrojados por el viscosímetro en línea se estabilizara.

Se tomó una muestra de cada componente y producto en cada mezcla en la cantidad de un litro y cada muestra se dividió 2 en botellas de 500 mL, una para realizar la analítica en el laboratorio de la refinería de Barrancabermeja y otra para los ensayos reológicos en la UIS de la Guatiguará. En los laboratorios de la GRB fueron tomadas medidas de densidad a 60°F, gravedad API, viscosidad cinemática a 122°F y conversión a SSF a 122°F.

Figura 10. Sistema de preparación de combustóleos pesados y livianos.

La línea roja corresponde a arreglo de válvulas para poder pasar muestras de componentes puros por el viscosímetro en línea. Los círculos A y B representan los viscosímetros en línea. Los puntos naranjas corresponden a los puntos de desvío desde la línea principal del producto hacia el viscosímetro en línea.



Cada una de las muestras de componentes y productos se tomó en el mismo punto (A y B figura 10), el cual está ubicado en el sistema acondicionado para la toma de las muestras en la estructura donde están instalados los viscosímetros en

línea. En la Figura 10 se marcan los puntos (1) Fondos VRII, (2) Slurry, (3) Aceite liviano de ciclo y (4) Combustóleo Producto.

Para cada uno de los dos productos finales (combustóleo liviano y pesado), se escogieron 3 mezclas, donde se cambiaba principalmente el contenido del componente SLURRY. A continuación, se describen cada una de las mezclas y se resumen al final en la tabla 4.

1. **Mezcla # 1, producto Combustóleo Pesado:** El desvío de fondos de vacío hacia slurry fue de 7 kbpd aproximadamente, provenientes de la unidad de destilación al vacío identificada como U150, lo que corresponde a un 12% del volumen de mezcla total. Es de resaltar que en la refinería se produce un volumen diario de slurry de 13 Kbpd aproximadamente.
2. **Mezcla # 2, producto Combustóleo Pesado:** El desvío de fondos de vacío hacia slurry fue de 12 Kbpd aproximadamente, conformado por fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como U150, más 5 Kbpd de fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como U2100, conformando un 13% del volumen de mezcla total.
3. **Mezcla # 3, producto Combustóleo Pesado:** El desvío de fondos de vacío hacia slurry era de 20 Kbpd aproximadamente, conformado por 7 Kbpd de fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como U150, más 13 Kbpd de fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como U2100, conformando un 18% del volumen de mezcla total.
4. **Mezcla # 4, producto Combustóleo Liviano:** El desvío de fondos de vacío hacia slurry era de 7 Kbpd aproximadamente, conformado por fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como U150, conformando un 8% del volumen de mezcla total.

5. **Mezcla # 5, producto Combustóleo Liviano:** El desvío de fondos de vacío hacia slurry era de 4 Kbpd aproximadamente, conformado por fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como U150, conformando un 4% del volumen de mezcla total.
6. **Mezcla # 6, producto Combustóleo Liviano:** Durante una semana no se habían hecho desvíos de fondos de vacío hacia slurry, lo que se asemeja a las condiciones del caso base cuando esta condición de desvíos no se presentaba y el componente era solo slurry.

Tabla 4. Composiciones de las mezclas.

Mezcla	PRODUCTO	Fondos VR II % v/v	Fondos Vacío % v/v	Slurry % v/v	ALC % v/v
1	HFO	64	12	23	1
2	HFO	67	13	14	6
3	HFO	64	18	12	6
4	LFO	55	8	15	22
5	LFO	60	4	13	23
6	LFO	63	0	14	23

4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS COMPONENTES Y PRODUCTOS

4.3.1 Medidas de viscosidad y densidad en línea y en el laboratorio GRB A cada una de las muestras de los componentes que conforman los combustóleos pesados y livianos se les realizó medidas de gravedad API y densidad a 60°F usando la norma ASTM D1298, viscosidad cinemática a 122°F por el método ASTM D 445. Posteriormente, se obtiene la viscosidad SSF (Segundos Saybolt Furor) a partir de la viscosidad dinámica y el valor de la densidad. Esto teniendo en cuenta que la viscosidad SSF a 122°F es el dato oficial de calidad en viscosidad para la entrega del producto a los clientes finales y el principal

parámetro de control de los analizadores en línea. Para esta última se midieron viscosidades en el laboratorio de la GRB, así como en el sistema de analizadores en línea. Por otro lado, se debe aclarar, que el viscosímetro tiene la capacidad de medir la densidad la cual usa para cambiar de viscosidad dinámica a viscosidad cinemática. Sin embargo, debido a que el valor de densidad arrojado por el viscosímetro en línea no es muy preciso, se optó por poner un densitómetro aguas arriba del viscosímetro el cual da un valor de la densidad más confiable y lo usa el viscosímetro como dato de entrada.

4.3.2. Evaluación de la reología de Combustóleo sin Fondos de vacío. Se utilizaron combustóleos livianos (fondos de unidad viscorreductora 63%, slurry 14% y aceite liviano de ciclo 23%) en proporciones iguales a las de diseño de la planta de mezclado y de selección de los viscosímetros en línea, es decir sin adición de fondos de vacío que son mostradas en la Tabla 4. El fin de esta actividad fue obtener una línea base de comportamiento reológico del combustóleo preparado.

4.4 FACTORES QUE PODRÍAN AFECTAR EL COMPORTAMIENTO DEL VISCOSÍMETRO EN LÍNEA

Después de realizar una detallada revisión del manual del equipo, fue determinado cuáles factores pueden afectar negativamente la precisión y la repetibilidad del viscosímetro. Estos factores son nombrados a continuación y también se da una breve explicación de porqué dicho factor puede o no, estar siendo generador de baja precisión o repetibilidad.

- *La presencia de gas o burbujas en el fluido que se está midiendo:* Este factor puede ser eliminado como causante de la problemática, teniendo en cuenta que el montaje del viscosímetro fue hecho teniendo en cuenta las recomendaciones del

fabricante. Esto evita la generación de burbujas por la cavitación de la bomba, o flujo discontinuo sobre el sensor del viscosímetro.

- La falta de uniformidad del fluido: En este punto es importante resaltar que la unidad de mezclado para producir combustóleo tiene un mezclador estático, el cual se asume da un fluido uniforme y correctamente homogeneizado. Sin embargo, un estudio sobre la efectividad de este equipo es recomendable.

- La presencia de sólidos como contaminantes: Aquí se resalta que, de todos los componentes de los combustóleos livianos y pesados, solo el Slurry presenta partículas metálicas de catalizador arrastradas desde las unidades de cracking. La composición típica del slurry es presentada en la Tabla 5 de donde se muestra los diversos metales que tienen estas muestras y la variabilidad en la cantidad de estos sólidos en el tiempo. En la Tabla 6 se muestra la distribución de tamaño de partículas del Slurry con un tamaño de partículas menor a 60 micras y una concentración de aproximadamente 0,1% en volumen del total de la mezcla que es caracterizado en el producto final como agua y sedimento (BSW) en el combustóleo. No obstante, el bajo contenido de sólidos, se tomaron en cuenta las recomendaciones del fabricante que indican que el flujo debe llegar al sensor de forma horizontal y salir verticalmente hacia abajo para reducir el impacto de los sólidos en suspensión.

Tabla 5. Composición típica del slurry

RESULTADOS SLURRY			
Análisis	Unidades	20/10/16	19/06/15
AGUA Y SEDIMENTO EN COMBUSTOLEO	% Volumen	0.1 (sedimentos)	0.9 (sedimentos)
AZUFRE	% Peso	1,626	1,258
DENSIDAD DIGITAL D 4052	g/mL	1,0399	1,0884
GRAVEDAD API	GR API	4,5	-1,6
RESIDUO CARBON MICRO	% Peso	6,24	8,14

RESULTADOS SLURRY			
Análisis	Unidades	20/10/16	19/06/15
INSOLUBLES EN n-C7	% Peso	1,61	1,88
SODIO	mg/kg	5,313	27,57
VANADIO	mg/kg	1,322	29,27
NIQUEL	mg/kg	1,201	16,34
ALUMINIO	mg/kg	66,07	375
SILICIO	mg/kg	49,6	387
CENIZAS	%peso	0,05	0,0783
PUNTO DE FLUIDEZ PROD.PETROLEO D 97	GR C	0	9
PUNTO INFLAMACION COPA ABIERTA D 92	GR C	83	92
VISCOSIDAD CINEMATICA 100 GR C D 445	mm2/s	11,8	39,1
VISCOSIDAD CINEMATICA 50 GR C D 445	mm2/s	144,5	757,9

Tabla 6. Distribución tamaño de partícula

Distribución tamaño de partícula, micras		
5%	Micras	1
10%	Micras	1,6
20%	Micras	3,7
50%	Micras	22,8
70%	Micras	30,8
90%	Micras	44,5
100%	Micras	76,3

- El ensuciamiento del transductor: Se tiene asegurada como práctica operacional que antes de finalizar la preparación de combustóleo en cualquiera de los dos productos, se debe realizar una limpieza con diluyente a todo el sistema de líneas de succión y descarga de las bombas del sistema de acondicionamiento de muestras, a los viscosímetros y los densitómetros. El flujo de diluyente se suspende cuando la lectura en la señal del analizador al sistema de control

distribuido (DCS, de sus siglas en inglés), esté acorde a la viscosidad del diluyente que está alrededor de los 3 SSF a 122°F.

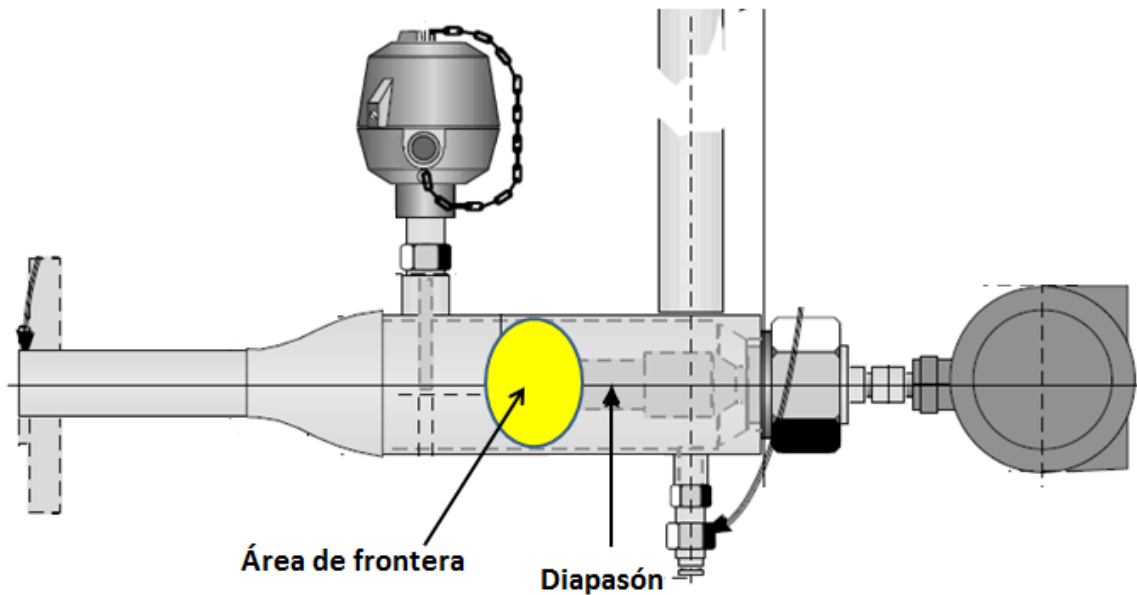
- Los gradientes de temperatura: Debido a que el sistema de mezclado de combustóleo no tiene tiempos muertos y los tanques de componentes están permanentemente en operación, la temperatura en todo el sistema de mezclado tiende a ser muy estable con pequeñas diferencias de temperatura que se dan especialmente por agentes externos como la lluvia; por lo tanto, ésta es una condición que no afecta la confiabilidad de la medición de los analizadores.

- La variación de la velocidad de flujo: Para evitar esto, se instaló en el sistema de acondicionamiento de muestras una bomba de desplazamiento positivo dedicada para cada uno de los componentes y productos; estas bombas operan al flujo recomendado por el fabricante que, para el caso del analizador de viscosidad liviano, es de 6-8 gpm y la del analizador de viscosidad pesado de 12-16 gpm; más una bomba de relevo común para mantener un flujo constante hacia los analizadores en línea y evitar distorsiones por esta condición.

- El fluido medido es representativo de la corriente principal: El fluido de mezcla es tomado de las tuberías principales que son de 10", 8" y 6" y llevados al área de bombas por tuberías de 1 ½". Para extraer la muestra de producto hacia el viscosímetro se insertó en cada una de las líneas (10", 8" y 6") de una sonda tipo pitot con un corte transversal a 45° y con cara a la corriente en el sentido del flujo para asegurar que el fluido que llegue a los analizadores sea totalmente representativo de lo que está pasando por cada línea. Esto suponiendo que el mezclador estático ha cumplido su función.

- Los efectos de frontera que inciden sobre la región de medición efectiva del transductor: Esto se asegura con la instalación tipo "cámara" que es recomendada por el fabricante y se puede ver en la figura 11.

Figura 11. Instalación tipo “cámara” para evitar efectos de frontera.



Los factores que pueden afectar negativamente a la pertinencia de las medidas podrían incluir:

- Las medidas de viscosidad usadas para los ajustes del control se hacen demasiado lejos del punto de control, por lo que el sistema no puede responder adecuadamente a los cambios. Para contrarrestar este problema, se calculó un tiempo de 90 segundos desde el momento en que se hace un cambio en la proporción de los componentes del combustóleo, hasta cuando se refleja la variación de viscosidad en el analizador; tiempo de respuesta adecuado para preparaciones de mezcla que en condiciones normales duran más de 24 horas y permite realizar ajustes adecuados para asegurar la calidad del producto final.
- Las mediciones realizadas en el fluido que no son representativas del flujo principal.

Debido a que las instalaciones requeridas para asegurar un correcto funcionamiento y operación de los analizadores se realizaron siguiendo los lineamientos y recomendaciones del fabricante, los factores anteriores fueron cubiertos y asegurados con un sistema robusto y adecuado que permite un flujo constante de muestra representativa, sin cavitaciones ni burbujeos y las tomas del producto son posteriores a la salida del mezclador estático, lo cual asegura una adecuada homogenización de la mezcla y, con ello, las variables requeridas.

4.5 FUNCIONAMIENTO DE VISCOSÍMETROS DE VIBRACIÓN

Existen en el mercado múltiples tecnologías para la medición de vibración, pero nos enfocaremos en el tipo que es objeto de este estudio: el viscosímetro de vibración de diapasón o tenedor (fork) y en describir como realiza el cálculo de la viscosidad.

