

**ESTUDIO DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA POR DSC Y DE LAS  
PROPIEDADES REOLÓGICAS DE ACEITE LUBRICANTE AUTOMOTOR  
NUEVO Y USADO, CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO<sub>2</sub>**

**CARLOS ALBERTO GORDILLO CELIS**

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

**2009**

**ESTUDIO DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA POR DSC Y DE LAS  
PROPIEDADES REOLÓGICAS DE ACEITE LUBRICANTE AUTOMOTOR  
NUEVO Y USADO, CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO<sub>2</sub>**

**CARLOS ALBERTO GORDILLO CELIS**

**Monografía para optar al título de Ingeniero Químico**

**Director**

**Rubens Maciel Filho, PhD**

**Universidade Estadual de Campinas**

**Co-Director**

**Andre Jardini, PhD**

**Universidade Estadual de Campinas**

**Lector**

**Álvaro Ramírez García, PhD**

**Universidad Industrial de Santander**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

## **DEDICATORIA**

Este documento esta dedicado a mis padres, José Leonardo y María Inés, quienes me alentaron y fijaron en mí, un hermoso esfuerzo para encontrar mi camino, a mis hermanos Clara, Germán y Javier, por el apoyo brindado, y a Beatriz M.

CARLOS ALBERTO

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Álvaro Ramírez, PhD. Ingeniero Químico y le Lector de la monografía, por sus valiosas orientaciones e invaluable gestión.

Ramiro Martínez PhD. Ingeniero Químico y director de escuela de Ing. Química.

A los profesores de Ing. Química UIS, por mi formación, orientación y guía.

También a los muchachos del laboratorio de procesos, a Linita y martica en la secretaria, por su trabajo y ayuda.

Agradezco a Rubens Maciel Filho, PhD. Ingeniero Químico y Coordinador del “Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado” (LOPCA) de la “Universidade Estadual de Campinas” (UNICAMP), por el apoyo personal y científico.

Señor Luis Pompeo, Técnico del “Departamento de Petróleo” de la “Faculdade de Engenharia Mecânica” (UNICAMP), por su colaboración.

A los Técnicos del “Laboratório de Recursos Analíticos y de Calibração” (LRAC) de la “Faculdade de Engenharia Química” (FEQ) (UNICAMP), por su guía.

A Carolina Macías, Ingeniera Química por su ayuda incondicional.

Y con especial amor, agradezco a mis padres por los valores inculcados y el enorme apoyo brindado.

# CONTENIDO

	pág.
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
CONTENIDO.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE ANEXOS.....	x
NOMENCLATURA.....	xi
RESUMEN.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	3
1.1 TÉCNICAS ANALÍTICAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS....	3
1.1.1 Principios básicos del análisis de tamaño de partícula por MASTERSIZER.....	3

1.1.2	Microscopia electrónica de Barrido (SEM).....	5
1.1.3	Análisis térmico por DSC.....	5
1.1.3.1	Capacidad calorífica específica.....	6
1.1.3.2	Entalpia.....	6
1.2	DEFINICIONES BÁSICAS.....	7
1.2.1	Nano-lubricación.....	7
1.2.2	Flujo.....	7
1.2.3	Esfuerzo de corte.....	7
1.2.4	Velocidad de corte.....	7
1.2.5	Viscosidad.....	8
1.2.6	Coefficiente de fluidez.....	8
1.2.7	Viscosidad cinemática.....	8
1.2.8	Líquidos Newtonianos.....	8
1.2.9	Reología.....	9
1.3	CONCLUSIÓN DEL CAPITULO.....	9
2.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	10

2.1 MORFOLOGÍA.....	10
2.1.1 Distribución de tamaño de partícula de la Sílica usada como aditivo.....	10
2.1.1 Forma de las partículas de Sílica.....	11
2.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	11
2.3 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC) DEL ACEITE LUBRICANTE AUTOMOTOR NUEVO Y USADO, CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> .....	12
2.4 REOLOGÍA DEL ACEITE LUBRICANTE AUTOMOTOR NUEVO Y USADO, CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> .....	13
2.5 CONCLUSIÓN DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL. ....	14
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	15
3.1 ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LA SÍLICA USADA COMO ADITIVO.....	15
3.2 ANÁLISIS DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS DE SÍLICA POR SEM.....	16
3.3 ANÁLISIS TÉRMICO POR CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC) DEL ACEITE LUBRICANTE AUTOMOTOR NUEVO Y USADO, CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> .....	18
3.4 RESULTADO DEL ESTUDIO REOLÓGICO DEL ACEITE LUBRICANTE AUTOMOTOR NUEVO Y USADO, CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO <sub>2</sub> .....	20

3.5 CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS.....	24
4. CONCLUSIONES.....	25
5. RECOMENDACIONES.....	26
BIBLIOGRAFÍA.....	27
ANEXOS.....	31

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Patrón de difracción de las partículas.....	3
Figura 2. Modelo de Mie, tiene en cuenta la difracción y difusión de la luz de la partícula y del medio. ....	4
Figura 3. Modelo Fraunhofer, difracción de la luz con igual eficiencia.....	4
Figura 4. Diagrama de bloques para el desarrollo experimental.....	10
Figura 5. Imágenes de las sílicas utilizadas como aditivos en los aceites lubricantes automotores(a) Micro-sílica; (b) Nano-sílica.....	11
Figura 6. Mastersizer, dispersión por vía húmeda.....	16
Figura 7. Imágenes de las sílicas utilizadas como aditivos en los aceites lubricantes automotores (a) Micro-sílica 500X; (b)Micro-sílica 200X.....	17
Figura 8. Imágenes de las sílicas utilizadas como aditivos en los aceites lubricantes automotores (c) Nano-sílica 5000X; (d)Nano-sílica 200X.....	17
Figura 9. Capacidades caloríficas del aceite lubricante (a) aceite lubricante nuevo con Nano-partículas de SiO <sub>2</sub> ; (b) aceite lubricante nuevo con Micro-partículas de SiO <sub>2</sub> .....	19
Figura 10. Capacidades caloríficas del aceite lubricante (c) aceite lubricante usado con Nano-partículas de SiO <sub>2</sub> ; (b) aceite lubricante usado con Micro-partículas de SiO <sub>2</sub> .....	20
Figura 11. La curva 11(a) muestra el comportamiento de la viscosidad de los lubricantes con diferentes concentraciones de nano- partículas de SiO <sub>2</sub> a temperaturas de 25, 40 y 60 °C. Curva 11(b) Velocidad vs Esfuerzo de Corte, comportamiento reológico del lubricante nuevo sin aditivos contra uno que contiene 1.0% de nano partículas de SiO <sub>2</sub> .....	22

Figura 12. Variación de la viscosidad aparente con la Velocidad de Corte del aceite nuevo sin nano-partículas y con nano-partículas de SiO <sub>2</sub> .....	23
Figura A1. Clases de Viscosidades SAE.....	32
Figura D1. Celda de DSC.....	36
Figura D 2. Esquema de una celda de DSC (VIRTO, 2005).....	37
Figura G1. T (°C) Vs Viscosidad Dinámica (mPa*s) del aceite lubricante automotor nuevo y usado.....	46
Figura G2. T (°C) Vs Viscosidad Cinemática (mm <sup>2</sup> /s) del aceite lubricante automotor nuevo y usado.....	46
Figura G3. T (°C) Vs Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) del aceite lubricante automotor nuevo y usado.....	47

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Programa para determinación de la capacidad calorífica utilizado en el DSC.....	13
Tabla 2. Tamaño de las partículas (a) micro-partículas, (b) nano-partículas.....	15
Tabla 7. Viscosidades absolutas de las 18 muestras obtenidas del reómetro rotacional Haake a temperaturas de 25, 40, 60 °C.....	21
Tabla A1. Descripción de las muestras analizadas.....	31
Tabla B2. Pesos de los aceites lubricantes utilizados para el análisis térmico por DSC.....	33
Tabla C5. Capacidades caloríficas del aceite lubricante nuevo obtenidas por DSC.....	34
Tabla C6. Capacidad caloríficas del aceite lubricante usado obtenidas por DSC.....	35
Tabla E1. Análisis típicos del lubricante.....	39

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Descripción de las muestras analizadas.....	31
Anexo B. Pesos de cada muestra utilizada para análisis por DSC.....	33
Anexo C. Tablas de los valores de las Capacidades Caloríficas obtenidas por DSC.....	34
Anexo D. Descripción del funcionamiento del DSC.....	36
Anexo E. Informaciones técnicas del aceite lubricante automotor nuevo.....	38
Anexo F. Nano Lubricación.....	42
Anexo G. Análisis de viscosidad en Viscosímetro SVM3000.....	44

## NOMENCLATURA

A: Área

$A_{\text{tran}}$ : Área transversal al flujo de calor [ $\text{m}^2$ ]

$C_P$ : Capacidad calorífica de la muestra [ $\text{J}/(\text{g } ^\circ\text{C})$ ].

$C'_P$ : Capacidad calorífica del patrón [ $\text{J}/(\text{g } ^\circ\text{C})$ ].

$d\gamma/d\tau$ : Coeficiente de fluidez

$dv/dh$ : Cambio de la velocidad a través de la distancia

F: Fuerza

FEM: Faculdade de Engenharia Mecânica

FEQ: Faculdade de Engenharia Química

K: Conductividad del material termoeléctrico

L: Longitud del disco termoeléctrico [m]

LOPCA: Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado

LRAC: Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração

m: Masa de la muestra [g].

$m'$ : Masa del patrón [g].

q: Flujo de calor para la muestra [W]

R: Resistencia del disco termoeléctrico

UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas

y: Diferencia entre el flujo de calor registrado de la muestra y una cápsula vacía a la misma temperatura [ $\text{J/s}$ ].

$y'$ : Diferencia entre el flujo de calor registrado de la referencia y una cápsula vacía a la misma temperatura [ $\text{J/s}$ ].

$\rho$ : Densidad

$\gamma$ : Velocidad de corte

$\tau$ : Velocidad de corte

$\eta$ : Viscosidad o coeficiente de viscosidad

$\nu$ : Viscosidad cinemática

$\phi$ : Coeficiente de fluidez

$\Delta T$ : Diferencia de temperatura entre la muestra y la referencia [°C]

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA POR DSC Y DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE ACEITE LUBRICANTE AUTOMOTOR NUEVO Y USADO, CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO<sub>2</sub>\*

**AUTOR:** CARLOS ALBERTO GORDILLO CELIS\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Lubricantes, SiO<sub>2</sub>, Análisis térmico, DSC, Reología

**DESCRIPCIÓN:** La determinación de la capacidad calorífica de los aceites lubricantes automotores es de fundamental importancia practica en el ramo de la ingeniería petroquímica, una vez que los valores de la capacidad calorífica puedan ser aplicados en evaluación de las propiedades termodinámicas básicas. En este trabajo fueron determinados los valores de la capacidad calorífica del aceite lubricante automotor mineral nuevo y usado, sin aditivos y con aditivos, nano y micro de SiO<sub>2</sub>, a través de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) en el intervalo de temperatura de 20 a 300 °C, con rata de temperatura 10 °C/min y nitrógeno como gas de purga.

Los resultados demostraron que la adición de 0,2 wt% de micro partículas de SiO<sub>2</sub> es la única que produce un aumento en la capacidad calorífica del aceite usado sin aditivos en todo el rango de temperatura.