4.5.1 Principio de medición para los viscosímetros con diapasón La vibración amortiguada de un resorte en un líquido está controlada por la fuerza restauradora del resorte y la resistencia viscosa del líquido. Con base en esta idea, por medio de una ecuación diferencial es posible representar las características de la vibración amortiguada, que se integra a continuación para obtener una resistencia viscosa. Esta resistencia viscosa se utiliza entonces para calcular el valor de viscosidad. La fórmula que expresa este principio es una ecuación de movimiento lineal que involucra la fuerza de inercia debido a la masa del oscilador, la fuerza restauradora del resorte y la fuerza de amortiguación debido a la resistencia viscosa. Basándose en la solución de la ecuación, se podría deducir que el producto de viscosidad y densidad regula el amortiguamiento. Cuando el oscilador se hace vibrar a la frecuencia f , la impedancia mecánica R_z que recibe el oscilador del líquido será:

$$R_z = A\sqrt{\pi f \eta \rho}$$

En esta ecuación, **f** es la frecuencia de vibración (Hz), **A** es las dimensiones planas de ambos lados del oscilador en el líquido, η es la viscosidad del líquido y ρ es la densidad del líquido. Entonces, si la fuerza por la cual la unidad motriz electromagnética da al oscilador la velocidad de vibración constante $Ve^{i\omega t}$ es F, la siguiente ecuación es válida:

$$R_z = \frac{F}{Ve^{i\omega t}} = A\sqrt{\pi f \eta \rho}$$

Así que, es evidente que la fuerza generada en la unidad de accionamiento electromagnética para mantener la amplitud constante del oscilador contra la resistencia viscosa es proporcional al producto de la viscosidad η y la densidad ρ ; Es decir, la "viscosidad cinemática".¹⁷

4.5.2 Ecuaciones para el cálculo de viscosidad El factor de calidad (Q) del resonador es una función de la amortiguación impuesta en el resonador por la amortiguación interna del material del diapasón y la viscosidad del fluido circundante. Por lo tanto, como la viscosidad de los fluidos cambia, las fuerzas globales de amortiguación cambian y con ella el valor de Q. Mediante la medición de los períodos de tiempo A y B, y la aplicación de las ecuaciones siguientes, *la viscosidad de un fluido newtoniano se puede calcular*¹⁸.

$$Q = 1 / [(\tau_A / \tau_B)^{0.5} - (\tau_B / \tau_A)^{0.5}]$$

¹⁷ NAOTO Izumo, and ATSUSHI Koiwai; Technological Background and Latest Market Requirements concerning "Static Viscosity" Measurement with a Tuning-fork Vibration Viscometer; June 1-4, 2009, Tokyo, Japan.

¹⁸ SOLARTRON MOBREY. Technical Manual No. 78275003. 7827 Viscometer.

Dónde:

Q: Factor de calidad del transductor (adimensional)

τ_A Periodo de tiempo A del transductor (μs)

τ_B Periodo de tiempo B del transductor (μs)

El factor de calidad del diapasón es proporcional a la raíz cuadrada inversa de la viscosidad. Para calibrar el resonador contra la viscosidad del fluido, la siguiente expresión es utilizada:

$$\eta = V * (V_0 + V_1 * X + V_2 * X^2)$$

Dónde:

η : Viscosidad dinámica del fluido (cP)

V: Factor de escala de la viscosidad dinámica (1=cP)

X: $1/Q^2$ (inverso de la raíz del factor de calidad)

V_0, V_1, V_2 : Coeficientes de calibración del transductor para cada rango calibración.

Debido a que los viscosímetros utilizan como dato de entrada la densidad del fluido ensayado para realizar la conversión de viscosidad dinámica a viscosidad cinemática, fue instalado un densitómetro que proporcione datos más confiables que los generados por el viscosímetro.

4.5.3 Ecuaciones para el cálculo de densidad Para determinar la densidad del fluido, el menor de los periodos de tiempo es tomado τ_B y utilizado en una serie de ecuaciones para calibrar contra la densidad actual del fluido determinada por una transferencia de los estándares primarios.

El periodo de tiempo de un resonador es proporcional al cuadrado de la raíz de la densidad. Para calibrar el resonador contra la densidad del fluido, la siguiente ecuación cuadrática es utilizada:

$$\rho_u = K0 + K1*\tau_B + K2*\tau_B^2$$

Dónde:

ρ_u : Densidad del fluido (kg/m³)

τ_B : Periodo de tiempo B, del transductor (μ s)

K0, K1, K2: Coeficientes de la calibración del transductor

La calibración tiene lugar a 20°C y 1bar.

4.5.3 Cálculo de la viscosidad cinemática Teniendo los datos de viscosidad dinámica y la densidad, el analizador puede ahora determinar la viscosidad cinemática la cual es utilizada en la operación y ajustes de los sistemas de control para el aseguramiento de la calidad final para los combustóleos producto.

$$v = U * 1000 * [(\eta / V) / (\rho / K)]$$

Dónde:

v: Viscosidad cinemática del fluido (cSt)

U: Factor de escalamiento de la viscosidad cinemática (1=cSt)

η : Viscosidad dinámica del fluido

V: Factor de escalamiento de la viscosidad dinámica

ρ : Densidad del fluido

K: Factor de escalamiento de la densidad

La ecuación incluye los factores de escalamiento de la viscosidad cinemática y la viscosidad dinámica para asegurar que la viscosidad cinemática siempre sea

calculada en cSt. Este resultado es luego escalado por el factor de escalamiento de la viscosidad cinemática (U) para escalar el resultado y mostrarlo en otras unidades de viscosidad cinemática.

4.5.4 Rangos de viscosidad Por su diseño, los viscosímetros se pueden configurar desde fábrica para una medición más precisa en 4 rangos de viscosidad que se definen de acuerdo a las condiciones de proceso en el cual va a ser utilizado. Estos rangos son:

Ultra-bajo: 0,5 – 10 cP

Bajo: 1 – 100 cP

Medio: 100 – 1000 cP

Alto: 1000 – 20000 cP

Independiente del rango de viscosidad en que se opere el equipo, el viscosímetro siempre arrojará un resultado, sin embargo, la precisión de estos datos dependerá en gran parte de que las viscosidades de los productos estén dentro del rango adecuado. *En el caso de los viscosímetros en línea usados en el sistema de preparación de combustóleos, están configurados para el rango medio, es decir, para viscosidades de 100 a 1000 cP.* Es importante mencionar que la última calibración completa del viscosímetro fue realizada en el 2014. Para poder cargar nuevos valores de las matrices de viscosidad y densidad para calibración se debe contar con el certificado de calibración que es generado durante ese proceso y que se puede ver en el anexo 1.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES Y PRODUCTOS

Para el análisis de resultados en estudios reológicos en la industria se utilizan relaciones matemáticas que permitan caracterizar la naturaleza reológica de un fluido y son conocidos como modelos reológicos, siendo los más utilizados los conocidos como “modelo de plástico de Bingham” y el “modelo de Ley de Potencia”; los cuales basan su popularidad en la simplicidad de las ecuaciones de flujo y la facilidad para calcular los parámetros involucrados. Para nuestro análisis de resultados utilizamos este último, en el cual la viscosidad absoluta disminuye a medida que la velocidad de deformación aumenta. La relación entre la velocidad de deformación y el esfuerzo cortante está dada por la siguiente ecuación:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

Donde τ = esfuerzo cortante

K = viscosidad absoluta

$\dot{\gamma}$ = velocidad de deformación

n = adimensional

No existe un término para el punto de cedencia por tanto bajo este modelo los fluidos comienzan a fluir a una tasa de corte cero.

En la Tabla 7, se muestran los valores de viscosidad y densidad del combustóleo liviano y sus componentes, medidos en el laboratorio de la refinería y los medidos con el viscosímetro y densitómetro en línea. Estos corresponden al caso base, es

decir sin fondos de vacío. Adicionalmente, se muestra el porcentaje de desviación entre ambos métodos. Es necesario aclarar que el viscosímetro en línea da valores en SSF, por tanto los valores de viscosidad cinemática del viscosímetro reportados en la Tabla 7 fueron obtenidos a partir del mismo valor.

Tabla 7. Resultados análisis GRB Caso Base (sin fondos de vacío). Las medidas fueron tomadas con el viscosímetro de combustóleo liviano.

#CORRIDA	MUESTRA	Análisis	Resultado Laboratorio	Resultado Viscosímetro	Desviación
C A S O	COMBUSTOLEO LIVIANO PRODUCTO k0935	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1003,2	977,0	2,6%
		GRAVEDAD API	9,5	10,2	-7,7%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	101,2	105,4	-4,2%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	49,1	51,2	-4,2%
	FONDOS VR II k2804	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1016,4	979,0	3,7%
		GRAVEDAD API	7,6	8,5	-11,7%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	1369,6	1195,0	12,7%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	646,0	563,9	12,7%
B A S E	SLURRY k0104	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1055,9	1026,0	2,8%
		GRAVEDAD API	2,4	3,1	-28,3%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	211,9	188,0	11,3%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	100,0	88,6	11,4%
E	ALC k0005	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	932,4	908,0	2,6%
		GRAVEDAD API	20,1	20,1	0,2%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2,3	2,4	-3,0%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	3,5	3,6	-2,9%

Puede ser observado de los resultados de la Tabla 7 que las desviaciones halladas en la medida de viscosidad por los dos métodos son de -4.2% cumpliendo con la reproducibilidad del viscosímetro en línea que es del orden de +/- 5% para el combustóleo liviano producto. Sin embargo, las desviaciones entre ambos métodos para los fondos VR II y el slurry incrementan hasta 12,7% y 11,4% respectivamente. Así mismo, los valores de densidad reportada para el producto y al igual que los componentes, las desviaciones están todas entre 3,7% y 2,7% siendo estas diferencias aceptables dentro de la reproducibilidad de los métodos. Esta afectación y mayor desviación del slurry y los fondos VR II pueden estar relacionados con el método para la medición de viscosidad en la coordinación de

calidad de la GRB que utiliza viscosímetros capilares de acuerdo al estándar de la norma ASTM D445 que es específico para fluidos con comportamiento newtoniano, libres de partículas y sólidos en suspensión, y que como se observó en las tablas 5 y 6, estos componentes contienen metales y sedimentos que pueden generar alteraciones en los resultados.

Tabla 8. Composición mezcla Caso base y comparativo de resultados Reómetro vs Laboratorio GRB y Reómetro vs Analizador. Todas las viscosidades fueron medidas a 122°F

CASO BASE	LFO	FONDOS VRII	SLURRY	ALC
% V/V en mezcla		63,0	14,0	23,0
Viscosidad Laboratorio (SSF)	49,1	646,0	100,0	3,5
Viscosidad Analizador (SSF)	51,2	563,9	88,6	3,6
Viscosidad Reómetro (SSF)	46,9	673,4	73,1	2,4
Diferencia Reómetro vs Laboratorio GRB	-4,6%	4,1%	-36,8%	-45,4%
Diferencia Reómetro vs Analizador	-9,1%	16,3%	-21,2%	-49,6%

En la Tabla 8 se muestran los resultados de las mediciones de viscosidad por los tres métodos: laboratorio, viscosímetro en línea y reómetro con el fin de determinar las desviaciones entre ellos. Se decidió utilizar como referencia el valor de viscosidad obtenido con el reómetro. La primera desviación registrada es la del reómetro vs las medidas obtenidas en el laboratorio de la GRB con diferencias aceptables para el combustóleo liviano producto y los fondos VRII siendo la mayor desviación para la del viscosímetro en línea. No obstante, las desviaciones obtenidas para el slurry mostraron una diferencia importante de 36.8% y 21.2% entre reómetro vs laboratorio y reómetro vs analizador en línea respectivamente. En este punto hay que mencionar que se esperaba que existiera una mayor desviación entre los datos del reómetro y los del viscosímetro en línea; sin embargo, el resultado fue contrario, indicando que el método para medir la

viscosidad del Slurry en el laboratorio de la GRB (tubo capilar) puede no ser el más adecuado.

Al comparar las desviaciones entre el reómetro y el analizador, todas las diferencias se encuentran fuera del rango de precisión, siendo la de menor valor la del producto final con -9,1% y mostrando así oportunidades de calibración en el analizador en línea.

Este mismo grupo de muestras se llevaron al reómetro para realizar curvas de flujo con el fin de determinar el tipo de comportamiento reológico del caso base o diseño original del sistema. En las figuras 12 y 13 se muestran los resultados del análisis reológico para cada uno de los componentes y la mezcla producto a 122°F.

Figura 12. Caso base LFO a 122°F, Viscosidad contra Velocidad de deformación

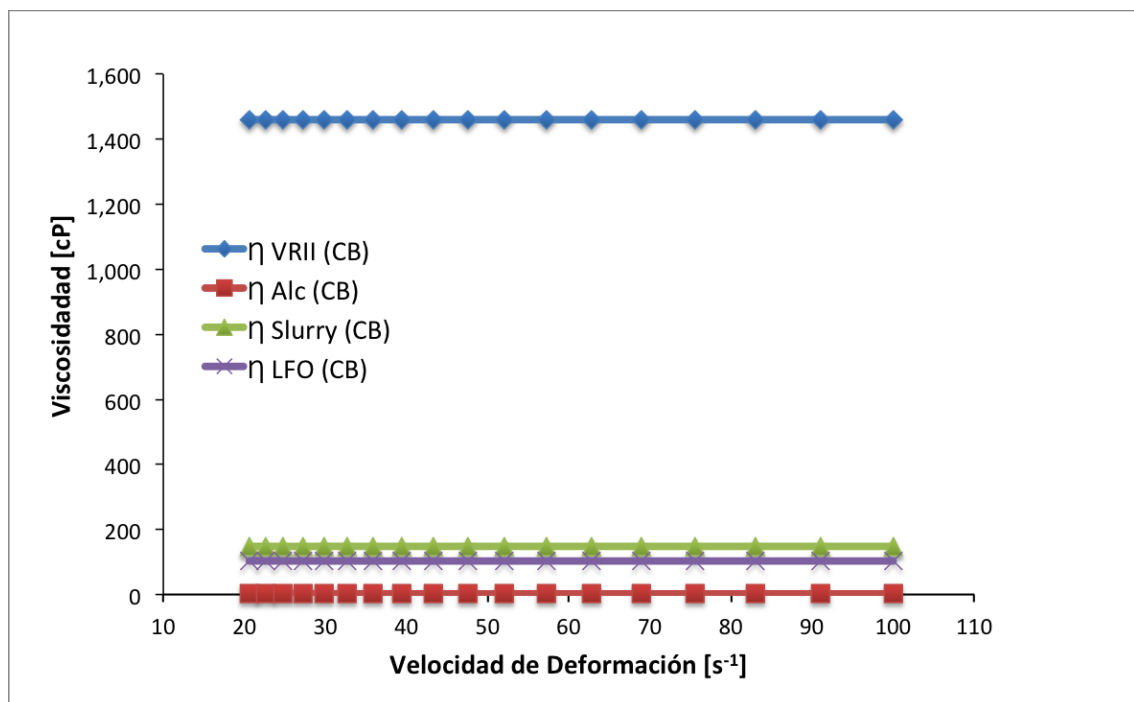
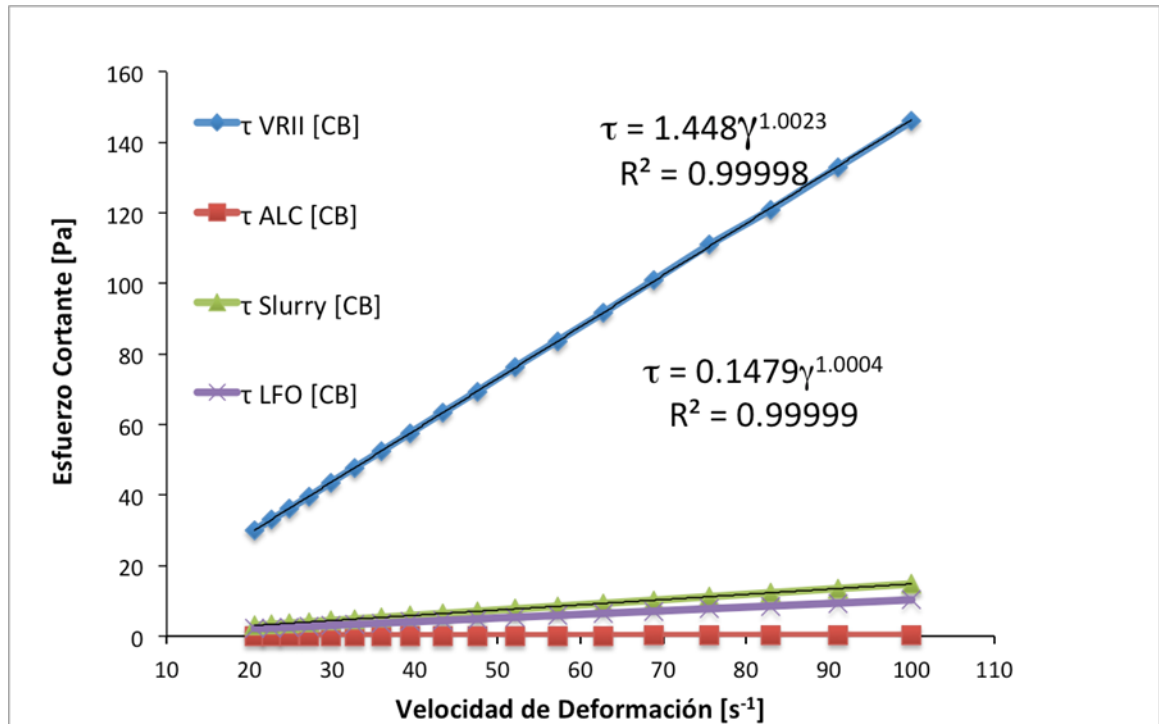


Figura 13. Caso base LFO a 122°F, Esfuerzo cortante contra Velocidad de deformación



Las tendencias de las gráficas de viscosidad y esfuerzo cortante contra velocidad de deformación son mostradas en la figura 12 y 13 para una temperatura de 122°F; y en las figuras 14 y 15 para una temperatura de 170°F. El hecho que la viscosidad se mantenga constante cuando se varía la velocidad de deformación (o la relación lineal entre el esfuerzo y razón de deformación) indica que tanto el combustóleo liviano, como sus componentes tienen un comportamiento newtoniano, resultado esperado al no tener fondos de vacío. De la misma forma, las curvas de esfuerzo contra razón de deformación muestran una dependencia respecto a la velocidad de deformación de aproximadamente uno lo que ratifica el comportamiento Newtoniano del combustóleo y sus componentes por separado. Es importante aclarar, que el rango de razón de deformación estudiado contiene el valor de razón de deformación a los cuales operan los viscosímetros en línea. Si bien, la instalación tipo cámara asegura que las dimensiones son iguales, los flujos

a través del analizador son diferentes debido a las capacidades de las bombas que posee cada sistema. Para el combustible pesado, la bomba maneja un flujo de 16 galones por minuto en promedio para una razón de deformación de $78,4 \text{ s}^{-1}$, mientras que para el combustible liviano, la bomba maneja un flujo de 6 galones por minuto en promedio para una razón de deformación de $29,4 \text{ s}^{-1}$ y, por lo tanto, el rango de deformación estudiado está entre 20 a 100 s^{-1} . Este rango de velocidad de deformación es importante si se tiene en cuenta que el viscosímetro en línea tiene como restricción que los fluidos ensayados tengan un comportamiento reológico Newtoniano.

En las figuras 14 y 15 se muestran los resultados del análisis reológico para cada uno de los componentes a 170°F .

Figura 14. Caso base LFO a 170°F , Viscosidad Vs Velocidad de deformación

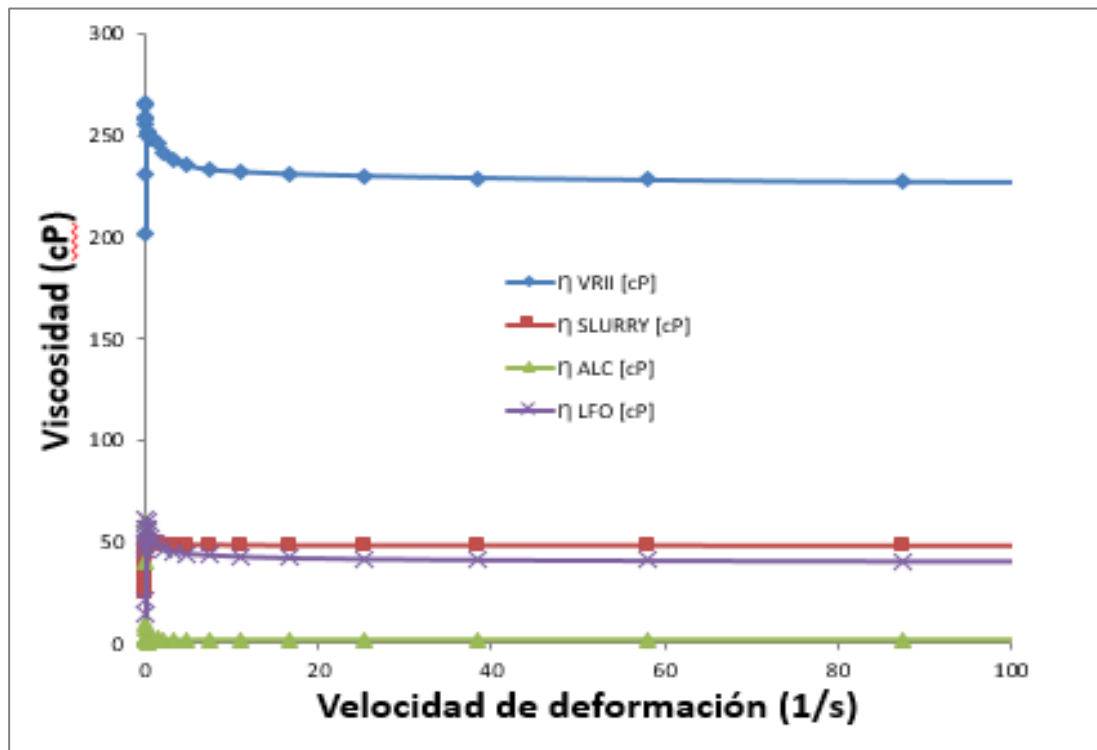
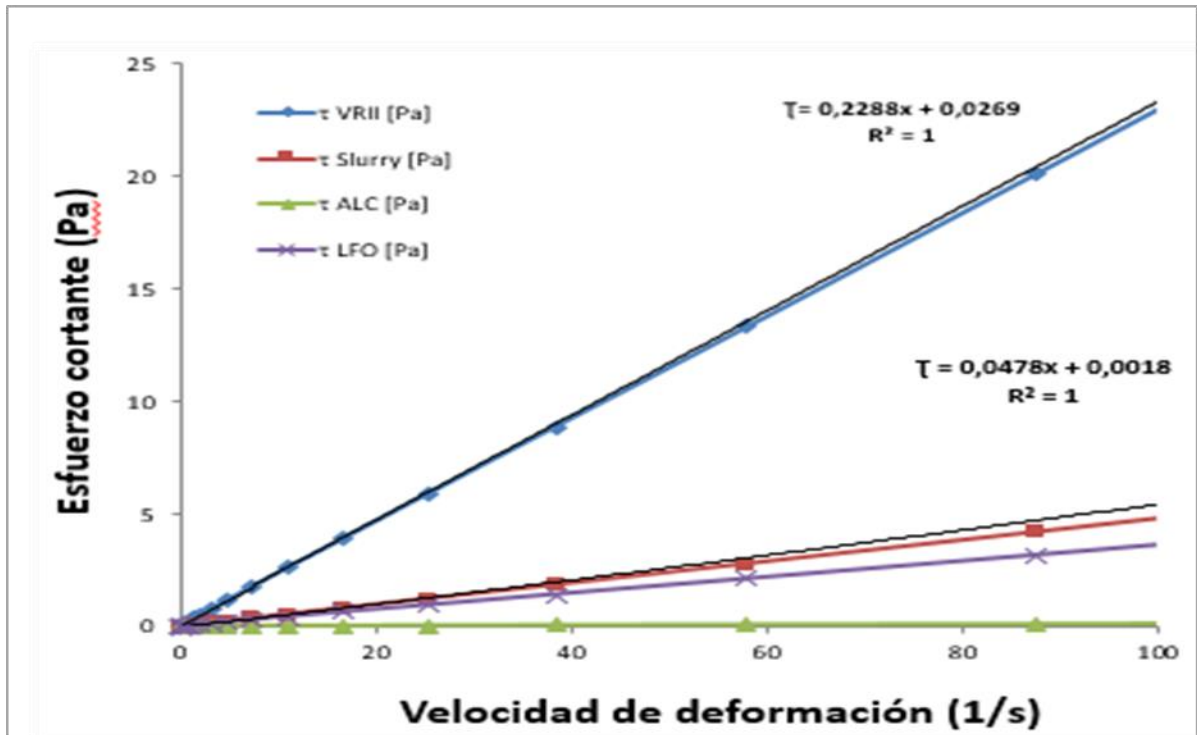


Figura 15. Caso base LFO a 170°F, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación



5.2 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE COMBUSTÓLEOS CON FONDOS DE VACÍO.

Se tomaron cinco muestras de slurries con diferentes concentraciones de fondos de vacío. El criterio tomado para limitar la concentración de fondos de vacío es que la viscosidad de la mezcla se mantuviera en el rango entre 80 y 1800 SSF a 122 °F como es actualmente el caso en la GRB. Adicionalmente, para cada una de las muestras de slurries, se tomó una muestra de cada componente, así como del producto final. Con estas muestras se obtuvo una curva de viscosidad o viscosidad aparente del slurry como función de la concentración de fondos de vacío y al igual con las muestras de componentes y productos.

Cada una de las muestras fue caracterizada a través de medidas densidad, gravedad API y viscosidad; las cuales fueron realizadas en el Laboratorio de Analítica de la GRB. Las pruebas reológicas se realizaron en un Reómetro marca Anton Paar modelo MCR 302 con una geometría de placas paralelas ubicado en Laboratorio de Investigaciones de la UIS en el Parque Tecnológico de Guatiguará y los resultados de nuevo fueron realizados a temperaturas de 122° F y 170°F. Los resultados se muestran a continuación.

5.2.1. Mezcla # 1: Estas muestras fueron tomadas durante la preparación de combustóleo pesado producto. En este caso el desvío de fondos de vacío hacia el tanque de slurry fue de 7 Kbpd aproximadamente, provenientes de los fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como Unidad 150 lo que corresponde a un 12% del volumen de mezcla total (combustóleo pesado).

Tabla 9. Resultados de análisis GRB, Mezcla 1 HFO producto.

CORRIDA	MUESTRA	Análisis	Resultado Laboratorio	Resultado Viscosímetro	Desviación
1	COMBUSTOLEO PESADO PRODUCTO k0927	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1024	941	8,1%
		GRAVEDAD API	6,5	6,57	-1,1%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	755	682	9,7%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	354	319,8	9,7%
	FONDOS VR II k2804	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1029,6	945	8,2%
		GRAVEDAD API	5,9	5,94	-0,7%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2773,53	2520	9,1%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	1301	1182	9,1%
	SLURRY k0104	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1087,8	940	13,6%
		GRAVEDAD API	6,05	5,74	5,1%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	1057,68	868	17,9%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	496	407	17,9%
	ALC k0005	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	892,7	910	-1,9%
		GRAVEDAD API	26,9	27,09	-0,7%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	1,14	1	12,3%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	2,61	2,22	14,9%

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la analítica realizada por el laboratorio de la GRB y comparados con los resultados del viscosímetro en línea. El resultado

de la viscosidad del slurry paso de una diferencia de 11% en el caso base a 17,9% en esta preparación con 12% de fondos de vacío en la mezcla; igual resultado se obtuvo con el producto final que paso de una diferencia de 4% en el caso base a 9,7%, mostrando de esta forma la afectación que se genera en la confiabilidad del análisis de viscosidad en el analizador en línea al incluir fondos de vacío en la preparación del combustóleo. En los fondos VRll el comportamiento fue diferente pues pasaron de 12,7% de desviación en el caso base a 9,1% en la mezcla 1. Los datos del ALC si bien se realizaron y reportaron todos los datos, sólo se dejan como referencia debido a que la viscosidad de ese componente no se encuentra en el rango del analizador en línea.

Tabla 10. Composición mezcla 1 HFO producto y comparativo de resultados Reómetro Vs Laboratorio GRB y Reómetro Vs Analizador. Todas las viscosidades en SSF a 122°F

Mezcla 1	HFO	Fondos VRll	Slurry	Fondos Vacío	ALC
% V/V en mezcla		64	23	12	1
Viscosidad Laboratorio (SSF)	354	1301	496		2,61
Viscosidad Analizador (SSF)	319,8	1182	407		2,22
Viscosidad Reómetro	404,5	1858	592,48		1,68
Diferencia Reómetro vs Laboratorio GRB	12,5%	30,0%	16,3%		-55,4%
Diferencia Reómetro vs Analizador	20,9%	36,4%	31,3%		-32,1%

En la Tabla 10 se detalla la composición en volumen de los componentes que se utilizaron para esta mezcla, al igual que las desviaciones en viscosidad previamente descritas. También se muestran los resultados de las 3 mediciones de viscosidad (laboratorio GRB, viscosímetro en línea y reómetro), al igual que las desviaciones entre ellos utilizando como referencia el valor obtenido en el reómetro. La primera desviación registrada es la del reómetro versus laboratorio con amplias diferencias para el combustóleo producto y aún mayores para el slurry

y los fondos VRII; siendo estos resultados esperados debido a la afectación de la inclusión de fondos de vacío en la mezcla.

Al comparar las desviaciones entre el reómetro y el analizador, todas las diferencias se encuentran fuera del rango de precisión, siendo la de menor valor la del producto final con 20,9% y con valores más altos para el slurry y los fondos VRII. Esto indica que existen factores que afectan de gran manera los resultados entregados por el analizador que pueden ser los fondos de vacío o una inadecuada calibración en el analizador en línea.

Este mismo grupo de muestras con idénticos porcentajes de componentes se utilizó para determinar el comportamiento reológico a dos temperaturas del slurry, componentes y productos y, de esta forma descartar cualquier otra desviación no prevista. En las figuras 16 y 17 se muestran los resultados del análisis reológico para cada una de las muestras a una temperatura de 122°F.

Figura 16. Mezcla 1 HFO a 122°F con 12% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.