Se hizo el análisis de la influencia de las partículas de SiO<sub>2</sub> en las propiedades reológicas de estos aceites lubricantes, utilizando un reómetro rotacional de geometría de platos paralelos, obteniendo datos de esfuerzo y velocidad de corte, valores de viscosidad a diferentes temperaturas.

Los datos obtenidos del análisis reológico evidenciaron un aumento de viscosidad producido por la adición de nano partículas de SiO<sub>2</sub>.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Rubens Maciel Filho, Ph.D, Universidad Estatal de Campinas. Co-Director: Andre Jardini, Ph.D, Universidade Estadual de Campinas. Lector: Álvaro Ramírez García, Ph.D, Universidad Industrial de Santander.

## ABSTRACT

**TITLE: STUDY OF THE HEAT CAPACITY BY DSC AND OF THE REOLOGICAL PROPERTIES OF NEW AND USED LUBRICANT OILS, WITH MICRO AND NANOPARTICLES OF SiO<sub>2</sub> AS ADDITIVES.\***

**AUTHOR: CARLOS ALBERTO GORDILLO CELIS\*\***

**KEY WORDS:** Lubricant Oil, SiO<sub>2</sub>, Thermal Analysis, DSC, Reology.

**DESCRIPTION:** The determination of the heat capacity of lubricant oils is of fundamental importance in the field of petrochemical engineering, once the heat capacity values may be applied in the evaluation of the thermodynamic properties. In this work, the values of the heat capacity of lubricant oil, new and used, without additives, and with nano and micro particles of SiO<sub>2</sub> as additives, were measured using Differential Scanning Calorimetry (DSC) in the temperature range of 20 to 300°C, with temperature rate of 10 °C/min, and nitrogen like purge gas.

The results showed that the addition of 0,2 wt% of SiO<sub>2</sub> microparticles is the only one that produces an increase in the heat capacity of the used lubricant oil without additives in the whole range of temperature.

The analysis of the influence of SiO<sub>2</sub> particles on the reological properties of these lubs was carried out by using a parallel-tray rotatory reometer to obtain shearing stress, rate of shear data and viscosities at different temperatures.

Data evidenced an increase in the viscosity due to the addition of SiO<sub>2</sub> nanoparticles.

---

\* Project Degree

\*\* School of Chemical Engineering. Director: Rubens Maciel Filho, Ph.D, Estate University of Campinas.  
Co-Director: Andre Jardini, Ph.D, Estate University of Campinas. Reader: Álvaro Ramírez García, Ph.D,  
Industrial University of Santander.

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la capacidad calorífica ( $C_p$ ) de los derivados del petróleo y de sus mezclas es de gran importancia práctica en el ramo de la ingeniería petroquímica, pues esta propiedad está asociada con las operaciones de refinería de petróleo y otros procesos correlacionados (ZANIER. A,1996). En el desarrollo de los motores de automóviles, el conocimiento de los valores de la capacidad calorífica en varios intervalos de temperatura para cada uno de los lubricantes analizados es de fundamental importancia, porque estos datos pueden ayudar en el estudio de la ganancia en la economía del combustible, además del establecimiento de condiciones de almacenamiento prolongado o de operaciones a bajas temperaturas.

Datos experimentales consistentes sobre la capacidad calorífica de derivados del petróleo son bastante limitados en la literatura, y algunos datos están disponibles en pequeños intervalos de temperatura para la gran mayoría de estos derivados. Diferencias en la composición del aceite lubricante automotor, con y sin aditivos, pueden resultar en significativas diferencias en la capacidad calorífica.

En los últimos años, la técnica Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) ha sido usada en la determinación de la capacidad calorífica de mezclas de hidrocarburos. Esto ocurre porque a través de este método se puede obtener resultados con gran sensibilidad y precisión.

El estudiar el comportamiento reológico de los aceites lubricantes automotores al tener partículas nano y micro de  $\text{SiO}_2$  como aditivos es de gran importancia en la industria. Saber como varia su viscosidad al enfrentar diferentes temperaturas y la influencia de estas partículas de Sílica en el comportamiento del lubricante se convertirá en un importante aporte al estudio de la nanotecnología aplicada a la lubricación.

Este trabajo aplica conceptos de nano lubricación ya estudiados en trabajos anteriores con diferentes partículas para lubricación con espesor de escala nanométrica como forma de control de las propiedades de superficie a escala nano y micro.

El aporte de este trabajo fue estimar los valores de la capacidad calorífica de un aceite lubricante automotor mineral nuevo y usado, sin aditivos y con aditivos nano y micro de  $\text{SiO}_2$  usando (DSC), y analizar la contribución de estas partículas de  $\text{SiO}_2$  en el comportamiento reológico del lubricante de uso cotidiano así como la influencia en el lubricante usado.

## 1. CONCEPTOS TEÓRICOS

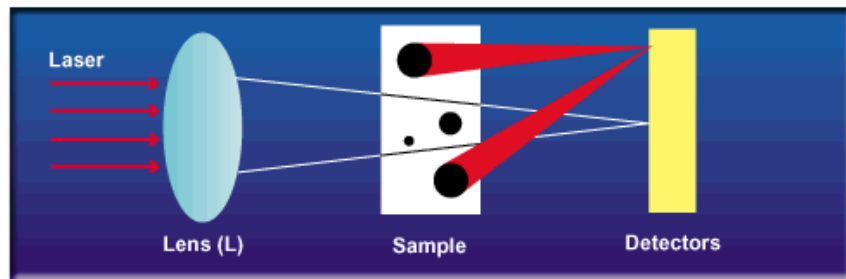
Breve descripción de las técnicas utilizadas en la caracterización de partículas de  $\text{SiO}_2$  y en el análisis de los aceites lubricantes (sección 1.1); posteriormente se da un repaso a los conceptos básicos (sección 1.2) necesarios para abordar el estudio reológico y finalmente la conclusión del capítulo (sección 1.3).

### 1.1 TÉCNICAS ANALÍTICAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS

#### 1.1.1 Principios básicos del análisis de tamaño de partícula por Mastersizer

El patrón de difracción de las partículas con igual tamaño converge para un mismo punto independientemente de sus respectivas localizaciones dentro de la célula de la muestra, como lo referencia la Figura 1. Existen muchas teorías y modelos matemáticos que pueden ser utilizados para el análisis del tamaño de partícula. Una de las teorías más simples utilizadas es el modelo de Fraunhofer. El equipo Mastersizer utiliza la teoría de Mie y también la teoría de Fraunhofer para la predicción de los tamaños.

Figura 1. Patrón de difracción de las partículas.

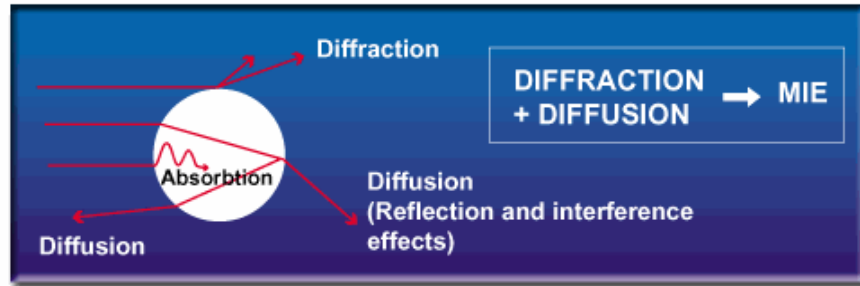


#### TEORÍA DE MIE

Considera que las partículas son esféricas y que no son opacas. De esta forma lleva en cuenta la difracción y difusión de la luz de la partícula y del medio, según Figura 2. Para utilizar este modelo es necesario conocer el complejo índice de refracción de la muestra y del medio. El modelo considera el índice de refracción real de la muestra y el imaginario, el cual representa la absorción.

Debido a la importancia de este modelo, la Malvern creó un algoritmo que permite al usuario conseguir los resultados utilizando la teoría de Mie teniendo en cuenta este índice.

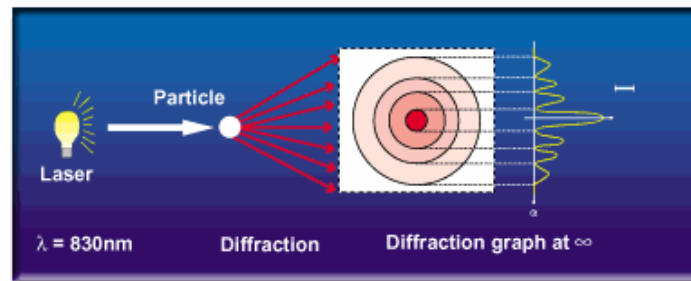
Figura 2. Modelo de Mie. Tiene en cuenta la difracción y difusión de la luz de la partícula y del medio.



## TEORÍA DE FRAUNHOFER

La teoría de Fraunhofer considera que las partículas son esféricas y no porosas ni opacas. Dice que todas las partículas difractan la luz con la misma eficiencia. En la Figura 3 se muestra esta difracción.

Figura 3. Modelo Fraunhofer. Difracción de la luz con igual eficiencia.



## MODOS DE OPERACIÓN DEL MASTERSIZER

Dispersión por vía húmeda: Muchos materiales pueden ser medidos en dispersión por vía húmeda. Estos incluyen materiales que son usados en procesos de manufactura húmedos, viscosos, como arcilla, o materiales que tienden a aglomerarse cuando están secos, tal como dióxido de titanio.

Dispersión por vía seca: Para materiales que son utilizados y/o producidos en procesos secos, tales como cemento, productos farmacéuticos y polvos micronizados (*GETTING STARTED*, Manual do equipamento Mastersizer).

### **1.1.2 Microscopia electrónica de Barrido (SEM)**

La microscopia electrónica de barrido se presenta como una técnica adecuada, pues permite alcanzar aumentos hasta 900000 veces dependiendo del material. Normalmente el aumento es del orden de 10000 veces. En la microscopia electrónica el área o micro-volumen a ser analizado es irradiado por un fino rayo de electrones en vez de la radiación de luz. Como resultado de la interacción del rayo de electrones con la superficie de la muestra una serie de radiaciones son emitidas tales como: electrones secundarios, electrones retroesparcidos, rayos-X característicos, electrones Auger, fotones, etc. Estas radiaciones cuando son captadas correctamente, proporcionaran informaciones características sobre la muestra (topografía de la superficie, composición, cristalografía, etc.). (MALISKA. A.M)

### **1.1.3 Análisis térmico por DSC**

El análisis térmico es un grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de una substancia en función de la temperatura durante una variación controlada de esta (MACKENZIE. R.C, 1979). La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una de estas técnicas y se basa en la medición del flujo de calor diferencial requerido para mantener la muestra y un material de referencia a la misma temperatura. La prueba se realiza en un intervalo de temperatura a una velocidad determinada de calentamiento. En el anexo A se encuentra disponible la base conceptual sobre el funcionamiento del equipo para análisis DSC.