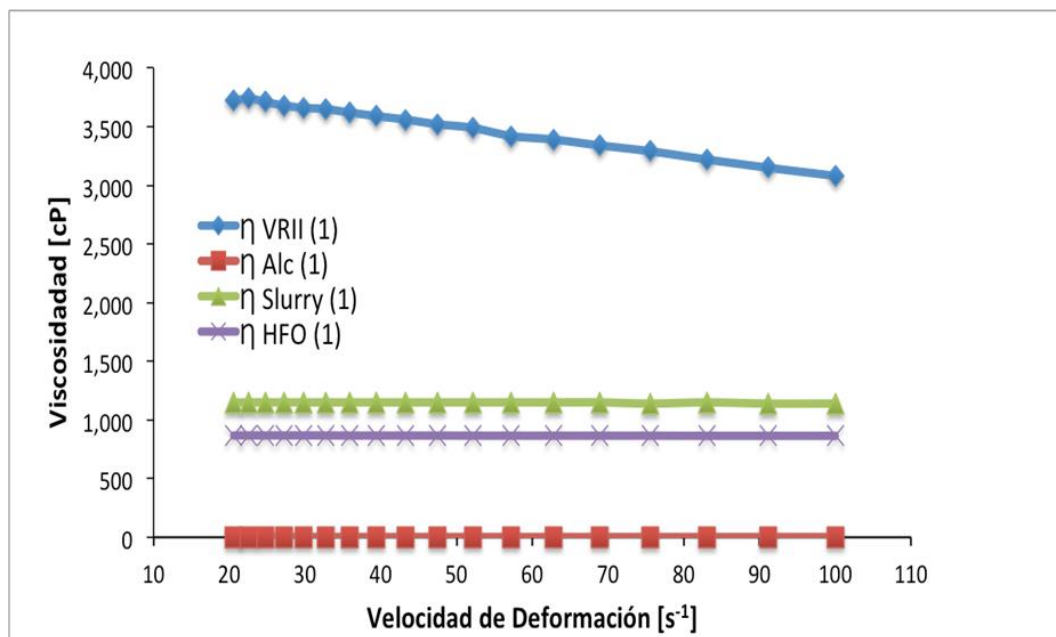
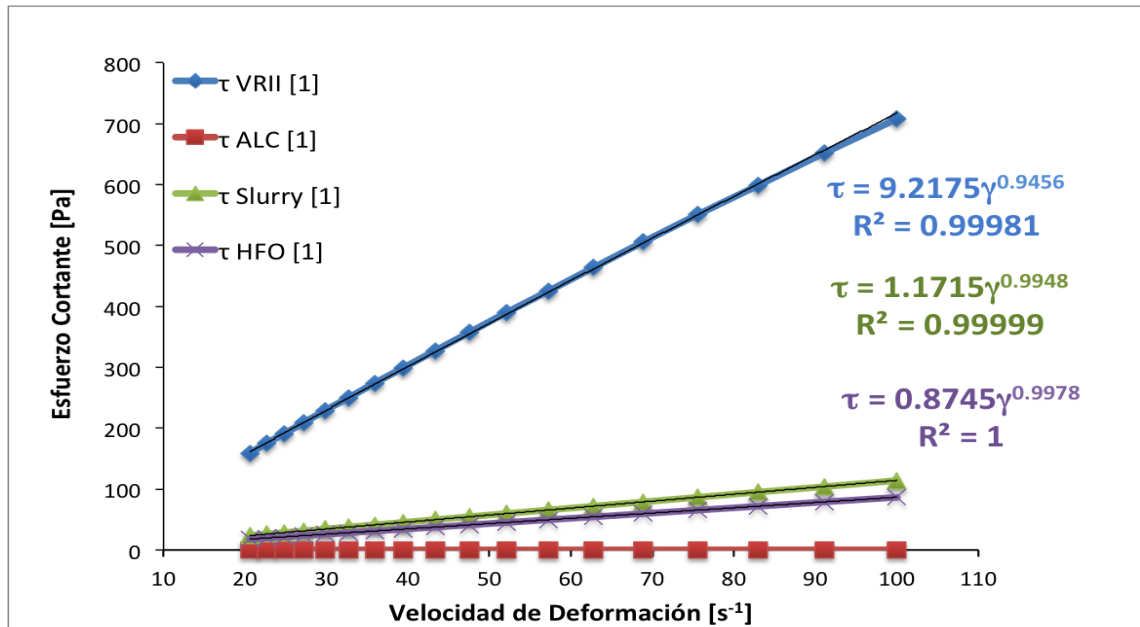


Figura 17. Mezcla 1 HFO a 122°F con 12% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.



Las tendencias de las gráficas de viscosidad aparente contra velocidad de deformación en la figura 16, muestran un cambio apreciable en la viscosidad aparente para el componente de fondos VRII al aumentar la velocidad de deformación, siendo este el comportamiento de un fluido ligeramente no newtoniano del tipo pseudoplástico, comportamiento confirmado en la gráfica 17 de esfuerzo cortante contra velocidad de deformación para el cual el índice de ley de potencia es de 0.9456. Sin embargo, este comportamiento no newtoniano no logra hacerse evidente en el producto final ($n \approx 1$), así como tampoco en el slurry que para esta preparación contiene un 12% de fondos de vacío y que era en éste donde esperaba evidenciarse el comportamiento no newtoniano en su análisis reológico. Aun así, el efecto de los fondos de VRII no logra afectar el comportamiento reológico del producto final, que permanece newtoniano.

Figura 18. Mezcla 1 HFO a 170°F con 12% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.

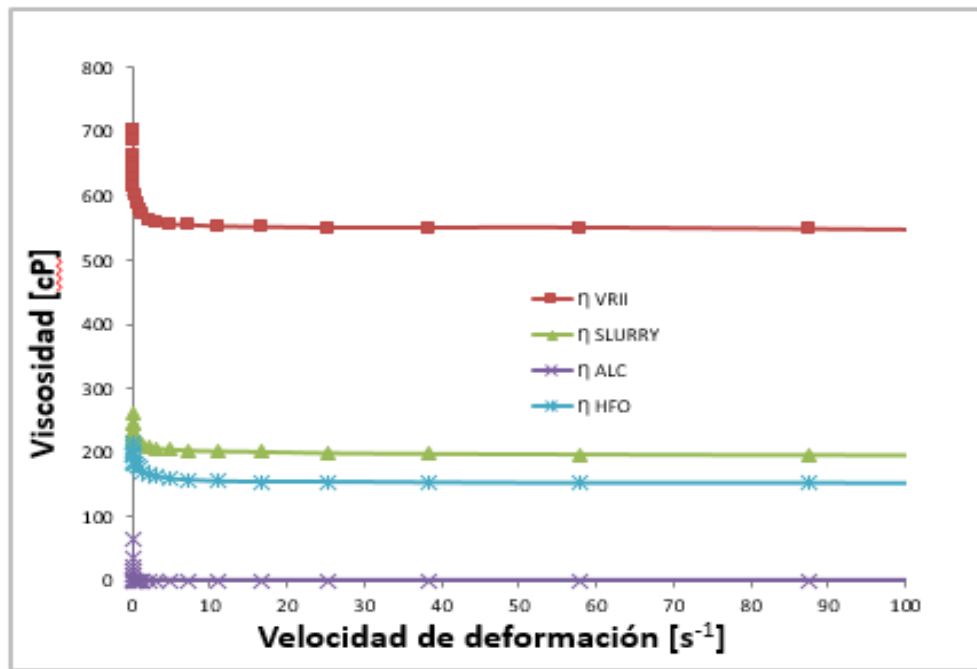
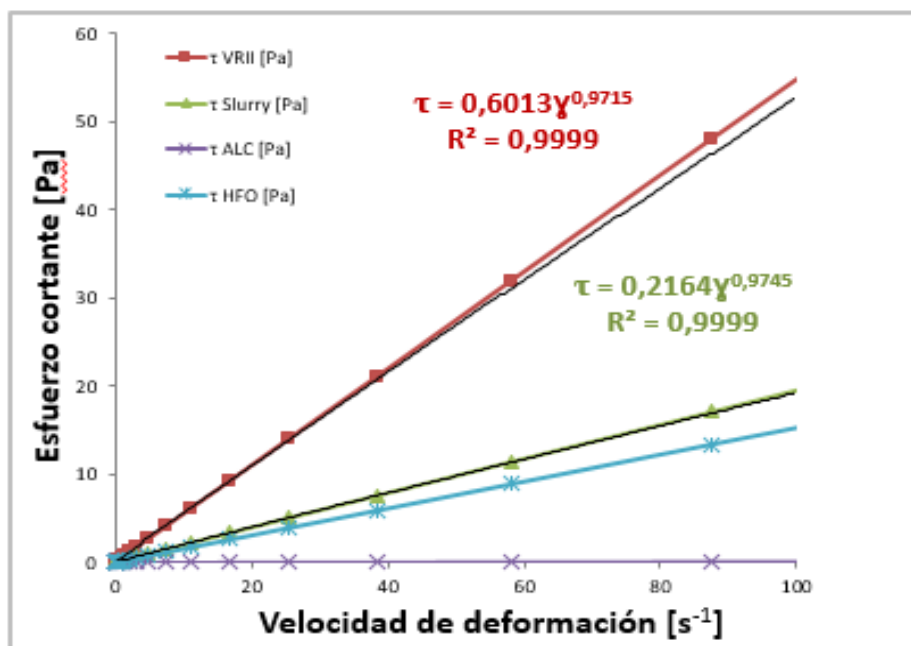


Figura 19. Mezcla 1 HFO a 170°F con 12% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación



En las figuras 18 y 19 se muestran los resultados del análisis reológico para cada uno de los componentes a 170°F. A una mayor temperatura no logra hacerse evidente el comportamiento pseudoplástico en los fondos VRII en el rango de velocidad de deformación de interés para este estudio. No obstante, a valores de $\gamma \geq 100s^{-1}$ empieza anotarse el comportamiento pseudoplástico del fluido. Por otro lado, en esta temperatura, tanto el slurry como el HFO tienen comportamiento Newtoniano. El componente de fondos VRII normalmente se reporta entre 160 y 180°F en el tanque que es almacenado y bombeado a la mezcla. Mientras que en las muestras a 122°F que es la temperatura de referencia para el visto bueno de productos ASTM D 445, los fondos VRII deben ser enfriados para su análisis. Para este caso, sobre los 170°F es su temperatura habitual indicando que su comportamiento es newtoniano al llegar al punto de mezclado y que, al unirse con los demás componentes, la mezcla baja a valores promedios entre 145° y 160°F.

5.2.2. Mezcla # 2: Esta segunda preparación fuera del estándar para el diseño original, fue tomada durante la mezcla de combustóleo pesado producto. En este caso, el desvío total de fondos de vacío hacia slurry fue de 12 Kbpd aproximadamente, proveniente de los fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como Unidad 150 con 7 Kbpd, más los fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como Unidad 2100 con 5 Kbpd conformando un 13% de fondos de vacío del volumen de mezcla total.

Tabla 11. Resultados de análisis GRB, Mezcla 2 HFO producto

2	COMBUSTOLEO PESADO PRODUCTO k0927	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1022	939	8,1%
		GRAVEDAD API	6,9	9,97	-44,5%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	816	697	14,6%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	383,5	327,5	14,6%
	FONDOS VR II k2804	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1024,7	1024	0,1%
		GRAVEDAD API	6,5	6,52	-0,3%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2048,04	1932	5,7%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	961	906,55	5,7%
	SLURRY k0104	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1033,5	950	8,1%
		GRAVEDAD API	5,3	5,03	5,1%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2112,03	1672	20,8%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	996	789,08	20,8%
	ALC k0005	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	934,1	910	2,6%
		GRAVEDAD API	19,8	19,89	-0,5%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2,4	2,2	8,3%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	3,2	2,93	8,4%

En la Tabla 11 se muestran los resultados de la analítica realizada por el laboratorio de la GRB y comparados con los resultados del viscosímetro en línea. El resultado de la viscosidad del slurry paso de una diferencia de 11% en el caso base y 18,4% en la mezcla # 1, a una desviación del 20,8% en esta preparación con 13% de fondos de vacío en la mezcla; igual resultado se obtuvo con el producto final que paso de una desviación de 4% en el caso base y 9,7% en la mezcla # 1, a una desviación del 14,6%, mostrando, de esta forma la afectación que se genera en la confiabilidad del análisis de viscosidad en el analizador en línea al incluir fondos de vacío en la preparación del combustóleo y como esta desviación aumenta cuando el porcentaje de fondos de vacío se incrementa. En términos generales la principal modificación que se realizó entre una mezcla y otra fue justamente la inclusión de fondos de vacío; a pesar de que el incremento fue solo de 12% a 13% de fondos de vacío en el total de la mezcla, la relación en la mezcla slurry más fondos es diferente. En la mezcla 1, los fondos de vacío eran de 7 Kbpd y 13 Kbpd de slurry para una relación de 34% y 66% respectivamente, mientras que en la mezcla 2 con fondos de vacío de 12 Kbpd y los mismos 13

Kbpd de slurry la relación cambia a 48% a 52% respectivamente para una mayor concentración de fondos de vacío.

Tabla 12. Composición mezcla 2 HFO producto con 13% de fondos de vacío y comparativo de resultados Reómetro Vs Laboratorio GRB y Reómetro Vs Analizador. Todas las viscosidades en SSF a 122°F.

Mezcla 2	HFO	Fondos VRII	Slurry	Fondos vacío	ALC
% V/V en mezcla		0,67	0,14	0,13	0,06
Viscosidad Laboratorio (SSF)	383,5	966	996		3,2
Viscosidad Analizador (SSF)	327,5	906,55	789,08		2,93
Viscosidad Reómetro	384,2	1232,34	1108,14		3,44
Diferencia Reómetro vs Laboratorio GRB	0,2%	21,6%	10,1%		7,0%
Diferencia Reómetro vs Analizador	14,8%	26,4%	28,8%		14,8%

En la tabla 12 se muestran además de los porcentajes en volumen para cada componente en la mezcla, la comparativa de las 3 mediciones diferentes para la viscosidad: laboratorio, viscosímetro en línea y reómetro; al igual que las desviaciones entre ellos utilizando como referencia el valor que es más preciso y que en este caso es el del reómetro. La primera desviación registrada es la del reómetro vs laboratorio con muy buenos datos para el combustóleo producto con una desviación de solo 0,2% y diferencias menores que las evidenciadas en la mezcla 1 para el slurry y los fondos VRII; distando de los resultados esperados debido a que, con una mayor concentración de fondos de vacío en la mezcla, se esperaba que las desviaciones fueran mayores y el efecto fue contrario.

Al comparar las desviaciones entre el reómetro y el analizador, todas las diferencias se encuentran fuera del rango de precisión, aunque menores que las desviaciones registradas en la mezcla 1, siguen siendo desviaciones inaceptables en el control de calidad para el producto final. Al persistir las grandes desviaciones

en la comparativa del analizador, sugiere esto que las desviaciones se están produciendo por una combinación entre las propiedades reológicas de los componentes y por oportunidades en el funcionamiento y confiabilidad de los resultados entregados por el viscosímetro en línea. Los resultados de las mezclas siguientes permitirán aclarar más el origen real de las desviaciones en el sistema.

Figura 20. Mezcla 2 HFO a 122°F con 13% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.

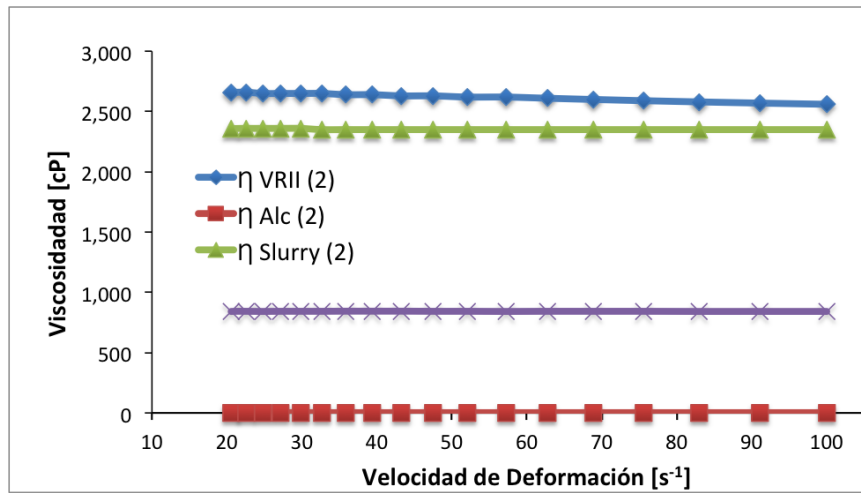
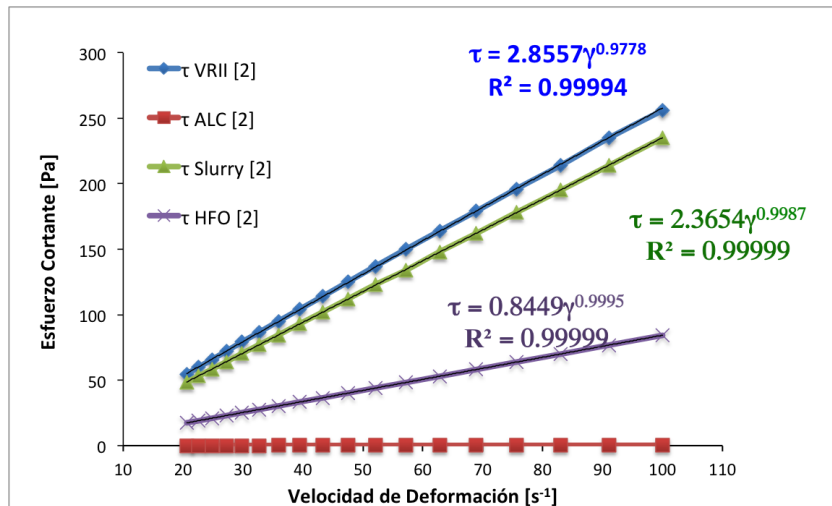


Figura 21. Mezcla 2 HFO a 122°F con 13% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.



Con el mismo grupo de muestras e idénticos porcentajes de componentes se realizó el análisis para determinar el comportamiento reológico a dos temperaturas para todos los componentes y productos. En las figuras 20 y 21 se muestran los resultados del análisis reológico para cada una de las muestras a una temperatura de 122°F. Las tendencias de las gráficas de viscosidad Vs velocidad de deformación, muestran un descenso considerable en la viscosidad aparente de los fondos VRII y al igual que en la mezcla 1 un comportamiento no newtoniano del tipo pseudoplástico, siendo ésta una nueva evidencia de que existe un tipo de afectación desde el aspecto reológico, pero no en la mezcla de slurry más fondos de vacío que era donde se tenía previsto y sí en los fondos VRII. El comportamiento de la mezcla slurry más fondos de vacío tiene una muy leve tendencia a disminuir su viscosidad aparente al aumentar la velocidad de deformación; pero al detallar los resultados del esfuerzo cortante Vs velocidad de deformación en la figura 21, estos muestran que su comportamiento en la velocidad de deformación es proporcional al esfuerzo cortante lo que indica el comportamiento típico de los fluidos newtonianos; resultados que difieren de lo esperado porque al tener una mayor concentración de fondos de vacío que la mezcla 1, se esperaba observar un comportamiento no newtoniano en el slurry y de igual forma, que se hiciera evidente en el combustóleo producto; descartando de momento que las diferencias en la medición del analizador sean generadas por componentes no newtonianos en la mezcla.

En las figuras 21 y 22 se muestran los resultados del análisis reológico para cada uno de los componentes a 170°F. A diferencia de los resultados a 122°F, los fondos de VRII presentan un comportamiento dilatante en la zona de razones de deformación entre 0 y 100 s⁻¹ cambiando a pseudoplástico para razones de deformación mayores a 100 s⁻¹. Dicho comportamiento es ratificado en la curva de esfuerzos donde se muestra que el índice de potencia para este caso (n) es 1.2881. A diferencia de los caso base y de la mezcla 1, el comportamiento del

HFO producto, tiene un comportamiento reológico similar al del Fondo de VRll, es decir, dilatante para $20 \leq \dot{\gamma} < 100$.

Figura 22. Mezcla 2 HFO a 170°F con 13% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.

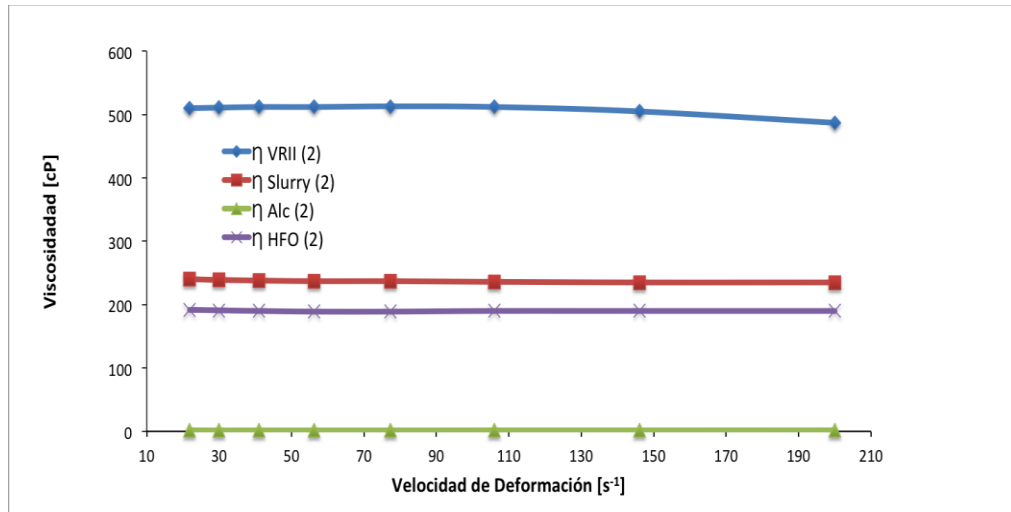
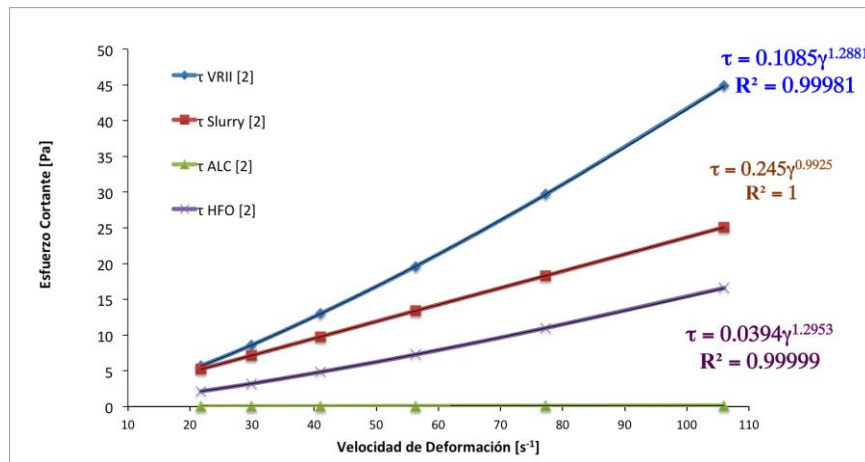


Figura 23. Mezcla 2 HFO a 170°F con 13% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación



5.2.3. Mezcla # 3: Para esta tercera preparación fuera del estándar para el diseño original y que fue tomada durante la mezcla de combustóleo pesado producto, el desvío total de fondos de vacío hacia slurry era de 20 Kbpd aproximadamente,

proveniente de los fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como Unidad 150 con 7 Kbpd, más el total de los fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como Unidad 2100 con 13 Kbpd conformando un 18% de fondos de vacío del volumen de mezcla total.

Tabla 13. Resultados de análisis GRB, Mezcla 3 HFO producto.

3	COMBUSTOLEO PESADO PRODUCTO k0927	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1098,1	985	10,3%
		GRAVEDAD API	6,7	6,79	-1,3%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	890	727	18,3%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	418	341,8	18,2%
	FONDOS VR II k2804	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1023,9	986	3,7%
		GRAVEDAD API	6,6	6,59	0,2%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2147,62	1952	9,1%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	1007	916,43	9,0%
	SLURRY k0104	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1038,9	997	4,0%
		GRAVEDAD API	4,6	4,2	8,7%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	4100	2857	30,3%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	1935	1348,64	30,3%
	ALC k0005	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	946,6	923	2,5%
		GRAVEDAD API	17,8	17,9	-0,6%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2,31	2,08	10,0%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	3,18	2,86	10,1%

En la tabla 13 se muestran los resultados de la analítica realizada por el laboratorio de la GRB y comparados con los resultados del viscosímetro en línea. El resultado de la viscosidad del slurry paso de una diferencia de 11% en el caso base, 18,4% en la mezcla # 1 y 20,8% en la mezcla # 2, a una desviación del 30,8% en esta preparación con 18% de fondos de vacío en la mezcla; siendo ésta la mezcla con mayor porcentaje de fondos de vacío y de igual manera la de mayor desviación entre los 2 datos comparativos de viscosidad. Igual comportamiento se obtuvo con el producto final que paso de una desviación de 4% en el caso base, 9,7% en la mezcla # 1 y 14,6% en la mezcla # 2, a una desviación del 18,2%; incrementándose la desviación de la lectura del analizador en línea contra la analítica del laboratorio, con lo que se denota la afectación que se genera en la

confiabilidad del análisis de viscosidad en el analizador en línea al incrementar los fondos de vacío en la preparación del combustóleo.

Los porcentajes de los componentes que se utilizaron para esta mezcla se detallan en la tabla 14, al igual que las desviaciones en viscosidad previamente descritas.

Tabla 14. Composición mezcla 3 HFO producto con 18% de fondos de vacío y comparativo de resultados Reómetro Vs Laboratorio GRB y Reómetro Vs Analizador. Todas las viscosidades en SSF a 122°F.

Mezcla 3	HFO	Fondos VRII	Slurry	Fondos vacío	ALC
% V/V en mezcla		64	12	18	6
Viscosidad Laboratorio (SSF)	418	1010	1950		3,18
Viscosidad Analizador (SSF)	341,8	916,43	1348,64		2,86
Viscosidad Reómetro	392,9	1214,86	1163		1,46
Diferencia Reómetro vs Laboratorio GRB	-6,4%	16,9%	-67,7%		-117,8%
Diferencia Reómetro vs Analizador	13,0%	24,6%	-16,0%		-95,9%

En la tabla 14 se muestran además de la composición volumétrica de la mezcla, los resultados para las 3 mediciones de viscosidad para componentes y producto, así como la comparativa entre esos 3 tipos de medición. Tomando como valor de referencia los resultados del reómetro, vemos como la desviación entre éste y el laboratorio se encuentra fuera de la desviación máxima permitida, pero menor a la diferencia entre el reómetro y el analizador que alcanza una desviación del 13% siendo la desviación menor de las 3 mezclas con fondos de vacío, aun teniendo la mayor concentración de fondos de vacío. Este comportamiento desvirtúa en gran manera que la afectación principal en las desviaciones de viscosidad estén relacionadas directamente con los fondos de vacío hacia la mezcla de combustóleo y refuerza que la teoría de que esta desviación se da por una

inadecuada e insuficiente calibración y disponibilidad de una curva reológica actualizada; sin descartar plenamente una posible afectación por el comportamiento reológico de los fondos VRll como se ha podido evidenciar en la mezclas anteriores. Para los componentes, todos se encuentran fuera del rango máximo de desviación permitido, resaltando la enorme diferencia entre el reómetro y el laboratorio para la muestra de slurry con 67% de desviación. Este mismo grupo de muestras con idénticos porcentajes de componentes se utilizó para determinar el comportamiento reológico a dos temperaturas para todos los componentes y productos.

Figura 24. Mezcla 3 HFO a 122°F con 18% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.

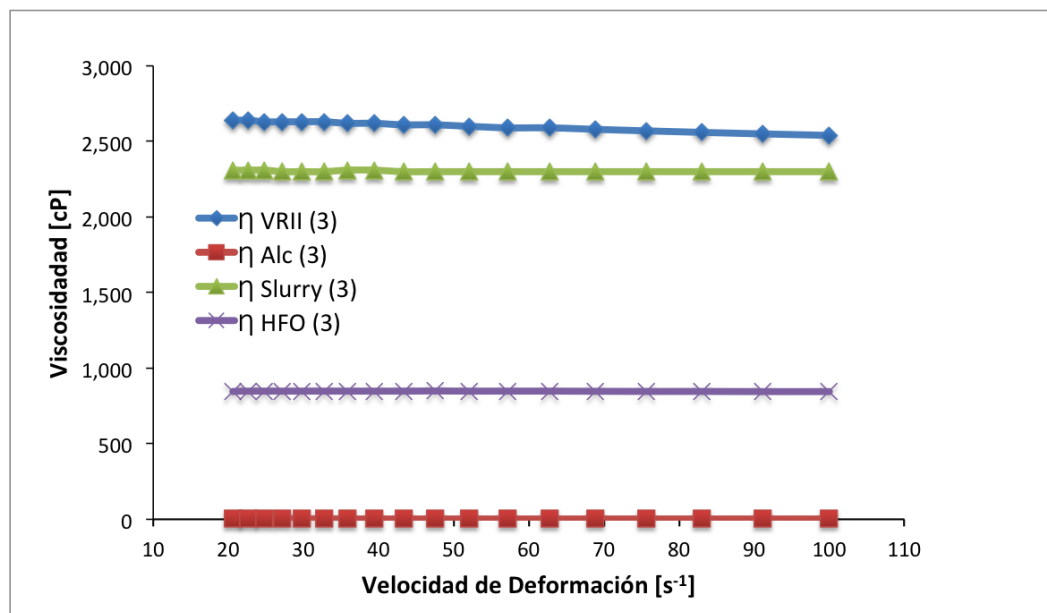
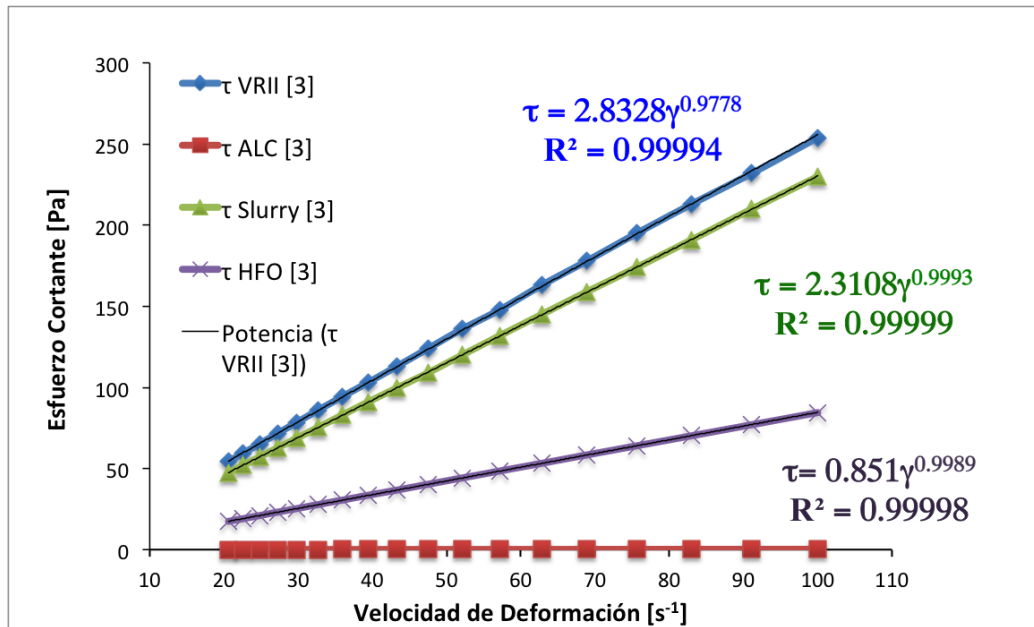


Figura 25. Mezcla 3 HFO a 122°F con 18% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.