#### **1.1.3.1 Capacidad calorífica específica**

Está definida como la energía necesaria para elevar en un grado la temperatura de un gramo de substancia. Si un cuerpo de masa  $m$  (g) intercambia cierta

cantidad de energía térmica  $Q$  (J) y se produce un incremento de temperatura  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), la relación entre ambas magnitudes viene dada por la ecuación 1, así:

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (1)$$

La constante  $c$  se denomina calor específico y es dependiente del tipo de sustancia. Mediante análisis DSC la capacidad calorífica de un material se puede determinar por comparación de la muestra con un patrón (Ecuación 2) (RODRIGUEZ. E, 2008):

$$C_p = \left(\frac{y}{y'}\right) \times \left(\frac{m'}{m}\right) \times C'_p \quad (2)$$

Donde:

$C_p$ : Capacidad calorífica de la muestra [ $\text{J}/(\text{g } ^{\circ}\text{C})$ ].  $C'_p$ : Capacidad calorífica del patrón [ $\text{J}/(\text{g } ^{\circ}\text{C})$ ].  $Y$ : Diferencia entre el flujo de calor registrado de la muestra y una cápsula vacía a la misma temperatura [ $\text{J}/\text{s}$ ].  $y'$ : Diferencia entre el flujo de calor registrado de la referencia y una cápsula vacía a la misma temperatura [ $\text{J}/\text{s}$ ].  $m'$ : Masa del patrón [ $\text{g}$ ].  $m$ : Masa de la muestra [ $\text{g}$ ].

### 1.1.3.2 Entalpia

La entalpia es una propiedad termodinámica cuya variación expresa la cantidad de energía intercambiada entre un sistema y su entorno bajo presión constante. El cálculo de su valor permite determinar la cantidad de energía que necesita una unidad de materia para ser calentada o enfriada desde una temperatura a otra, así como la cantidad de calor absorbido o liberado en una reacción química o cambio de fase. Su valor puede ser obtenido por calorimetría diferencial de barrido mediante la integración directa de la curva obtenida en un termograma que representa el calor específico en función de la temperatura (RODRIGUEZ. E, 2008).

## 1.2 DEFINICIONES BÁSICAS

### 1.2.7 Nano-lubricación

La Nano-lubricación puede ser definida como el arte y la ciencia necesaria para el control de la adhesión, pegajosidad, fricción y desgaste de superficies en contacto a escala micro y nano. (Ver Anexo F.)

Existen algunos conceptos básicos y terminologías específicas que son usados en el tratamiento de medidas reológicas (BRASEQ).

### 1.2.2 Flujo

Cuando se aplica un esfuerzo de corte en un líquido este origina una deformación que se denomina flujo.

### 1.2.3 Esfuerzo de corte

Esfuerzo de corte o cizalla: Cantidad de fuerza (tensión) aplicada en una determinada área del fluido. La fuerza de corte aplicada en una determinada área de un fluido en contacto con un plano estacionario es el esfuerzo, matemáticamente definido:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{\text{(fuerza)}}{\text{(área)}} = \frac{\text{dinás}}{\text{cm}^2} \quad (3)$$

### 1.2.4 Velocidad de corte

Tasa o velocidad de corte o cizalla: Se define como el cambio de velocidad  $v$  a través de la distancia  $h$  entre los dos platos. La velocidad de corte se incrementa a medida que la velocidad del plato superior aumenta y la distancia entre los dos platos se hace más pequeña.

$$\gamma = \frac{dv}{dh} = \frac{\text{velocidad}(cm/s)}{\text{dis tan cia}(cm)} = s^{-1} \quad (4)$$

### 1.2.5 Viscosidad

El fluido entre los platos resiste el movimiento del plato superior y esta resistencia al flujo es determinada por la viscosidad del fluido ( $\eta$ ).

Viscosidad o viscosidad absoluta: La viscosidad de un líquido (inverso de la fluidez) mide la resistencia interna al movimiento relativo de diferentes partes del líquido. La viscosidad mide la resistencia de un líquido a fluir y no está directamente relacionada con la densidad del líquido, que es la relación masa/volumen.

$$\eta = \frac{d\tau}{d\gamma} = \frac{F/A}{dv/dx} = \frac{\text{Esfuerzo de corte (dina/cm}^2\text{)}}{\text{velocidad de corte (s}^{-1}\text{)}} = \text{Poise} \quad (5)$$

La unidad SI de viscosidad es:

$$[\eta] = \frac{N/m^2}{ms^{-1}/m} = \frac{N/m^2}{s^{-1}} = Pa \cdot s$$

$$1 \text{ Poise} = 1 [P] = 10^{-1} [Pa \cdot s] = [10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$$

### 1.2.6 Coeficiente de Fluidez

Coeficiente de fluidez: Velocidad de corte en función del esfuerzo de corte, la derivada  $d\gamma/d\tau$  corresponde al coeficiente de fluidez.

$$\phi = 1/\eta \quad (6)$$

### 1.2.7 Viscosidad cinemática

En algunas situaciones es conveniente usar la viscosidad cinemática que es el coeficiente de viscosidad dividido por la densidad del líquido.

$$\nu = \eta/\rho \quad (7)$$

### **1.2.8 Líquidos Newtonianos**

Si el gráfico de esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte a temperatura y presión constantes fuese lineal, la viscosidad será constante e igual al coeficiente angular de la recta. La mayoría de los líquidos puros y muchas soluciones y dispersiones presentan este tipo de comportamiento y son denominados líquidos newtonianos. La cantidad  $d\tau/d\dot{\gamma}$ , en el caso de sistemas newtonianos, es la viscosidad absoluta (ecuación 5).

### **1.2.9 Reología**

Reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos.

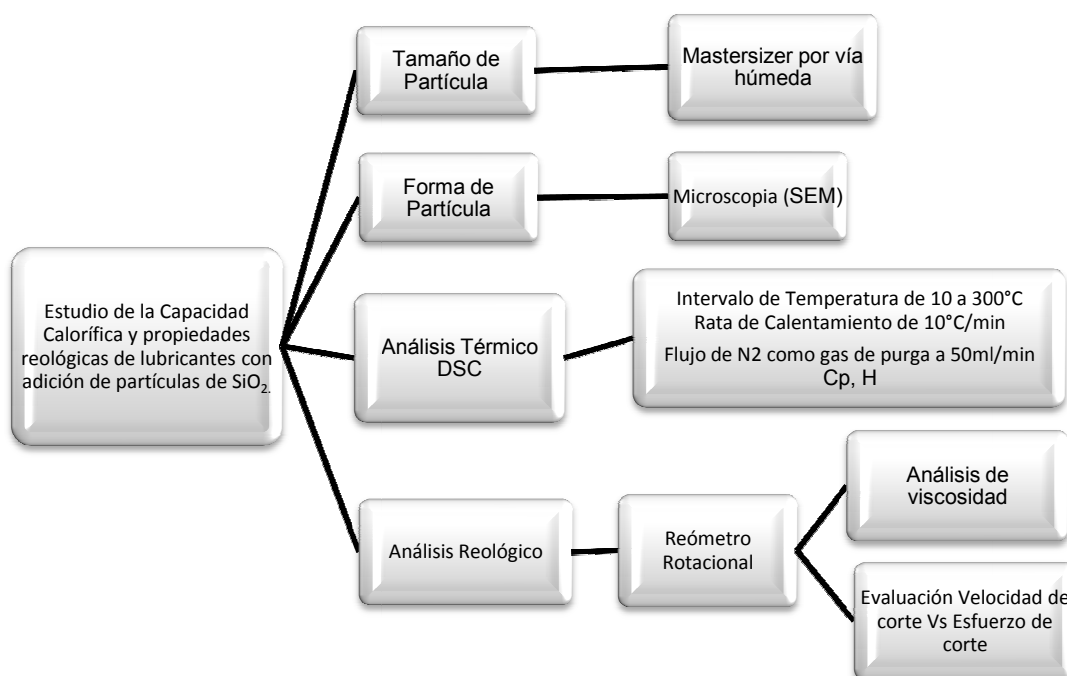
## **1.3 CONCLUSIÓN DEL CAPITULO**

La revisión bibliográfica permitió dar una perspectiva sobre las técnicas de análisis convencionales en el tamaño y forma de la partícula, así como técnicas para análisis térmico, que facilitó la escogencia de cada una de ellas.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Inicialmente se hizo una búsqueda bibliográfica sobre las investigaciones de nano partículas como aditivos en aceites lubricantes. Posteriormente se establecieron los análisis para la parte experimental como esquematiza la figura 4. Luego se realizaron las pruebas de tamaño y forma de partícula (sección 2.1.1 y 2.1.2 respectivamente). Con las partículas caracterizadas se llevó a cabo la preparación de las muestras (sección 2.2). Teniendo ya las muestra seguimos con el análisis térmico (sección 2.3) y la prueba en el reómetro rotacional (sección 2.4).

Figura 4. Diagrama de bloques para el desarrollo experimental.



### 2.1 MORFOLOGÍA.

#### 2.1.1 Distribución de tamaño de partícula de la Sílica usada como aditivo

El análisis de distribución de tamaño de las partículas fue efectuado en el Mastersizer, marca Malvern, modelo Long Bench-MAM 5005 que posee un rango de aplicación de 0,05 a 880 micrones por vía húmeda y otro de 0,5-880 micrones

por vía seca. Este análisis fue hecho por vía húmeda. El equipo está ubicado en el Laboratorio LRAC/FEQ/UNICAMP, Brasil.

El equipo Mastersizer utiliza la teoría de Mie y también la teoría de Fraunhofer para la predicción de los tamaños.

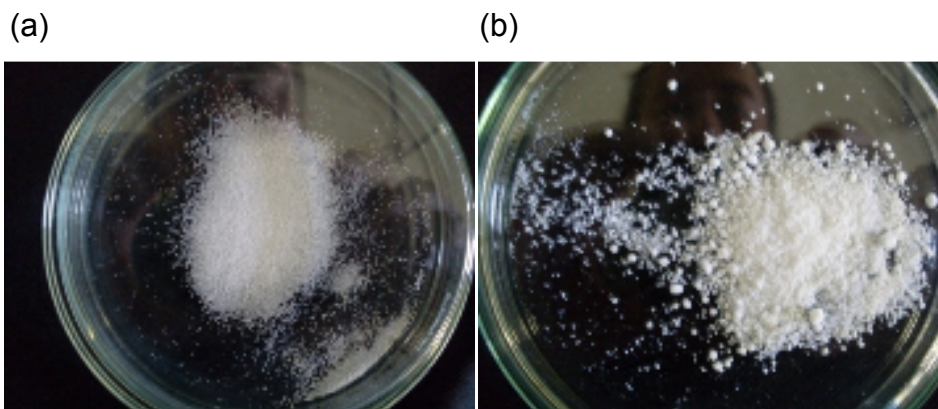
### 2.1.2 Forma de las partículas de Sílica

La forma de las partículas fue determinada por Scanning electron microscopy (SEM) en un microscopio marca Oxford modelo 7060. Las partículas fueron depositadas en un porta muestras cinta de grafito e irradiadas con una lluvia de oro. El tamaño mínimo que consigue mostrar el microscopio es de 200nm (MALISKA. A.M). El microscopio hace parte del laboratorio LRAC/FEQ/UNICAMP, Brasil.

## 2.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

La Figura 5 deja en claro la diferencia al ojo humano entre las partículas utilizadas. Son partículas de  $\text{SiO}_2$  ambas de color blanco: (a) no aglomeradas, (b) aglomeración presente.

Figura 5. Imágenes de las sílicas utilizadas como aditivos en los aceites lubricantes  
a) Micro-sílica; (b) Nano-sílica.



Las muestras de aceites lubricantes automotores nuevos fueron adquiridas en el comercio local (Campinas, Brasil) y las muestras de aceites lubricantes usados

fueron adquiridas en un puesto de gasolina (Campinas, Brasil), siendo los aceites nuevos todos producidos por industrias brasileras. En este estudio, fueron utilizados aceites lubricantes minerales nuevos con y sin aditivos, aceites lubricantes usados con y sin aditivos, todos destinados a la aplicación en motores a gasolina, alcohol y gas natural.

Para todas las muestras se utilizó una cantidad de 30 ml de aceite lubricante automotor. Se prepararon 18 muestras, 9 con aceite usado y 9 con aceite nuevo, cada una con la concentración de partículas necesaria para los análisis. La preparación de las muestras fue realizada en vasos de precipitados (Glass Beaker) con ayuda de un agitador magnético y varilla magnética a una velocidad de 700 rpm por 10 minutos cada muestra. La Tabla A1 ubicada en la sección de Anexos (Anexo A), describe el total de las muestras sometidas a análisis.

### **2.3 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC) DE LOS ACEITES LUBRICANTES AUTOMOTORES NUEVOS Y USADOS, SIN Y CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO<sub>2</sub>**

El análisis térmico del aceite lubricante automotor mineral nuevo y usado, sin aditivos y con aditivos nano y micro caracterizado por la capacidad calorífica específica, fueron determinados por la técnica de (DSC) en el laboratorio LOPCA/FEQ/UNICAMP. El calorímetro modelo DSC-823e, marca Mettler Toledo fue calibrado por un método normal de valoración automática de resultados (indium check), que es basado en mediciones de temperaturas de calor de fusión del elemento químico Indio (In). Fue utilizada una rata de calentamiento de 10,0 °C/min, en un intervalo de temperatura de 120 a 180 °C, con un peso de elemento indio (In) de 6,3 mg (MARTÍNEZ. E.L, 2007).

Una vez realizada la calibración, se procedió a analizar las muestras en cuestión. Cada muestra se pesó en balanza digital y se depositó dentro de un crisol de aluminio de 40 µL (ASTM D7042-04). La Tabla B2 ubicada en la sección de

Anexos (Anexo B) muestra los valores de los pesos para cada una de las muestras analizadas.

Seguidamente el crisol fue tapado y prensado para colocarlo dentro del horno junto a otro crisol de referencia el cual estaba vacío (ASTM E537-07). Con la muestra y la referencia en el horno, fue programado el sistema de operación del DSC, mediante el software START METTLER. Se trabajó con un método no isotérmico de análisis, y fue programada una condición dinámica, operando en un intervalo de temperatura de 10 a 300°C, con una tasa de calentamiento de 10°C/min y, con un flujo de nitrógeno como gas de purga a 50ml/min (LÉTOFFÉ, 2002), totalizando 18 muestras analizadas. Los análisis fueron realizados con base en la ejecución del programa de temperatura descrito en la Tabla 1.

Tabla 1. Programa para determinación de la capacidad calorífica utilizado en el DSC.

Rata de calentamiento (°C/min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
10	10 a 300	29

Terminado el proceso, fueron valoradas las capacidades caloríficas de cada aceite lubricante automotor mineral nuevo y usado, sin aditivo y con aditivo nano y micro. Las Figuras 9 y 10 representan una curva normal de capacidad calorífica obtenida por DSC.

## **2.4 REOLOGÍA DE LOS ACEITES LUBRICANTES AUTOMOTORES NUEVOS Y USADOS, CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO<sub>2</sub>**

El análisis reológico de todas las muestras de aceite lubricante automotor fue hecho en un Reómetro rotacional marca Haake, modelo CV20, geometría platos paralelos de 45 mm de diámetro cada plato, y distancia (h) entre platos (GAP) de 1 mm. Cada muestra fue evaluada a temperatura constante haciendo variaciones de presión dependiendo de la temperatura a la cual se realizara el análisis 25, 40 o 60 °C. La presión variaba de 0 a 100, 0 a 50 o 0 a 25 (Pa). El Reómetro

rotacional Haake esta ubicado en el departamento de petróleo (DEP/FEM/UNICAMP), Brasil.

## **2.5 CONCLUSIÓN DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL**

La caracterización de las partículas de  $\text{SiO}_2$  es un paso importante para el desarrollo de las técnicas a seguir, así como el análisis térmico y reológico. Estas técnicas no solo son fundamentales para el proceso experimental sino también para la simulación computacional del comportamiento térmico y reológico.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El capítulo inicia con los datos obtenidos por vía húmeda (en el Mastersizer) del tamaño de las nano y micro partículas de SiO<sub>2</sub> (sección 3.1). Estos últimos fueron verificados con la técnica (sección 3.2) de microscopía electrónica de barrido (SEM) además de obtener la forma de las partículas. Luego tenemos los datos del DSC en tablas y expresados en gráficos Ts Vs Cp. (sección 3.3). Se hace un análisis de la influencia del Cp en el lubricante. Por último se muestran las curvas y los datos reológicos (sección 3.4).

#### 3.1 ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LA SÍLICA USADA COMO ADITIVO

Los datos de tamaño de partícula expuestos en la Tabla 2 fueron reportados de acuerdo con la norma (ASTM E1617-07).

Tabla 2. Tamaño de las partículas (a) micro-partículas, (b) nano-partículas.

(a) Sílica Gruesa			(b) Sílica Fina		
	Replica 1	Replica 2		Replica 1	Replica 2
Lectura	D(v0,5) [µm]	D(v0,5) [µm]	Lectura	D(v0,5) [µm]	D(v0,5) [µm]
1	292,05	297,57	1	12,11	12,03
2	293,74	288,13	2	12,05	11,98
3	294,6	291,23	3	11,94	12,05
4	293,41	289,49	4	11,84	11,91
5	293,56	289,54	5	11,7	11,9
Media Lecturas	293,472	291,192	Media Lecturas	11,928	11,974
Media Replicas	292,332		Media Replicas	11,951	

Según la Tabla 2 (b), el tamaño de las partículas de sílica fina (nano-sílica) no resultó lo esperado. Lo anterior se puede corroborar con la Figura 8(c). Es recomendable hacer un análisis con microscopio de alta resolución o con el mismo SEM haciendo disolución de las nano-partículas en una solución de alcohol.

Los análisis de tamaño de partícula fueron realizados en el Mastersizer por dispersión por vía húmeda (la Figura 6 ilustra aquella dispersión) que es mejor que la dispersión por vía seca.

Figura 6. Mastersizer. Dispersión por vía húmeda.



Los valores obtenidos del tamaño de partícula de la nano-sílica son mayores de lo esperado debido a la aglomeración de las nano-partículas. Un menor valor se puede evitar con la utilización de un detergente que no deje aglomerarlas.

### 3.2 ANÁLISIS DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS DE SÍLICA POR SEM

Las Figuras 7 y 8 muestran las fotografías tomadas por el SEM de las micro y nano partículas de SiO<sub>2</sub>.

Figura 7. Imágenes de las sílicas utilizadas como aditivos en los aceites lubricantes automotores

(a) Micro-sílica 500X; (b) Micro-sílica 200X.

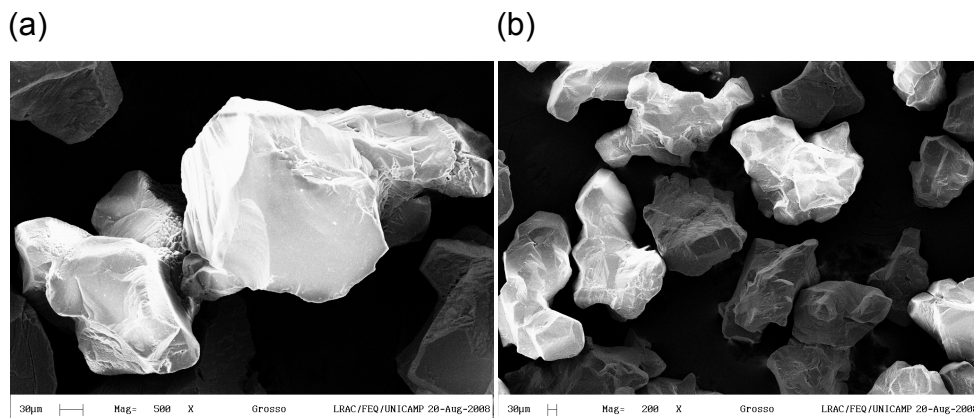
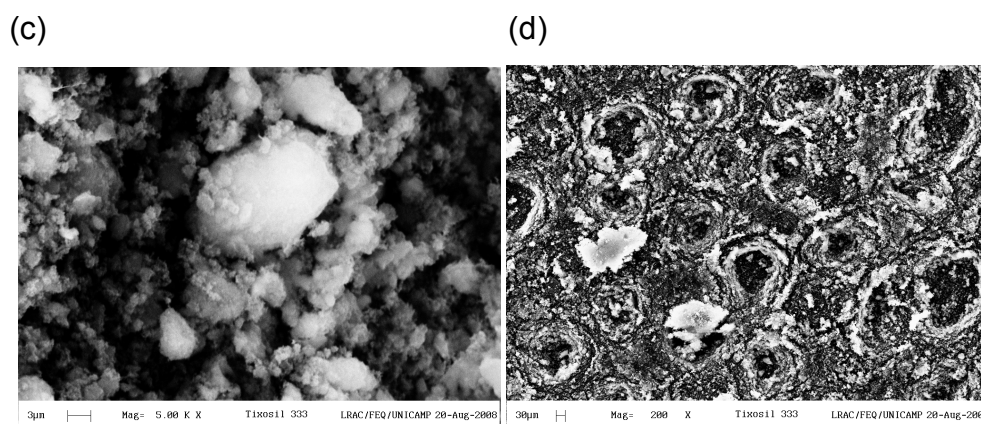


Figura 8. Imágenes de las sílicas utilizadas como aditivos en los aceites lubricantes automotores  
(c) Nano-sílica 5000X; (d) Nano-sílica 200X.



Con base en las imágenes presentadas en la Figura 7, se verifica la forma Cristalina (a) y (b) de las partículas de micro-sílica, y se valida el tamaño de estas partículas por la imagen (a) aumentada en 500X. Este tamaño concuerda con los datos del Mastersizer, con un tamaño cercano a los 290 micrones

En el caso de la Figura 8, la imagen (c) advierte que los datos de las lecturas en la Tabla 4 (b) están errados, la imagen refiere un tamaño mucho menor, cercano a los 20 nm. Es por eso que es recomendable realizar un análisis más, con microscopia. Se recomienda utilizar “Transmission electron microscopy” (TEM) para obtener imágenes con un poder de resolución mayor, cercano a medición pico (pm).

### **3.3 ANÁLISIS TÉRMICO POR CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC) DE LOS ACEITES LUBRICANTES AUTOMOTORES NUEVOS Y USADOS, CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO<sub>2</sub>**

La capacidad calorífica de los aceites lubricantes automotores fue determinada por DSC. La Tabla C5, ubicada en la sección de Anexos (Anexo C), muestra los resultados de este análisis para las muestras de aceite lubricante automotor nuevo.