Las tendencias de las gráficas de viscosidad aparente Vs velocidad de deformación en la figura 24, muestran un descenso menor en la viscosidad aparente para los componentes de fondos de viscorreductora al aumentar la velocidad de deformación y al detallar los resultados del esfuerzo cortante Vs velocidad de deformación en la figura 25, se evidencia igualmente de manera leve el tipo de comportamiento pseudoplástico que puedan afectar la medición del analizador en línea.

En las figuras 26 y 27 se muestran los resultados del análisis reológico para cada uno de los componentes a 170°F y al igual de lo que se evidenció en la mezcla 2, a esta temperatura el comportamiento del slurry y de los Fondos de Visorreductora son Newtonianos mientras el HFO que resulta de su mezcla tiende a tener un comportamiento pseudoplástico.

Figura 26. Mezcla 3 HFO a 170°F con 18% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.

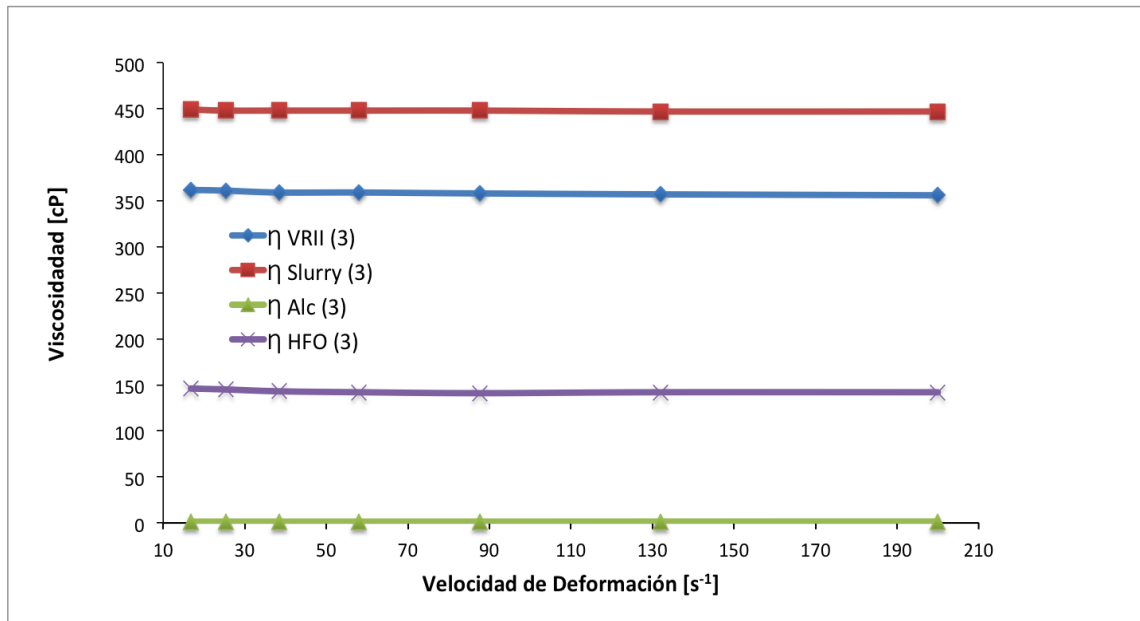
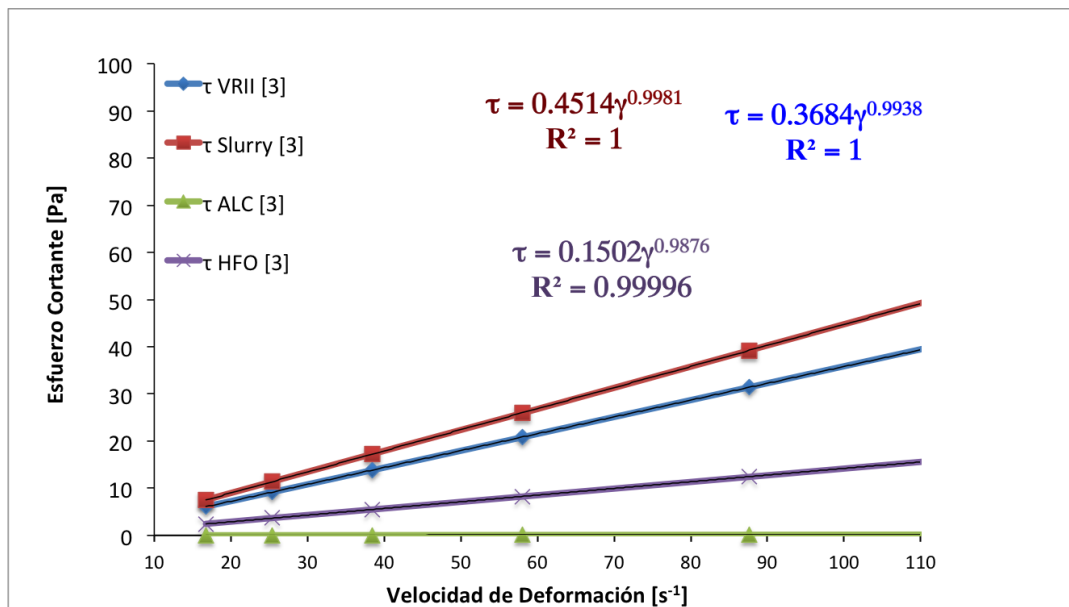


Figura 27. Mezcla 3 HFO a 170°F con 18% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.



5.2.4. Mezcla # 4: En la cuarta preparación fuera del estándar para el diseño original y que fue tomada durante la mezcla de combustóleo liviano producto, el desvío total de fondos de vacío hacia slurry era de 7 Kbpd aproximadamente, proveniente de los fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como Unidad 150 para un 8% de fondos de vacío en el volumen de mezcla total.

Tabla 15. Resultados de análisis GRB, Mezcla 4 LFO producto.

# CORRIDA	MUESTRA	Análisis	Resultado Laboratorio	Resultado Viscosímetro	Desviación
4	COMBUSTOLEO LIVIANO PRODUCTO k0935	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1008,3	1042	-3,3%
		GRAVEDAD API	8,7	4,17	52,1%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	128,24	121,5	5,3%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	61,5	58,25	5,3%
	FONDOS VR II k2804	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1026,7	982	4,4%
		GRAVEDAD API	6,5	6,75	-3,8%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2399,32	1885	21,4%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	1130	889,75	21,3%
	SLURRY k0104	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1034,2	1042	-0,8%
		GRAVEDAD API	5,2	4,17	19,8%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	1371,65	1105	19,4%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	647	521,5	19,4%
	ALC k0005	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	939,5	908	3,4%
		GRAVEDAD API	19	20,1	-5,8%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2,45	2,46	-0,4%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	3,25	3,26	-0,3%

En la tabla 15 se muestran los resultados de la analítica realizada por el laboratorio de la GRB y comparados con los resultados del viscosímetro en línea. El resultado de la viscosidad del slurry paso de una diferencia de 11% en el caso base a una desviación del 19,4% en esta preparación con 8% de fondos de vacío en la mezcla; mejor comportamiento se obtuvo con el producto final que pasó de una desviación de 4% en el caso base a una desviación del 5,3%; reduciéndose la desviación de la lectura del analizador en línea contra la analítica del laboratorio.

Tabla 16. Composición mezcla 4 LFO producto con 8% de fondos de vacío y comparativo de resultados Reómetro Vs Laboratorio GRB y Reómetro Vs Analizador. Todas las viscosidades en SSF a 122°F.

Mezcla 4	LFO	Fondos VRII	Slurry	Fondos Vacío	ALC
% V/V en mezcla		55	15	8	22
Viscosidad Laboratorio (SSF)	61,5	1130	647		3,25
Viscosidad Analizador (SSF)	58,25	889,75	461,52		3,26
Viscosidad Reómetro	64,17	1.333,08	525,32		3,45
Diferencia Reómetro vs Laboratorio GRB	4,2%	15,2%	-23,2%		5,8%
Diferencia Reómetro vs Analizador	9,2%	33,3%	12,1%		5,5%

Para esta mezcla 4, la comparativa de los 3 métodos para la medición de la viscosidad se muestran en la tabla 16, así como la composición volumétrica de la mezcla. La desviación identificada entre el reómetro y el analizador es muy buena cumpliendo con la máxima permitida en el diseño del equipo y la menor también en el componente fondos VRII de todas las mezclas analizadas hasta ahora con solo 15% de desviación. Los resultados del slurry no muestran una correlación con el contenido de los fondos de vacío, descartando de esta manera que se tenga una afectación por comportamiento reológico no newtoniano como se pudo evidenciar en las mezclas anteriores y como se verá una vez más en las figuras 28 y 29. En cuanto a las diferencias entre el reómetro y el analizador de viscosidad en línea, todos los valores se encuentran fuera de los máximos permisibles, siendo el menor justamente el del combustóleo producto con 9,2%.

Este mismo grupo de muestras con idénticos porcentajes de componentes se utilizó para determinar el comportamiento reológico a dos temperaturas para todos los componentes y productos.

Figura 28. Mezcla 4 LFO a 122°F con 8% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.

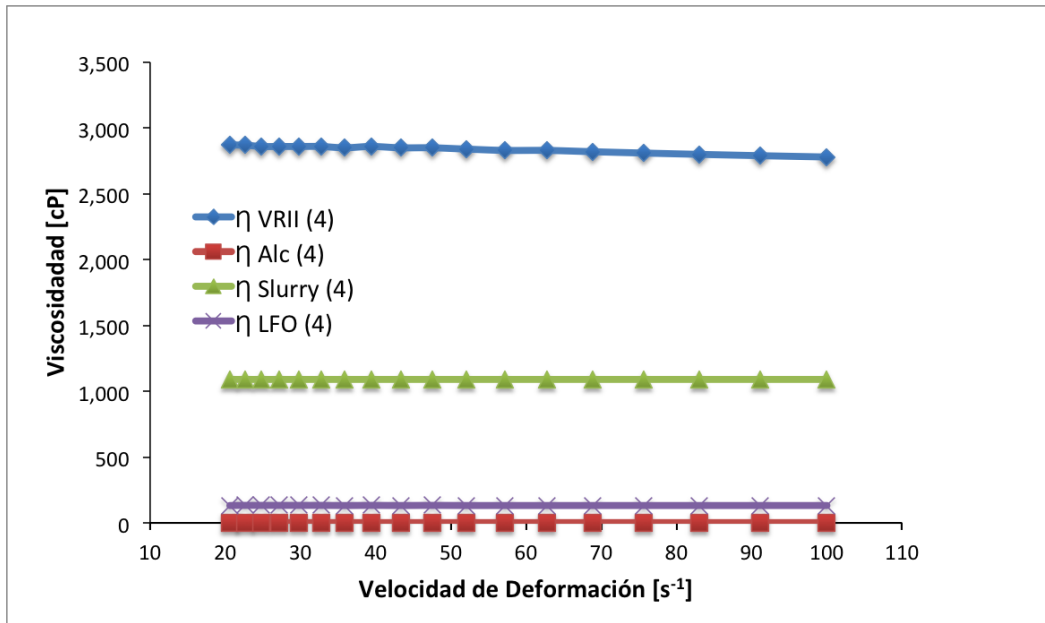
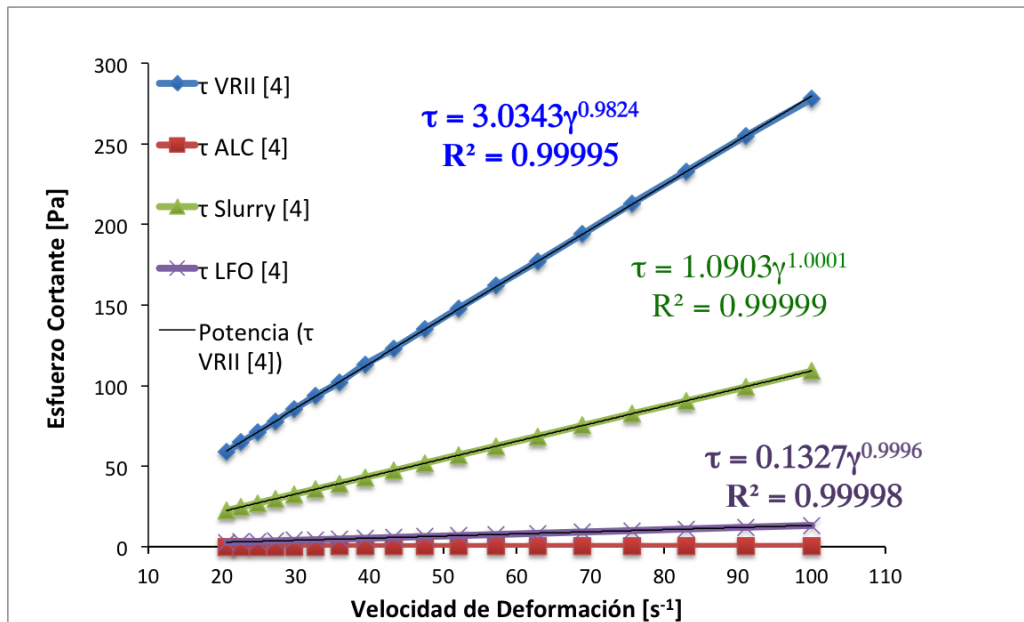


Figura 29. Mezcla 4 LFO a 122°F con 8% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.



Las tendencias de las gráficas de viscosidad aparente Vs velocidad de deformación en la figura 28, muestran un descenso leve en la viscosidad aparente para los componentes de fondos VRll cuando se incrementa la velocidad de deformación, conservando la tendencia de las muestras anteriores y permitiendo concluir que el comportamiento de este componente es no newtoniano del tipo pseudoplástico, pero al mezclarse con los demás componentes no logra hacerse evidente su efecto en la mezcla de combustóleo producto.

En las figuras 30 y 31 se muestran los resultados del análisis reológico para cada uno de los componentes a 170°F, repitiendo lo evidenciado en las preparaciones anteriores y demostrando que a una mayor temperatura el componente de fondos VRll se mantiene newtoniano.

Figura 30. Mezcla 4 LFO a 170°F con 8% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.