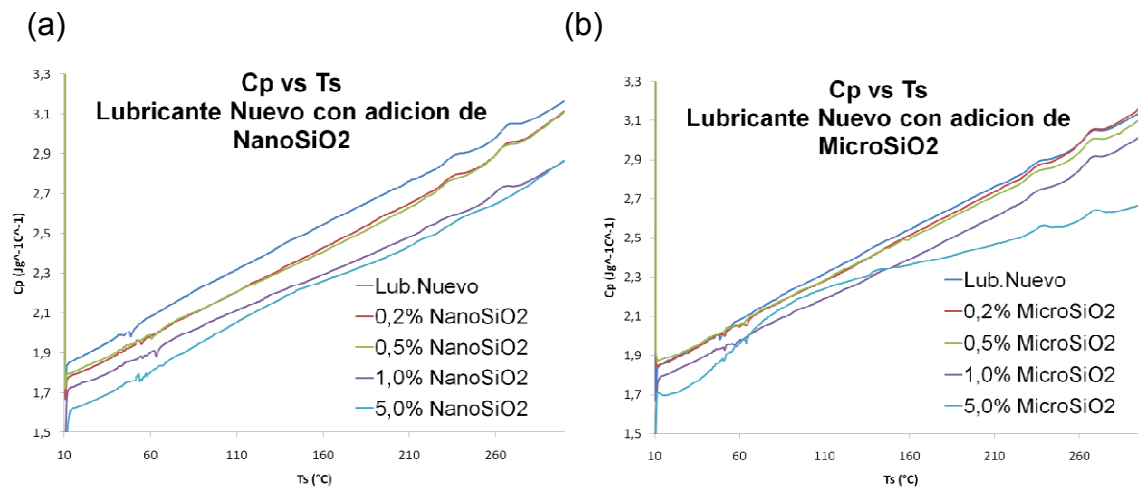
Se puede verificar que los aceites lubricantes nuevos con adición de nano y micro partículas de  $\text{SiO}_2$  presentan una capacidad de transferencia de calor menos acentuada cuando son comparados con el aceite lubricante nuevo sin adición de partículas de  $\text{SiO}_2$ . Se puede afirmar que la presencia de las partículas de  $\text{SiO}_2$  con el calentamiento, no provocan un aumento en el calor específico. La Tabla C6, ubicada en la sección de Anexos (Anexo C), muestra los resultados del análisis para las muestras de aceite lubricante usado.

Los resultado mostrados en la Tabla C6 son parecidos a los mostrados en la Tabla C5, solo que el aceite lubricante con contenido de micro-partículas de  $\text{SiO}_2$  (0,2%) presenta una capacidad calorífica más acentuada en todo el intervalo de temperatura cuando es comparado con el aceite lubricante usado sin adición de  $\text{SiO}_2$  y con otros aceites usados con adición de nano y micro partículas de  $\text{SiO}_2$ .

Seguidamente del análisis térmico de las muestras, se verificó una variación poco significativa en relación a la capacidad calorífica del aceite lubricante sin partículas de  $\text{SiO}_2$ , con excepción del aceite lubricante usado con contenido de nano partículas de  $\text{SiO}_2$  (0,5%), que presenta una caída en los valores de  $C_p$ . Este comportamiento puede deberse al proceso de polimerización que la muestra sufrió.

La Figura 9 ilustra el comportamiento de la capacidad calorífica del aceite lubricante automotor nuevo.

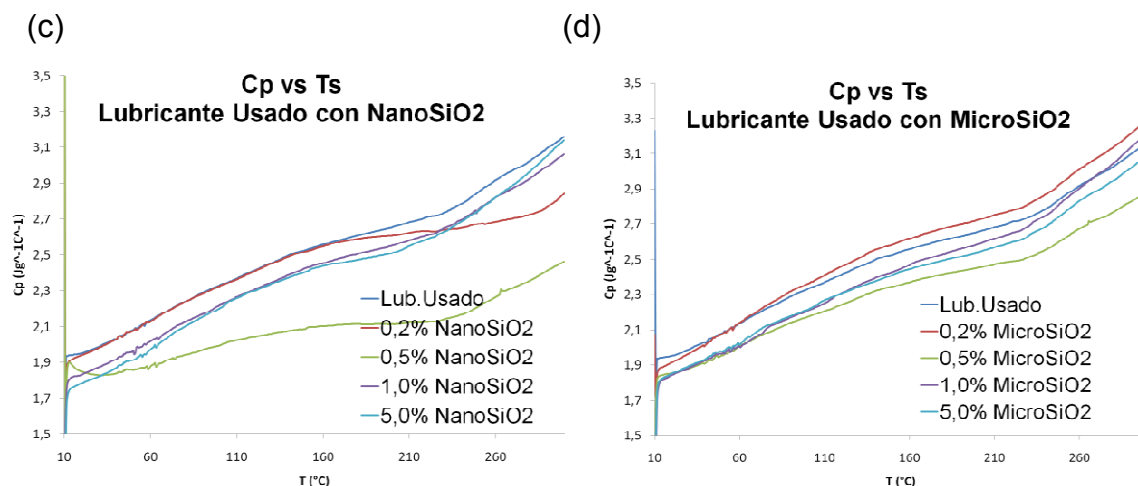
Figura 9. Capacidades caloríficas del aceite lubricante (a) aceite lubricante nuevo con Nano-partículas de SiO<sub>2</sub>; (b) aceite lubricante nuevo con Micro-partículas de SiO<sub>2</sub>.



En los gráficos presentados en la Figura 9 (a) se observa que el comportamiento de las curvas del aceite lubricante nuevo con nano-partículas de SiO<sub>2</sub> es similar en todo el intervalo de temperatura. Ninguno de los aceites presenta mayor capacidad calorífica que el aceite lubricante nuevo sin partículas.

La Figura 10 ilustra el comportamiento de la capacidad calorífica del aceite lubricante automotor usado.

Figura 10. Capacidades caloríficas del aceite lubricante (c) aceite lubricante usado con Nano-partículas de SiO<sub>2</sub>; (d) aceite lubricante usado con Micro-partículas de SiO<sub>2</sub>.



Con base en los gráficos presentados en la Figura 10 se observa que la capacidad calorífica del aceite lubricante usado con Micro-partículas (0,2%) fue en aumento encima de la temperatura de 50 °C en comparación con el aceite lubricante usado sin partículas. El aceite lubricante usado con nano-partículas (0,2%) presentó un comportamiento similar hasta 160 °C.

Los contenidos de (0,5%) de partículas de SiO<sub>2</sub> nano y micro en los aceites lubricantes usados presentaron una caída en los valores de Cp. Este comportamiento puede deberse al proceso de polimerización que la muestra sufrió.

### 3.4 RESULTADOS REOLÓGICOS DE LOS ACEITES LUBRICANTES AUTOMOTORES NUEVOS Y USADOS, CON ADICIÓN DE NANO Y MICRO PARTÍCULAS DE SiO<sub>2</sub>

La viscosidad de los aceites lubricantes con partículas SiO<sub>2</sub> fue obtenida del reómetro rotacional Haake. La Tabla 3 muestra los resultados de este análisis para las 18 muestras de aceite lubricante automotor.

Tabla 3. Viscosidades absolutas de las 18 muestras obtenidas del reómetro rotacional Haake a temperaturas de 25, 40, 60 °C.

Aditivos	%	Viscosidad (mPa.s)					
		Lubricante Nuevo			Lubricante Usado		
		25C	40C	60C	25C	40C	60C
Sin	-	334,5	175	85,84	181,8	112,8	54,6
Nano SiO <sub>2</sub>	0,2%	335,6	176,8	86,67	195	113	55,93
Nano SiO <sub>2</sub>	0,5%	340	179,9	88,24	196,7	115,8	57,34
Nano SiO <sub>2</sub>	1,0%	345,4	185,4	90	196,1	119,4	60,55
Nano SiO <sub>2</sub>	5,0%	460,5	247,1	123,4	281,6	160,4	83,92
Micro SiO <sub>2</sub>	0,2%	328,5	176,1	84,62	189,5	109,7	56,61
Micro SiO <sub>2</sub>	0,5%	327,9	175	87,76	199,4	109,8	56,67
Micro SiO <sub>2</sub>	1,0%	328,9	175,3	86,76	178,2	110	57,25
Micro SiO <sub>2</sub>	5,0%	340,7	183,1	84,65	200,6	113,5	61,91

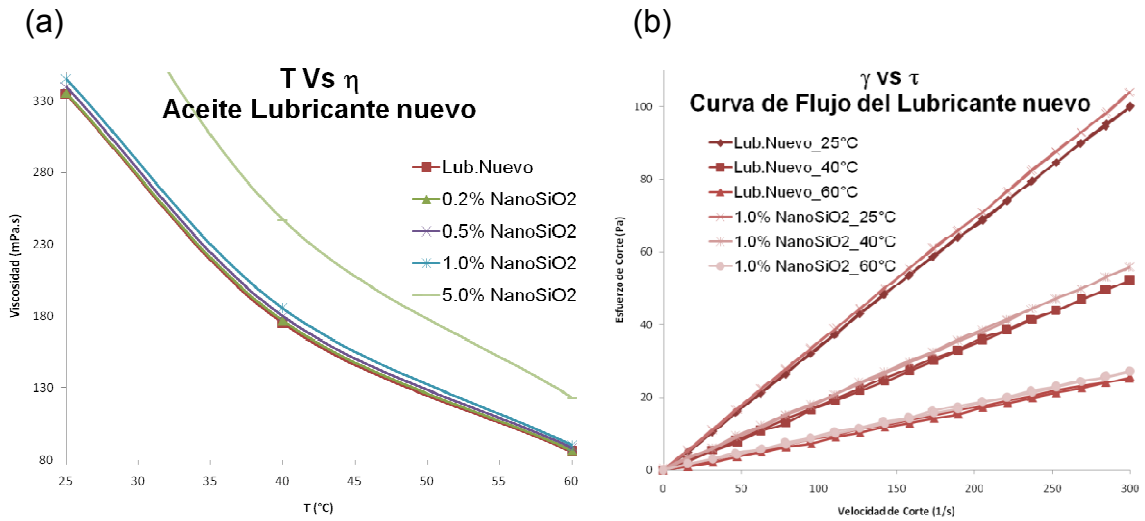
Se confirma que las nano partículas de  $\text{SiO}_2$  pueden aumentar la viscosidad del lubricante nuevo hasta en un 22%, para el caso de 5.0% de aditivo nano en lubricante nuevo. Este aumento de viscosidad tan notable no es de ayuda para los motores de vehículos comerciales porque si la viscosidad es demasiado alta, el lubricante no es capaz de llegar a todos los intersticios en donde es requerido; por el contrario, si la viscosidad es demasiado baja, la película lubricante no soporta las cargas entre las piezas y desaparece del medio sin cumplir su objetivo de evitar el contacto metal – metal (GAYBOR. L. P).

Un lubricante con las características del adicionado con 5,0% de nano partículas de  $\text{SiO}_2$  podría ser utilizado para la lubricación de cargas pesadas y rodamientos de gran envergadura. Una vez que la lubricación líquida que por acción de la temperatura deje de hacer su trabajo, entrarán en juego las nano partículas de  $\text{SiO}_2$  que formarán una capa protectora de bajo coeficiente de fricción, ubicándose en los intersticios de las paredes y formando un film protector, disminuyendo así, el desgaste de las piezas (STEPHEN. M.HSU, 2004), (LI. X, et al, 2006).