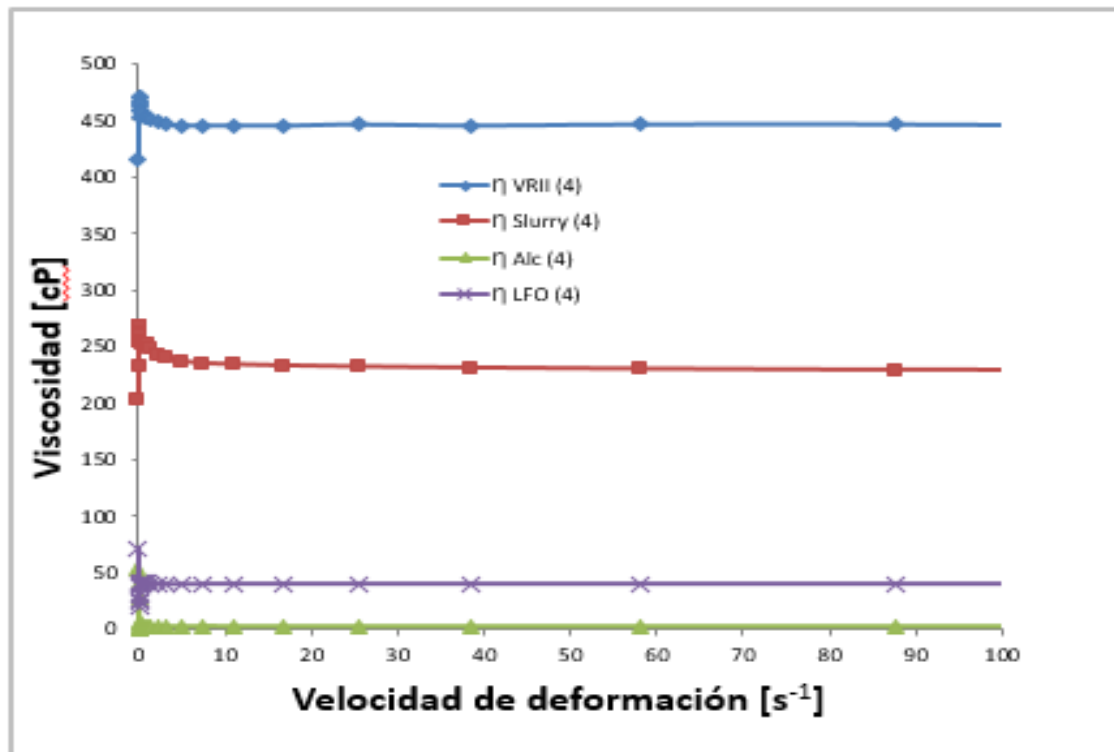
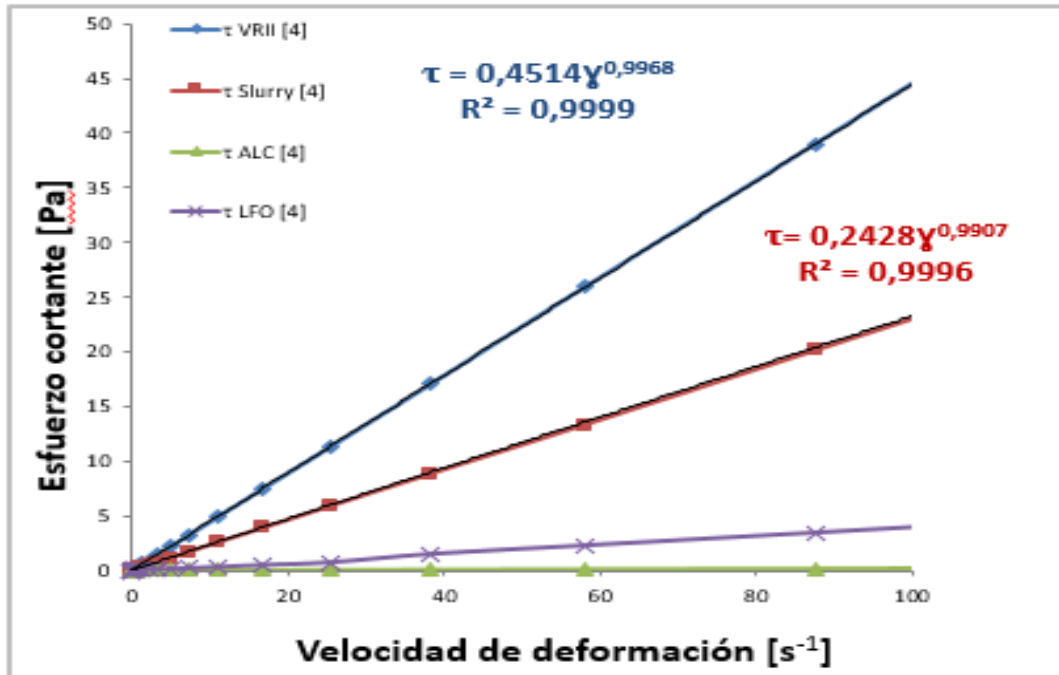


Figura 31. Mezcla 4 LFO a 170°F con 8% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.



5.2.5. Mezcla # 5: En la quinta preparación fuera del estándar para el diseño original y que fue tomada durante la mezcla de combustóleo liviano producto, el desvío total de fondos de vacío hacia slurry era de 4 Kbpd aproximadamente, proveniente de los fondos de vacío de la unidad de destilación al vacío identificada como Unidad 150 para un 4% de fondos de vacío en el volumen de mezcla total.

Tabla 17. Resultados de análisis GRB, Mezcla 5 LFO producto.

# CORRIDA	MUESTRA	Análisis	Resultado Laboratorio	Resultado Viscosímetro	Desviación
5	COMBUSTOLEO LIVIANO PRODUCTO k0935	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1005,7	964,0	4,1%
		GRAVEDAD API	9,1	9,8	-8,1%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	105,5	106,0	-0,4%
		VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	51,1	50,7	0,8%
	FONDOS VR II k2804	DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1025,2	978,0	4,6%
		GRAVEDAD API	6,4	6,9	-8,4%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2060,0	1580,0	23,3%
	SLURRY k0104	VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	972,0	746,6	23,2%
		DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	1030,6	987,0	4,2%
		GRAVEDAD API	5,7	6,1	-7,7%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	662,8	565,0	14,8%
	ALC k0005	VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	313,0	266,3	14,9%
		DENSIDAD A 60° F (kg/m3)	936,4	902,0	3,7%
		GRAVEDAD API	19,5	20,3	-4,1%
		VISC CINEMAT. A 122°F (mm2/s)	2,3	2,3	2,6%
			VISC. SAYBOLT 122°F (SSF)	3,2	3,1

En la tabla 17 se muestran los resultados de la analítica realizada por el laboratorio de la GRB y comparados con los resultados del viscosímetro en línea. El resultado de la viscosidad del slurry pasó de una diferencia de 11% en la mezcla sin fondos de vacío, una desviación del 19,4% en una mezcla con 8% de fondos de vacío, a una desviación de 14,9% en esta preparación con 4% de fondos de vacío en la mezcla; mejor comportamiento se obtuvo con el producto final que paso de una desviación de 4% en el caso base a una desviación de tan solo 0,8%; reduciéndose la desviación de la lectura del analizador en línea contra la analítica del laboratorio y mejorando los resultados obtenidos en el caso base.

Tabla 18. Composición mezcla 5 LFO producto con 8% de fondos de vacío y comparativo de resultados Reómetro Vs Laboratorio GRB y Reómetro Vs Analizador. Todas las viscosidades en SSF a 122°F.

Mezcla 5	LFO	Fondos VRII	Slurry	Fondos Vacío	ALC
% V/V en mezcla		60	13	4	23
Viscosidad Laboratorio (SSF)	51,1	972	313		3,19
Viscosidad Analizador (SSF)	50,67	746,63	266,34		3,11
Viscosidad Reómetro	58,91	1206,12	332,32		1,74
Diferencia Reómetro vs Laboratorio GRB	13,3%	19,4%	6%		-83,3%
Diferencia Reómetro vs Analizador	14,0%	38,1%	20%		-78,7%

Los porcentajes de los componentes que se utilizaron para esta mezcla se detallan en la tabla 18, al igual que las desviaciones en viscosidad previamente descritas. Si bien la diferencia entre el analizador y el laboratorio fue de solo 0,8%, esta diferencia se amplía al realizar las comparaciones entre el valor de referencia que es el reómetro y el laboratorio a 13% y contra el analizador a 14%.

Este mismo grupo de muestras con idénticos porcentajes de componentes se utilizó para determinar el comportamiento reológico a dos temperaturas para todos los componentes y productos. En las figuras 32 y 33 se muestran los resultados del análisis reológico para cada una de las muestras a una temperatura de 122°F.

Figura 32. Mezcla 5 LFO a 122°F con 4% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.

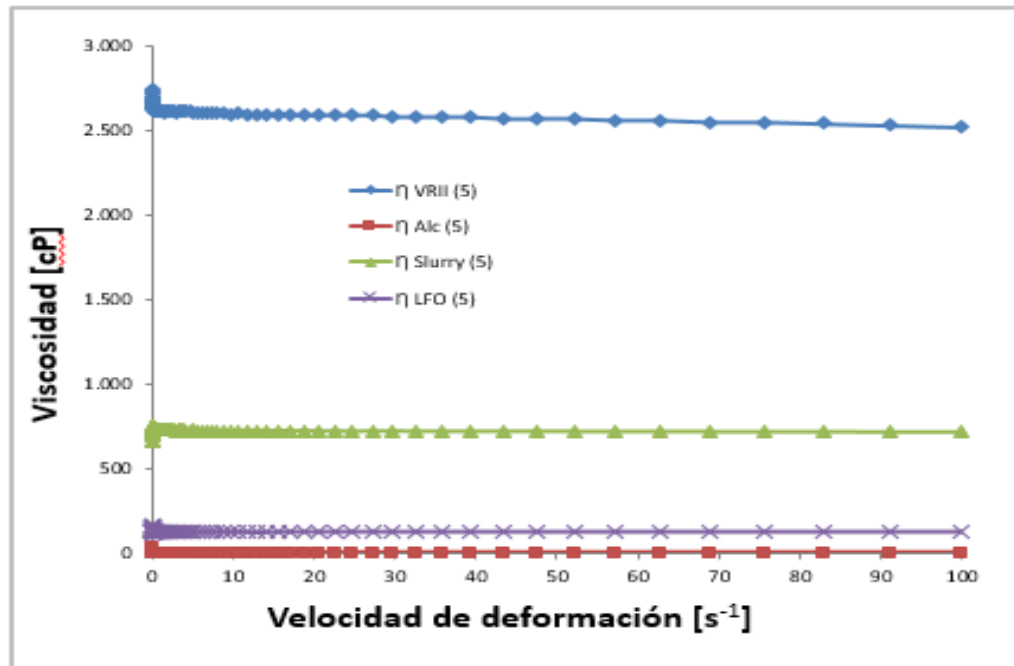
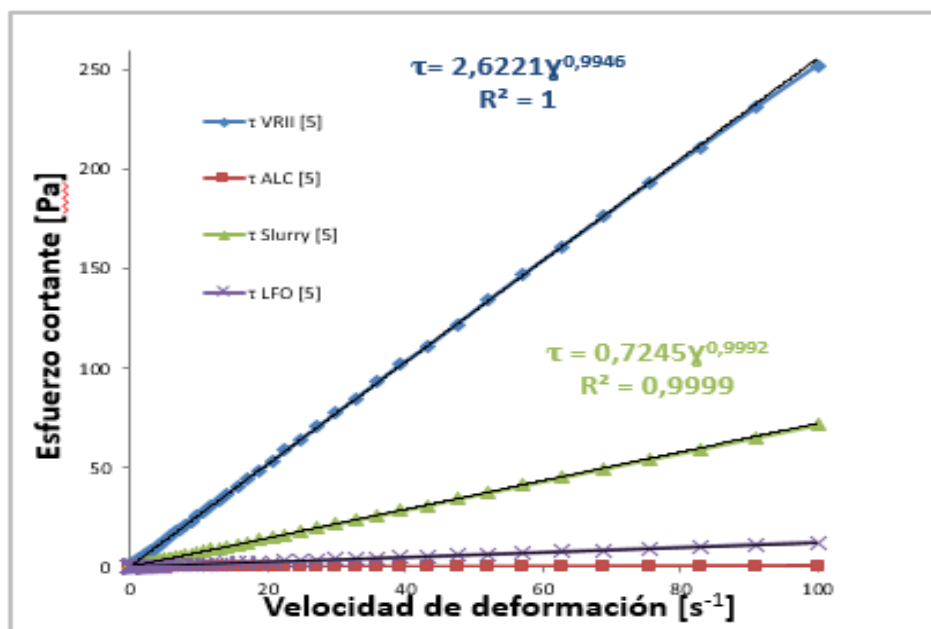


Figura 33. Mezcla 5 LFO a 122°F con 4% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación.



Las tendencias de las gráficas de viscosidad aparente y razón de deformación Vs velocidad de deformación muestran una vez más el comportamiento no newtoniano de tipo pseudoplástico para los fondos VR11. Para las otras muestras y manteniendo la tendencia de las mezclas anteriores, son todas de comportamiento newtoniano.

En las figuras 34 y 35 se muestran los resultados del análisis reológico para cada uno de los componentes a 170°F y se puede observar un comportamiento similar al evidenciado en los análisis reológicos a esa misma temperatura en las mezclas anteriores.

Figura 34. Mezcla 5 LFO a 170°F con 4% de fondos de vacío, Viscosidad Vs Velocidad de deformación.

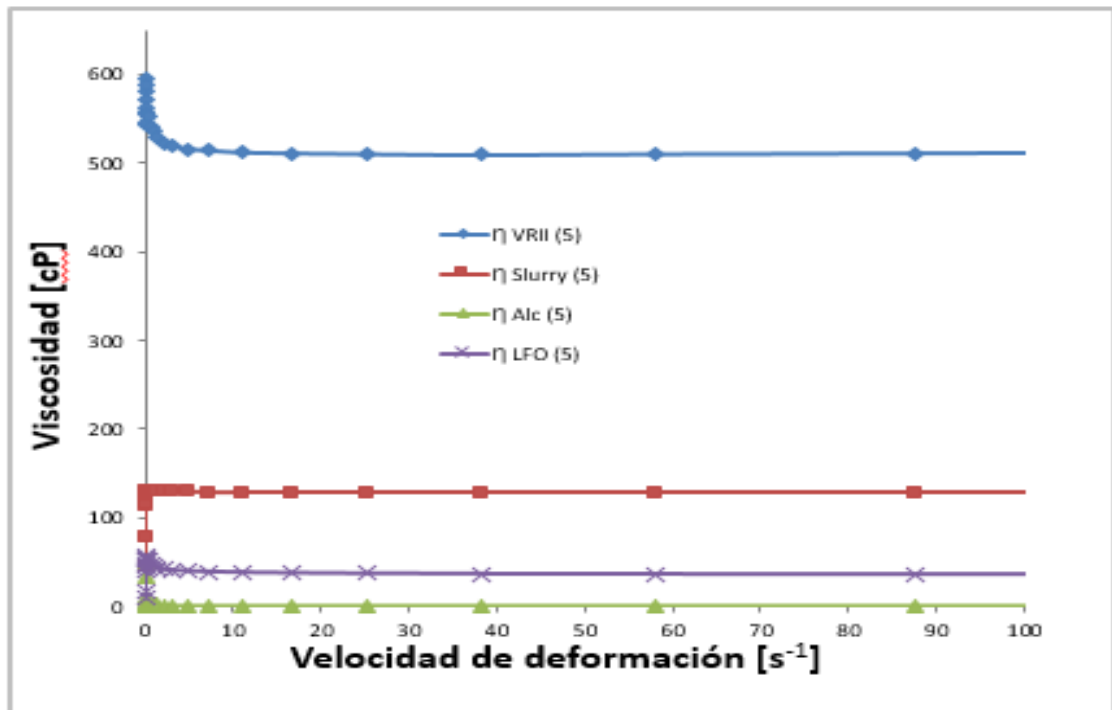
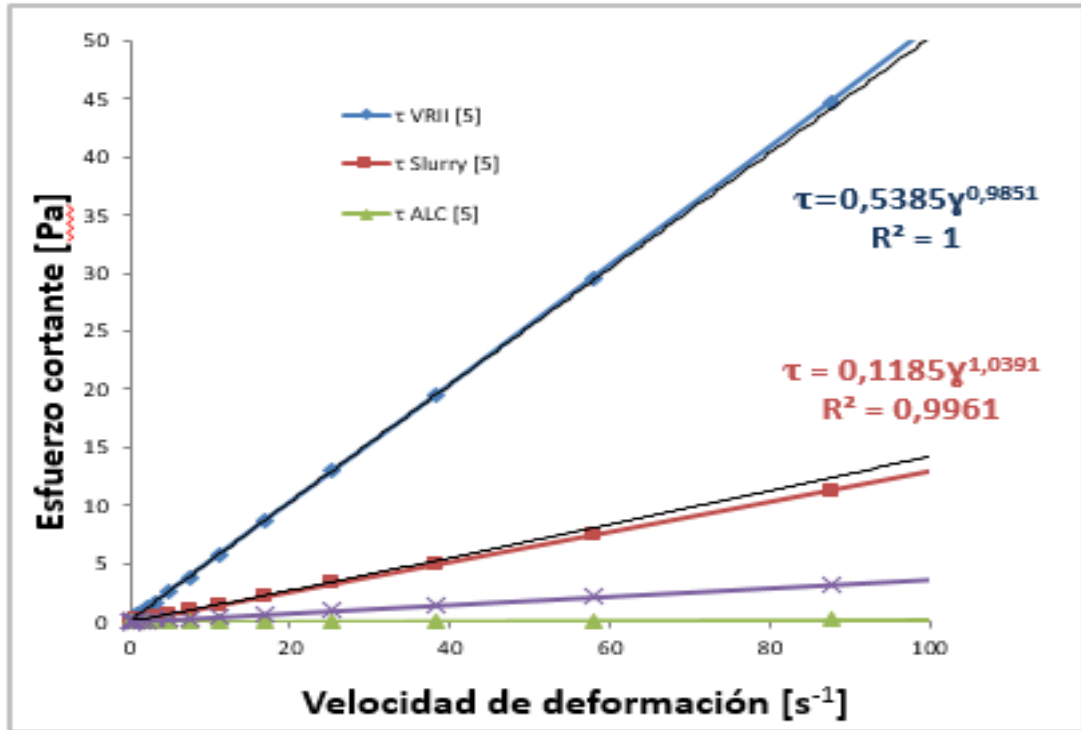