La adición de micro partículas de  $\text{SiO}_2$  en concentraciones de 0.2%, 0.5% y 1.0% al lubricante nuevo y usado, no causó beneficio notorio en la viscosidad de estos, comparada con la viscosidad del lubricante sin aditivos. Por el contrario, reportó una disminución de esta propiedad en algunas temperaturas.

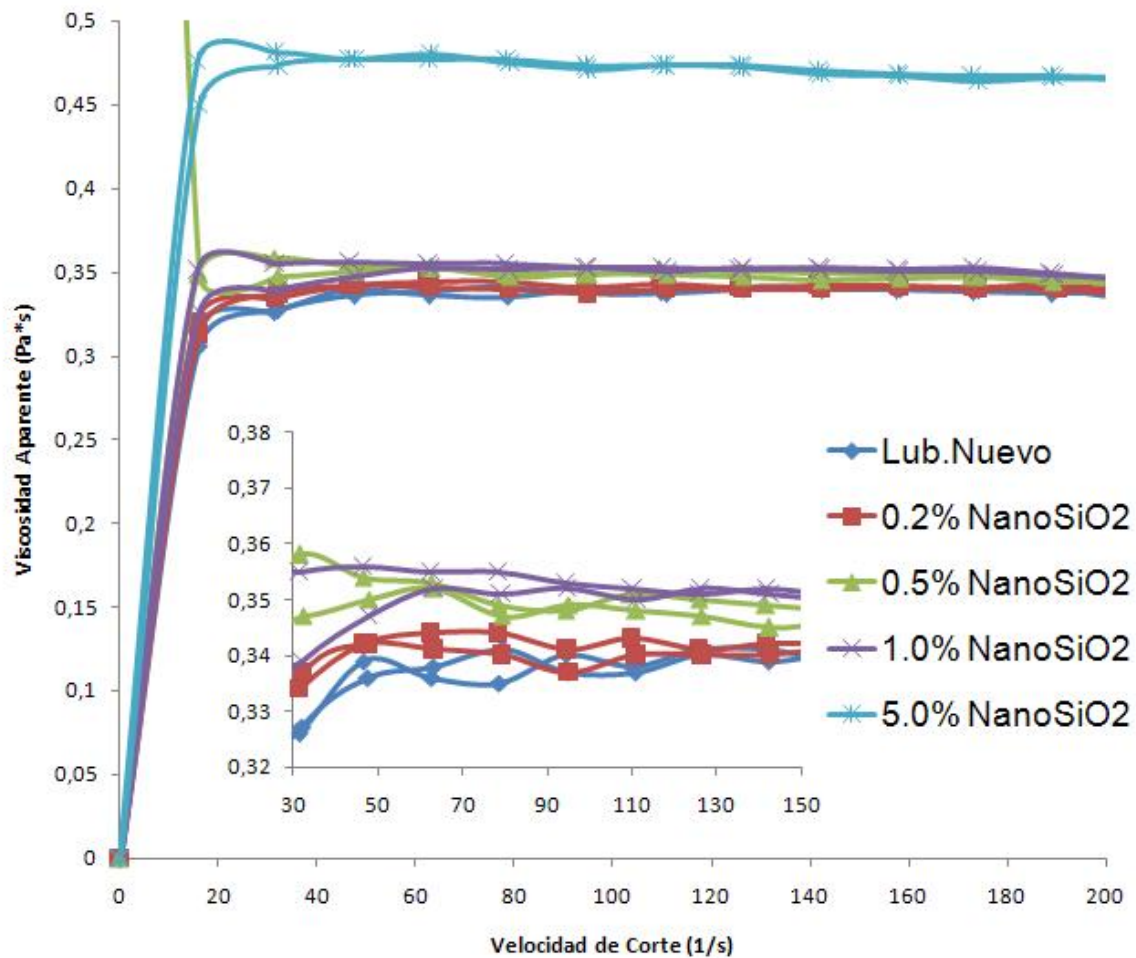
Para el siguiente análisis (Figura 11) este trabajo se concentró en los lubricantes con nano partículas de  $\text{SiO}_2$  como aditivo, basados en la información citada en (RAPOPORT et al, 1999). “Los resultados mostraron que las nano partículas de menor tamaño son las más propensas a interactuar con las superficies de fricción formando un filme protector que incrementa la habilidad anti desgaste”. La figura 11 compara el aceite lubricante nuevo sin aditivos, con los aceites que contienen 0.2%, 0.5%, 1.0% y 5.0% de nano partículas de  $\text{SiO}_2$  como aditivo.

La figura 11. La curva 11(a) muestra el comportamiento de la viscosidad de los lubricantes con diferentes concentraciones de nano partículas de SiO<sub>2</sub> a temperaturas de 25, 40 y 60 °C. Curva 11(b) Velocidad vs Esfuerzo de Corte, comportamiento reológico del lubricante nuevo sin aditivos contra uno que contiene 1.0% de nano partículas de SiO<sub>2</sub>.



En la Figura 11(a) se evidencia que el aumento de la viscosidad es proporcional a la cantidad de nano partículas de SiO<sub>2</sub> adicionada al aceite lubricante nuevo. La curva 11(b) dejó ver que los aceites con aditivos y sin aditivos exhibieron una relación lineal entre  $\tau$  y  $\gamma$ , la viscosidad es constante con respecto a estas variables lo cual significa que el fluido es Newtoniano.

Figura 12. Variación de la viscosidad aparente con la Velocidad de Corte del aceite nuevo sin Nano partículas y con nano partículas de SiO<sub>2</sub>.



En la Figura 12 se observa un aumento en la viscosidad aparente en los aceites con aditivos, proporcional a la cantidad de nano partículas de SiO<sub>2</sub> adicionada. Sin embargo a bajas velocidades de corte, ambos sistemas presentan un aumento en esta viscosidad con el aumento en la velocidad de corte que, normalmente esta asociado a un comportamiento dilatante. Este comportamiento no era esperado, pues los resultados obtenidos e ilustrados en la Figura 11(b) apuntan a un comportamiento Newtoniano. Fluidos Newtonianos presentan viscosidad aparente independiente de la tasa de deformación.

### 3.5 CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS

El uso de micro partículas de  $\text{SiO}_2$  como aditivo en el lubricante nuevo, según los datos obtenidos del análisis de forma de partícula (Cristalina), no es recomendable sin un previo análisis de fricción y desgaste ya sea con un test Tribológico Four-Ball tester o una aplicación a escala de motor con su respectiva microscopia de evaluación de las piezas de metal.

Los resultados demostraron que la adición de 0,2wt% de micro partículas de  $\text{SiO}_2$  fue la única muestra analizada que produjo un aumento en la capacidad calorífica del aceite usado sin aditivos en todo el intervalo de temperatura. Las otras muestras no reportan capacidades caloríficas por encima del valor de estas en aceites lubricantes nuevos y usados, sin aditivos.

A partir del estudio reológico comparativo para aceites lubricantes automotores nuevos y usados, con y sin adición de nano y micro partículas de  $\text{SiO}_2$  se concluye que:

- La degradación térmica sufrida durante el uso en un automotor resulta en una disminución de la viscosidad, sin embargo, partículas nano de  $\text{SiO}_2$  producen un aumento en esta propiedad.
- Se encontró una contradicción en las pruebas reológicas con todas las muestras analizadas, entre fluido Newtoniano y Dilatante, que debe ser estudiada y verificada con otras pruebas.

#### 4. CONCLUSIONES

La adición de partículas nano y micro de SiO<sub>2</sub> no produjo aumento significativo en la capacidad calorífica del aceite lubricante automotor nuevo. Lo cual nos dice que cantidad de energía necesaria para aumentar en un grado la temperatura del lubricante va a ser menor y esto no colabora en su condición como refrigerante. En el caso del aceite lubricante automotor usado, el contenido de 0,2% de micro partículas de SiO<sub>2</sub> proporcionó un aumento de la capacidad calorífica.

Con base en los datos obtenidos en el DSC, se puede concluir que existe una relación entre la temperatura de degradación inducida y la capacidad calorífica de los aceites lubricantes analizados. Esta correlación es de suma importancia para la aplicación de estos aceites, una vez que encima de la temperatura de 160 °C el uso de estos aceites irá induciendo un desgaste en las piezas de los interiores de los motores automotores debido a la pérdida de propiedades de los mismos.

Es de suma importancia no sobrepasar la temperatura de 260 °C en el uso de estos aceites debido a que es desprendido vapor que en presencia de aire, se inflama momentáneamente, al exponerlo a una llama, formando un destello ("flash"). Se corroboró con el olor percibido en todas las muestras después de que el calentamiento sobrepasara la temperatura de 260 °C en el DSC.

Los picos presentados en el intervalo de temperatura de 50 a 60 °C son las pequeñas cantidades de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) que se liberan y no representan reacciones de los aceites. Aquellas áreas debajo o encima de los picos no son significativas en el flujo de calor.

Del estudio reológico se concluye que donde mejor se evidencia un aumento de viscosidad, que a su vez es proporcional a la cantidad de nano partículas de SiO<sub>2</sub> agregadas, fue en el aceite lubricante nuevo y usado con aditivos de nano partículas de SiO<sub>2</sub>.

## 5. RECOMENDACIONES

Para trabajos futuros se recomienda realizar un test de fricción y desgaste como por ejemplo, "Four-Ball Tester", con estas muestras o con muestras propias, con el fin de observar el desgaste de las piezas por microscopia.

Realizar un ensayo más, con otro "spindle", para verificar el comportamiento anómalo observado en la sección 3.4 con respecto a la contradicción de las figuras 11(b) y 12. Para que la veracidad de este resultado sea confirmada, será necesario realizar ensayos con velocidades de corte bien menores de la mínima utilizada ( $< 0,5$  rpm) en este trabajo, lo cual no fue posible realizar debido a limitaciones del equipo disponible. Según reporte de (AZEVEDO. J.B, at el, 2005), "En velocidades mas elevadas ( $> 1$  rpm) de corte o cizalla, el comportamiento del aceite lubricante nuevo y usado es Newtoniano y la viscosidad aparente del aceite lubricante usado siempre es inferior a la del nuevo."

## BIBLIOGRAFÍA

ADÃO. B, DIAS. J.C.M, SILVA. P.F.R, FARO. M.S, *Método alternativo para o ensaio de viscosidade cinemática em petróleo e derivados*. ENQUALAB. REMESP. São Paulo, 2005.

APPENDIX F. *API guidelines for sae viscosity–grade engine testing*, 2007

ASTM D2270-04. *Standard Practice of Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 and 100°C*, 2004.

ASTM D445-06. *Standar Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)*, 2006.

ASTM D7042-04. *Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity)*, 2004

ASTM E1269-05. *Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry*, 2005.

ASTM E1617-07. *Standard Practice for Reporting Particle Size Characterization Data*, 2007.

ASTM E473-07b. *Standard Terminology Relating to Thermal Analysis and Rheology*, 2007.

ASTM E537-07. *Standard Test Method for The Thermal Stability Of Chemicals By Differential Scanning Calorimetry*, 2007.

ASTM E986-04. *Standard Practice for Scanning Electron Microscope Beam Size Characterization*, 2004.

AZEVEDO. J.B, DE CARVALHO. L.H, FONSECA. V.M, *Propriedades Reológicas de Óleos Lubrificantes Minerais e Sintéticos com Degradação em Motor Automotivo*, Memórias del “3° Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás”. Universidade Federal de Campina Grande, 2005.

BRASEQ, Brasileira de equipamentos Ltda. *Viscosidade e Reologia: Noções Básicas*.

CELIS. O, *Avaliação da técnica de craqueamento térmico de resíduos pesados e ultra-pesados de petróleo utilizando radiação laser*. Tese de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. 2008.

GAYBOR. L. P, *Viscosidad y lubricación en motores*. Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ingeniería Industrial, Diseño de Maquinas.

GETTING STARTED, Manual do equipamento Mastersizer.

ILER. R.K, *The chemistry of silica*. New York John Wiley & Sons, 1979.

LI. X, CAO. Z, ZHANG. Z, DANG. H, *Surface-modification in situ of nano-SiO<sub>2</sub> and its structure and tribological properties*. En: Elsevier Science Publishers, 2006.

MACKENZIE. R.C, *Thermochemical. Acta*, En:Elsevier Science Publishers. B.V Amsterdam. Vol. 28.1979. pág. 1.

MALISKA. A.M, *Microscopia eletrônica de varredura e microanálise*, UFSC, EMC, LABMAT, LCMAI.

MARTÍNEZ. E.L, *Calorímetro por Escaneamento Diferencial, “Differential Scanning Calorimetry”, (DSC)*. UNICAMP, FEQ, LABDPQ, 2007.

MOURA. C.R.S, and CARRETEIRO. R.P, *Lubrificantes e Lubrificação, Lifros Técnicos e Científicos*. Editora S.A, 1975.

PETROBRAS, Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ - Lubrax SJ, Julio 2003.

PETROBRAS, Informações Técnicas - Lubrax SJ 20W 50, Enero 2001.

RAPOPORT. L, FELDMAN. Y, HOMYONFER. M, COHEN. H, SLOAN. J, HUTCHISON. J.L, *Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants:structure–function relationship*. En: Wear 225–229 (1999) 975–982.

RAPOPORT. L, LESHCHINSKY. V, LVOVSKY. M, LAPSKER. I, VOLOVIK. YU, FELDMAN. Y, POPOVITZ-BIRO. R, TENNE. R, *Superior tribological properties of powder materials with solid lubricant nanoparticles*. En: Elsevier Science Publishers, 2003.

RODRIGUEZ. E, *Análisis Entálpico Diferencial*. Disponible en: <<http://www.usal.es/~Inorganica/zona-alumnos/erf-tecnespec/Analisis%20Entalpico%20Diferencial.pdf>>. Acceso en Agosto 2008.

STEPHEN. M.HSU, *Nano-lubrication concept and design*. En: Elsevier Science Publishers, 2004.

[www.lubrificantes.net](http://www.lubrificantes.net)

[www.malvern.co.uk](http://www.malvern.co.uk)

[www.particle-size-analyzer.com](http://www.particle-size-analyzer.com)

ZANIER. A, JACKLE. H. W, *Heat capacity measurements of petroleum fuels by modulated DSC*. Thermochim. Acta, v. 287, p. 203-212, 1996.

## ANEXOS

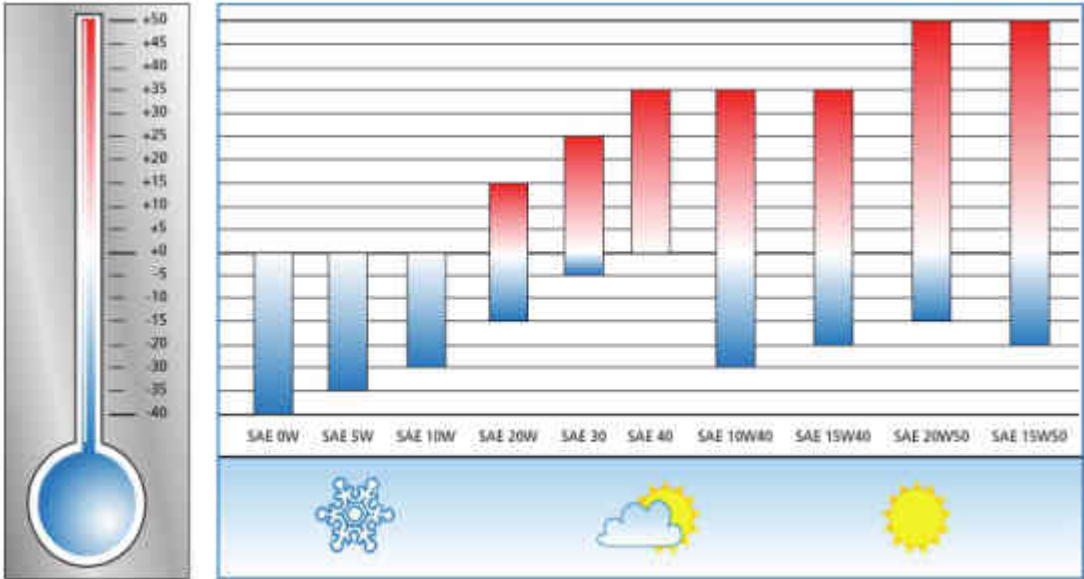
### Anexo A. Descripción de las muestras analizadas.

Tabla A1. Descripción de las muestras analizadas.

# Muestra	Lubricantes	Tipo		Contenido Partículas		
		Marca	Estado	Grado SAE	% SiO <sub>2</sub>	
					Nano	Micro
1	Lubrax SJ	Nuevo	20W 50	-	-	
2	Lubrax SJ	Nuevo	20W 50	0,2	-	
3	Lubrax SJ	Nuevo	20W 50	0,5	-	
4	Lubrax SJ	Nuevo	20W 50	1,0	-	
5	Lubrax SJ	Nuevo	20W 50	5,0	-	
6	Lubrax SJ	Nuevo	20W 50	-	0,2	
7	Lubrax SJ	Nuevo	20W 50	-	0,5	
8	Lubrax SJ	Nuevo	20W 51	-	1,0	
9	Lubrax SJ	Nuevo	20W 50	-	5,0	
10	Desconocida	Usado	desconocido	-	-	
11	Desconocida	Usado	desconocido	0,2	-	
12	Desconocida	Usado	desconocido	0,5	-	
13	Desconocida	Usado	desconocido	1,0	-	
14	Desconocida	Usado	desconocido	5,0	-	
15	Desconocida	Usado	desconocido	-	0,2	
16	Desconocida	Usado	desconocido	-	0,5	
17	Desconocida	Usado	desconocido	-	1,0	
18	Desconocida	Usado	desconocido	-	5,0	

Las clases de viscosidades tienen varios institutos de clasificación. Los más conocidos son SAE, API, AGMA e ISO VG.

Figura A1. Clases de Viscosidades SAE



## Anexo B. Pesos de cada muestra utilizada para análisis por DSC.

Tabla B2. Pesos de los aceites lubricantes utilizados para el análisis térmico por DSC.

Aceite Lubricante automotor	Peso (mg)
Nuevo sin partículas	9,41
Nuevo con nano-partículas (0,2%)	9,31
Nuevo con nano-partículas (0,5%)	9,50
Nuevo con nano-partículas (1,0%)	9,71
Nuevo con nano-partículas (5,0%)	9,63
Nuevo con micro-partículas (0,2%)	9,21
Nuevo con micro-partículas (0,5%)	9,61
Nuevo con micro-partículas (1,0%)	9,86
Nuevo con micro-partículas (5,0%)	9,54
Usado sin partículas	9,33
Usado con nano-partículas (0,2%)	9,30
Usado con nano-partículas (0,5%)	9,88
Usado con nano-partículas (1,0%)	9,23
Usado con nano-partículas (5,0%)	9,74
Usado con micro-partículas (0,2%)	9,41
Usado con micro-partículas (0,5%)	9,94
Usado con micro-partículas (1,0%)	9,63
Usado con micro-partículas (5,0%)	9,75

## Anexo C. Tablas de los valores de las Capacidades Caloríficas obtenidas por DSC.

Tabla C5. Capacidades caloríficas del aceite lubricante nuevo obtenidas por DSC.

Aceite Lubricante	Cp (J g <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )													
	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C	140°C	160°C	180°C	200°C	220°C	240°C	260°C	280°C	300°C
Nuevo														
Novo sin aditivos	1,9769	2,0813	2,1811	2,27459	2,36259	2,45928	2,5434	2,63085	2,71746	2,79973	2,90132	2,9796	3,06479	3,16177
Nuevo 0,2% NanoSiO <sub>2</sub>	1,8888	1,9816	2,0773	2,16173	2,25627	2,33979	2,4251	2,51395	2,60793	2,69571	2,80009	2,8932	2,9889	3,11167
Nuevo 0,2% MicroSiO <sub>2</sub>	1,9669	2,0467	2,1574	2,24013	2,32253	2,41759	2,5133	2,60115	2,69164	2,78185	2,8837	2,9791	3,07477	3,18886
Nuevo 0,5% NanoSiO <sub>2</sub>	1,9017	1,9887	2,0834	2,16397	2,24753	2,3262	2,4054	2,49442	2,58423	2,68025	2,78264	2,8922	2,98262	3,10714
Nuevo 0,5% MicroSiO <sub>2</sub>	1,9756	2,06	2,1618	2,24401	2,33117	2,41987	2,4926	2,58171	2,67141	2,75548	2,8522	2,9349	3,02214	3,12802
Nuevo 1,0% NanoSiO <sub>2</sub>	1,8195	1,9018	1,9966	2,07555	2,14931	2,22572	2,2926	2,36613	2,44273	2,52988	2,6034	2,7029	2,76486	2,86282
Nuevo 1,0% MicroSiO <sub>2</sub>	1,8981	1,9759	2,0714	2,15181	2,22808	2,31508	2,3914	2,47725	2,56495	2,65559	2,75499	2,8439	2,93498	3,04241
Nuevo 5,0% NanoSiO <sub>2</sub>	1,7146	1,8023	1,9049	2,00465	2,10123	2,19015	2,2608	2,3225	2,39341	2,47879	2,57438	2,6479	2,74681	2,86545
Nuevo 5,0% MicroSiO <sub>2</sub>	1,803	1,9603	2,1141	2,20782	2,26969	2,33217	2,3629	2,39973	2,44447	2,48879	2,56367	2,5891	2,63262	2,6826

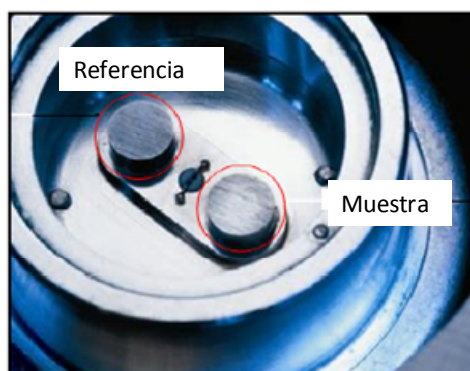
Tabla C6. Capacidad caloríficas del aceite lubricante usado obtenidas por DSC.