Figura 35. Mezcla 5 LFO a 170°F con 4% de fondos de vacío, Esfuerzo cortante Vs Velocidad de deformación



5.2.6 Análisis General En las figuras 36 y 37 se consolidan las desviaciones de cada una de las mezclas analizadas entre análisis del reómetro contra los resultados de viscosidad arrojados por el viscosímetro en línea (anализador) y los entregados por el laboratorio de la refinería. La primera observación que resulta y sorprende, es que existe una menor desviación entre los resultados del reómetro y los resultados del analizador; que entre los del reómetro y los reportados por el laboratorio de la GRB.

Figura 36. Desviación reómetro/laboratorio Vs contenido de fondos de vacío.

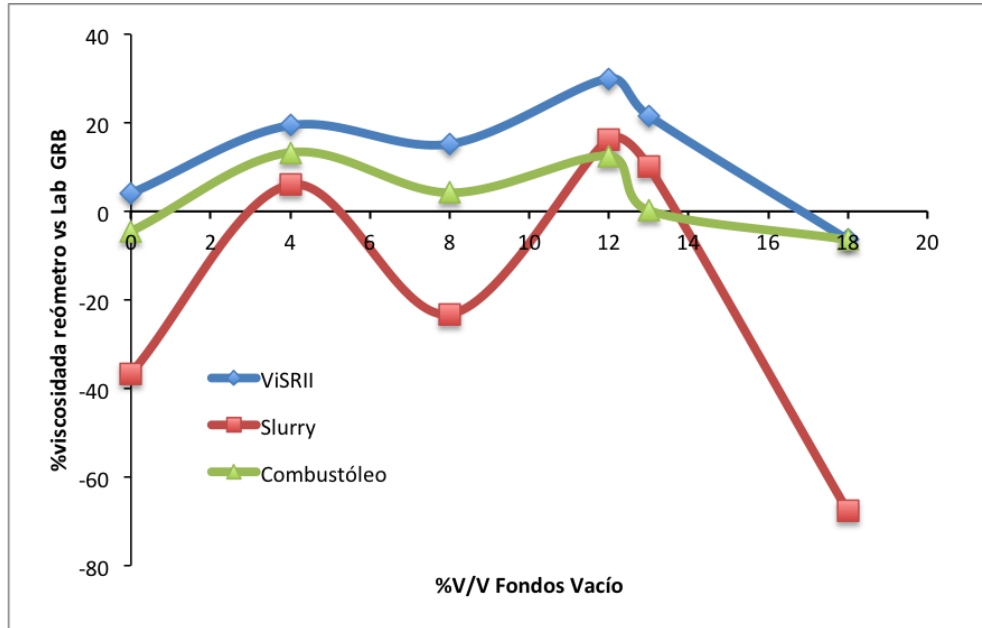
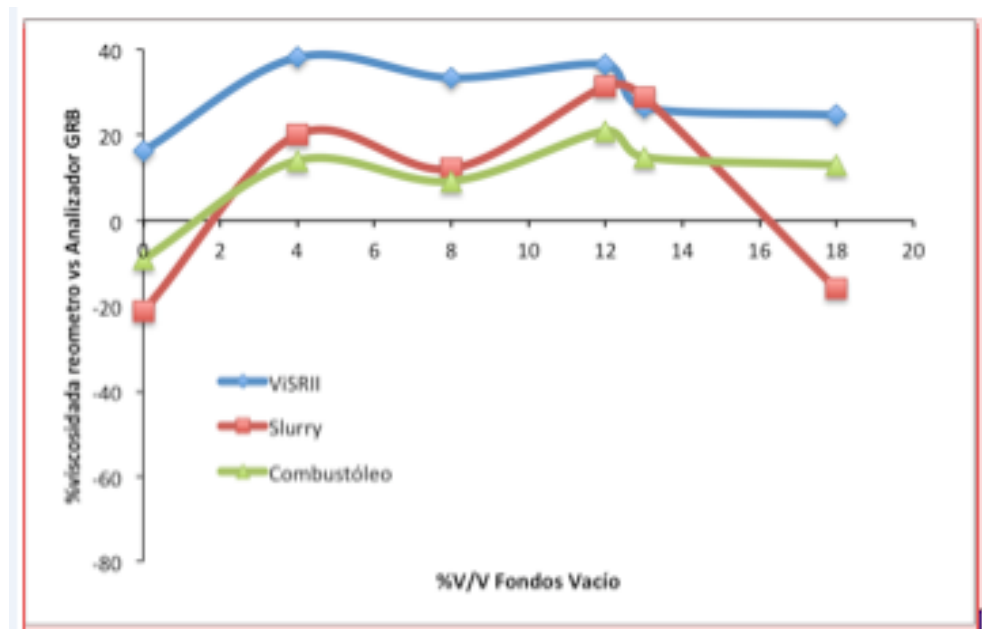


Figura 37. Desviación reómetro/analizador Vs contenido de fondos de vacío.



Esto podría ser causado por que la norma usada por el laboratorio es estrictamente aplicable a fluidos sin partículas y Newtonianos. Esto explicaría por

qué se observa una mayor desviación en el caso del componente slurry. Por otro lado, es claro de la figura 37 que las mayores desviaciones son para el componente de fondos de viscorreductora. Esto puede ser explicado, teniendo en cuenta que, según información de la GRB los viscosímetros en línea están calibrados para viscosidades entre 100 y 1000 cP, mientras que de las muestras estudiadas la de menor viscosidad presenta un valor de 1500 cP y la de mayor viscosidad está entre 3080 cP y 3720 cP, lo que indica que el equipo está trabajando fuera de su rango de calibración para este componente y para el ALC. Por otro lado, las mezclas uno y tres son las que representan mayor desviación de viscosidad entre el reómetro y el analizador, tanto para el slurry, los fondos de viscorreductora y el combustóleo producto. Al revisar el porcentaje de fondos de vacío en la mezcla no se ve una correlación, sin embargo, estas muestras corresponden al caso donde se encontró una mayor desviación del comportamiento Newtoniano del componente Fondos de viscorreductora. Esto indicaría que más que la cantidad de fondos de vacío en el slurry lo que influye en el desempeño del analizador en línea es el comportamiento no Newtoniano de los fondos de viscorreductora, Por último, el comportamiento reológico de los fondos de viscorreductora se ve fuertemente afectado por la temperatura, como se observa que a 170°F el comportamiento reológico de este material es dilatante para la razón de deformación de interés en la mezcla 3 y que este efecto es transmitido al combustóleo producto.

6. CONCLUSIONES

- A pesar de haberse observado comportamiento no newtoniano en las mezclas 1, 2 y 3, este se hizo evidente para el componente fondos VRII y contrario a lo esperado, el componente slurry con las diversas concentraciones de fondos de vacío no mostró el comportamiento no newtoniano que se consideraba como el factor que afecta la confiabilidad en la medición de los viscosímetros en línea.
- El comportamiento reológico del tipo pseudoplástico en los fondos VRII no logra hacerse evidente en los análisis realizados en el combustóleo producto para ninguna de las mezclas, indicando de esta manera que las diferencias se encuentran en la calibración de los analizadores.
- Se logró identificar las oportunidades de mejora que tiene el proceso de calibración de los viscosímetros, tanto por la frecuencia de las calibraciones, como por la calidad o completitud de las curvas reológicas que tienen configurados los viscosímetros en la actualidad. En gran parte se debe a que la refinería de Barrancabermeja no cuenta en su coordinación de inspección y calidad un reómetro que le permita generar curvas reológicas completas y el recurso de los laboratorios del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) son costosos, demorados y limitados.

7. RECOMENDACIONES

- La GRB debe adquirir un reómetro para la coordinación de inspección de calidad que permita generar curvas reológicas completas y con éstas, realizar la calibración de los viscosímetros del Blending de combustóleo y los que operan en otras áreas operativas de la refinería; esto redundará en una mayor confiabilidad en las mediciones de viscosidad y menor requerimientos de muestras de control a realizar por el laboratorio de la GRB.
- Estudiar la viabilidad de reemplazar el uso de viscosímetros capilares en componentes con presencia de sólidos en suspensión y/o sedimentos por otros equipos que no se vean afectados por esta condición como los viscosímetros rotacionales.
- Asegurar la actualización de las curvas reológicas de los viscosímetros en línea 2 veces por año. Esta frecuencia es requerida debido a la variación en las recetas para la preparación de combustóleo producto.
- Generar una curva reológica completa y actualizarla en el analizador en línea cada vez que se planea entregar un combustóleo producto con un rango de viscosidad diferente al establecido en la configuración actual.

BIBLIOGRAFÍA

BARNES, H.A; HUTTON J.F and Walters K. An Introduction to Rheology: Elsevier, Amsterdam, 1989, pp. 199.

BIRD, R.B., W.E. STEWART & E.N. LIGHTFOOT. Transport phenomena. 2a ed., John Wiley & Sons, 2002

BLOOMER, J.J., Practical fluid mechanics for engineering applications. Marcel Dekker Inc, Pennsylvania, 2000

COLOMBIA ENERGÍA. Crudos pesados, la gran apuesta del sector. Edición 2, . Pag 22-23. enero 2013. [en línea] disponible en: www.colombiaenergia.com

CT&F - CIENCIA, TECNOLOGÍA Y FUTURO Sistema de homogenización y control de viscosidad del combustóleo - Vol. 1 Núm. 2 Dic. 1996,

DABIR S. Viswanath, Viscosity_of_Liquids, 2007

DARBY, R. Chemical Engineering Fluid Mechanics. En cap. 1-2, Marcel Dekker, Inc. New York, 1996.

EVDOKIMOV, I. N and ELISEEV, N. Y. Characteristics of Viscous Flow of Liquid Media with Resines and Asphaltenes. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, vol. 35, N° 6, 1999, pp. 377-381.

GROSSO et al., Sistema de homogenización y control de viscosidad del combustóleo, CT&F – Ciencia, tecnología y futuro – Vol. 1 Núm. 2 Dic. 1996.

NAOTO Izumo, and ATSUSHI Koiwai; Technological Background and Latest Market Requirements concerning “Static Viscosity” Measurement with a Tuning-fork Vibration Viscometer; June 1-4, 2009, Tokyo, Japan.

NEWTON Isaac, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, 1687

OLIVIER Réglat. Measuring oil viscosity in pipelines – Not easy since it’s often non-newtonian., [en línea] [citado en Octubre 18, 2012] disponible en: <http://vionectechnologies.wordpress.com;>

RAMÍREZ N., Juan Sebastián. Introducción a la reología de los alimentos. Revista ReCiTelA, 2006, Cali, Colombia.

ROBERTSON, R and STIFF, H. An improved Mathematical Model for Relating Shear Stress to Shear Rate in Drilling Fluids and Cement Slurries. SPE 5333, Soc. Petrol. Eng., vol 16, No. 1, 1976, pp. 31-36.

ROJAS O. et al, Fundamentos de la reología, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2012.

SOLARTRON MOBREY. Technical Manual No. 78275003. 7827 Viscometer.

TAYLOR, R. and SMALLING, D., A New and practical Application of Annular Hydraulics. : Annual fall meeting of the SPE of AIME, Las Vegas, NV, Sep 30 a Oct 3, 1973.

ANEXOS

Anexo A. Certificado de calibración



CALIBRATION CERTIFICATE

7827AANATEBBA VISCOMETER

SERIAL NO : 2F1521
 CAL DATE : 27MAY08
 PRESSURE TEST : 160 Bar

VISCOSITY CALIBRATION @ 20°C (2* Schedule 40)

VISCOSITY (cP)	QUALITY FACTOR
10.37	245.15
53.96	111.91
108.14	79.46
552.48	35.29
1082.21	25.26

$$\text{VISCOSITY} = V_0 + V_1.1/Q^{**2} + V_2.1/Q^{**4}$$

INSTRUMENT CHECK DATA

AIR POINT (20°C) QUALITY FACTOR =4182

VISCOSITY CODE (for 7945V/6V) = 0110

LOW RANGE (10.37-108.14) MEDIUM RANGE (108.14-1082.21)

V0 =	-1.10987E+00	-5.96783E-01
V1 =	6.89620E+05	6.86081E+05
V2 =	1.30202E+06	3.19406E+06

DENSITY CALIBRATION @ 20°C (2* Schedule 40)

DENSITY (kg/m³)	TIME PERIOD B (µsec)
0	518.947
(Air)	518.834
300	550.258
500	570.153
800	598.727
1000	617.025
1600	668.857

$$\text{DENSITY} = K_0 + K_1.TB + K_2.TB^{**2}$$

K0 = -2.34367E+03
 K1 = -2.60695E-01
 K2 = 9.20500E-03

$$Dt = D [1 + K18(t-20)] + K19(t-20)$$

K18 = -4.573E-04
 K19 = -1.041E+00

VISCOSITY CORRECTION DATA

$$Dv = Dc + [K20 + K21.1/Q^{**2} + K22.1/Q^{**4}]$$

MEDIUM RANGE

K20 = -2.95999E+00
 K21 = 4.97189E+03
 K22 = 4.53493E+06

where D = Density (uncorrected)
 Dt = Density (temperature corrected)
 Dv = Density (temp and viscosity corrected)
 TB = Time period B (µs)
 Q = Quality Factor
 t = Temperature (°C)

FINAL TEST & INSPECTION

Ref No:- LV7827/V6.2

DATE : 29MAY08