Aceite Lubricante Usado	Cp (J g <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )													
	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C	140°C	160°C	180°C	200°C	220°C	240°C	260°C	280°C	300°C
Usado sin aditivos	2,0252	2,1358	2,2397	2,32935	2,4128	2,49825	2,5559	2,60915	2,65456	2,70983	2,78404	2,9156	3,02442	3,16079
Usado 0,2% NanoSiO <sub>2</sub>	2,0288	2,1276	2,2381	2,32514	2,40742	2,49146	2,5469	2,59	2,60934	2,63499	2,6509	2,6838	2,72704	2,8437
Usado 0,2% MicroSiO <sub>2</sub>	2,0112	2,1401	2,2615	2,36118	2,45793	2,55349	2,6175	2,67472	2,7206	2,77676	2,86549	3,0092	3,13358	3,28703
Usado 0,5% NanoSiO <sub>2</sub>	1,8384	1,8763	1,9437	1,99422	2,04287	2,07697	2,1038	2,11594	2,11501	2,12667	2,16519	2,2649	2,35814	2,46434
Usado 0,5% MicroSiO <sub>2</sub>	1,9092	2,0064	2,0985	2,17096	2,24202	2,31921	2,37	2,41497	2,45031	2,48831	2,55145	2,672	2,76649	2,87954
Usado 1,0% NanoSiO <sub>2</sub>	1,9181	2,0177	2,1259	2,22057	2,30609	2,38833	2,4553	2,50581	2,55096	2,61002	2,6936	2,8182	2,9264	3,06401
Usado 1,0% MicroSiO <sub>2</sub>	1,927	2,0034	2,1291	2,20861	2,30583	2,39392	2,4653	2,52959	2,58522	2,64774	2,74643	2,9012	3,04236	3,21496
Usado 5,0% NanoSiO <sub>2</sub>	1,8685	1,9725	2,1012	2,20208	2,29922	2,37386	2,4377	2,4745	2,51058	2,58772	2,68397	2,8189	2,96452	3,14065
Usado 5,0% MicroSiO <sub>2</sub>	1,9359	2,015	2,1377	2,21529	2,3049	2,37665	2,4421	2,49411	2,53871	2,59499	2,68403	2,8278	2,94557	3,08636

## Anexo D. Descripción del funcionamiento del DSC.

En un DSC el calor fluye hacia la muestra y hacia el material de referencia a través de un disco termoeléctrico de *constantan* (aleación metálica con 60% de cobre y 40% de níquel) calentado eléctricamente. Las cápsulas de aluminio portadoras de la muestra y de la referencia se colocan sobre plataformas elevadas en el disco de *constantan*.

Figura D1. Celda de DSC



La diferencia de flujo de calor entre la muestra y la referencia se determina mediante el equivalente térmico de la ley de Ohm (VIRTO, 2005):

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad (8)$$

Donde:

q: Flujo de calor para la muestra [W]

$\Delta T$ : Diferencia de temperatura entre la muestra y la referencia [°C]

$$R = \frac{L}{K \times A_{tran}} : \text{Resistencia del disco termoeléctrico} \left[ \frac{^{\circ}C}{W} \right] \quad (9)$$

Donde:

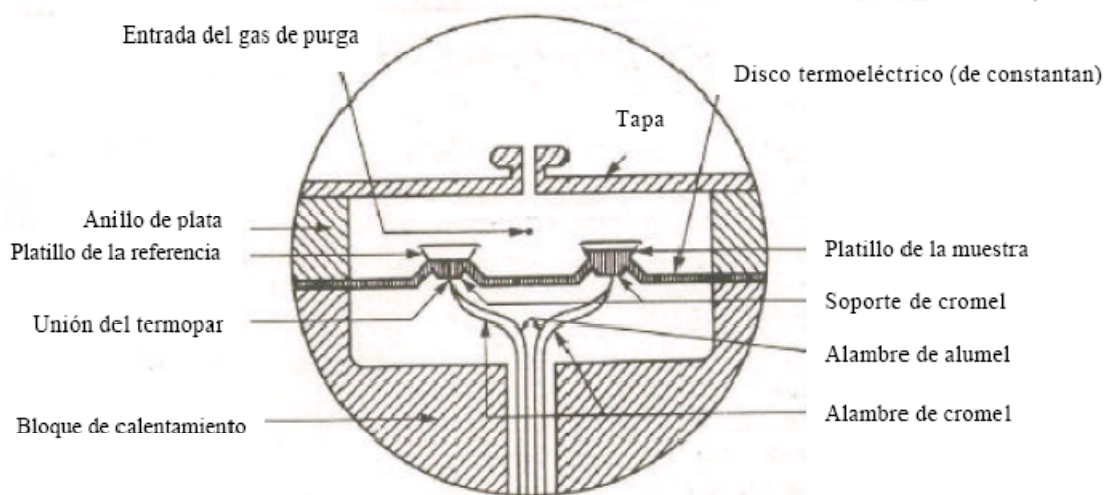
L: Longitud del disco termoeléctrico [m]

K: Conductividad del material termoeléctrico  $\left[ \frac{W}{m \ ^{\circ}C} \right]$

$A_{tran}$ : Área transversal al flujo de calor [ $m^2$ ]

La diferencia entre el flujo de calor para ambas capsulas se controla mediante termopares de superficie de *chromel/constantan* formados por la unión entre la plataforma de *constantan* y los discos de *chromel* sujetos a la parte inferior de la plataforma. La diferencia entre la cantidad de calor que fluye para las dos cápsulas es directamente proporcional a la diferencia en la salida en las dos uniones del termopar (SKOOG, 2001) La temperatura de la muestra se estima por la unión de *chromel/alumel* colocada debajo de la muestra. (Figura D2)

Figura D 2. Esquema de una celda de DSC (VIRTO, 2005).



El equipo DSC trabaja con un software asociado que permite construir sistemas de análisis térmicos y además realiza las siguientes funciones:

Proporciona una interface entre el operador y el instrumento de análisis.

Permite realizar los experimentos y almacenar los datos experimentales.

Ejecuta los programas de análisis de datos facilitando el análisis de resultados.

## **Anexo E. Informaciones técnicas del aceite lubricante automotor nuevo.**

### **Informaciones técnicas (PETROBRAS, 2001)**

#### **LUBRAX SJ**

Aceite multigrado de elevado desempeño para uso en los modernos motores a gasolina y alcohol, y a los adaptados para el uso de gas natural, que atiende a los niveles de desempeño API-SJ. Puede ser usado en substitución a los aceites con nivel API SE, SF, SG y SH. Disponible en el grado SAE 20W/50.

**LUBRAX SJ** controla la formación de borras y depósitos, así mismo a altas temperaturas, reduciendo el desgaste y la corrosión de las partes lubricadas.

**LUBRAX SJ** posee una elevada resistencia a la oxidación y adición que otorga a el aceite una elevada estabilidad térmica.

**LUBRAX SJ** posee un excelente desempeño en cualquier temperatura y permite partidas rápidas, así mismo a bajas temperaturas.

**LUBRAX SJ** es recomendado para uso en todos los motores a gasolina y alcohol de vehículos nacionales o importados, siendo compatible con los aceites lubricantes para motores de cuatro tiempos a gasolina y alcohol disponibles en el mercado.

**LUBRAX SJ** atiende a los niveles de desempeño API-SJ, siendo calificado en el API de acuerdo con los protocolos de la CMA (Chemical Manufacturers Association).

Aditivos - anticorrosivo, antidesgaste, antiespumante, antioxidante, detergente, dispersante, agente de reserva alcalina, mejorador de el índice de viscosidad y minorizador de el punto de fluidez.

Tabla E1. Análisis típicos del lubricante.

GRADO SAE		20W/50
Densidad a 20/4 °C		0,8846
Ponto de Fulgor (VA)	°C	240
Ponto de Fluidez	°C	-24
Viscosidad a 40 °C	(cSt)	183,7
Viscosidad a 100 °C	(cSt)	20,8
Índice de Viscosidad		134
Cenizas Sulfatadas	(% peso)	0,5

Los análisis típicos representan los valores modales de la producción, sin constituir especificaciones.

### Composición y información sobre los ingredientes (PETROBRAS, 2003)

#### PREPARADO

**Naturaleza química:** Aceite lubricante formulado a partir de aceites minerales de petróleo de tipo parafínico, debidamente refinados, compuestos de hidrocarburos de los tipos alcanos y cicloalcanos, con contenidos menores de hidrocarburos poliaromáticos; y con adición específica para atendimento de las características de desempeño.

**Ingredientes o impurezas que contribuyan para el peligro:** Hidrocarburos parafínicos;  
Hidrocarburos naftenicos;  
Hidrocarburos aromáticos;  
Hidrocarburos poliaromáticos:  
bajos contenidos;  
Aditivos: 15,9% (v/v)  
Azufre (CAS 7704-34-9): Max. 1%  
(p/p)

## PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

### Aspecto

-Estado Físico:	Líquido limpio y brillante.
-Color:	Castaño claro a castaño oscuro.
-Olor:	Característico de aceites lubricante.
<b>pH:</b>	No se aplica (producto no dissociable).

### Temperaturas específicas

-Punto de ebullición:	No se aplica.
-Punto de fusión:	No se aplica.
<b>Punto de fulgor:</b>	240 °C (vaso abierto).
<b>Punto de combustión:</b>	> 260 °C.
<b>Limites de explosividad en el aire:</b>	No se aplica (producto no inflamable).

**Presión de vapor:** < 5 mmHg @ 20 °C.

**Densidad:** 0,8846 @ 20/4 °C.

### Solubilidad

-En agua:	Insoluble.
-en solventes orgánicos:	Miscible en solventes de hidrocarburos.

### Estabilidad y reactividad

Condiciones específicas

Inestabilidad: Estable a temperatura ambiente y sobre condiciones normales de uso.

Reacciones peligrosas: Reacciona exotérmicamente cuando en contacto con oxidantes fuertes. Se calienta encima de 60 °C, puede liberar pequeña cantidad de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).

Materiales/Substancias incompatibles:

Productos peligrosos de descomposición:

Materiales fuertemente oxidantes.

Combustión normal genera esencialmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua y pequeñas cantidades de óxidos de zinc (Zn), fósforo (P), nitrógeno (N) Y azufre (S). Combustión incompleta puede producir monóxido de carbono (CO).

## **Anexo F. Nano Lubricación**

### **Nano-lubricación: Conceptos y diseño (STEPHEN, M.HSU, 2004)**

Este trabajo aplica conceptos de nano lubricación ya estudiados en trabajos anteriores con diferentes partículas, para lubricación con espesor de escala nanométrica como forma de control de las propiedades de superficie a escala nano y micro.

La Nano-lubricación puede ser definida como el arte y la ciencia necesaria para el control de la adhesión, pegajosidad, fricción y desgaste de superficies en contacto a escala micro y nano.

#### **1. Principios de lubricación tradicional**

El principio básico de la lubricación tradicional es evitar el contacto usando la presión hidrostática de un fluido lubricante o usando química para generar un filme protector de las superficies. Las características de una buena película lubricante son: buena adhesión; buena cohesión; suficiente espesor en relación con la aspereza de la superficie, y el modo de desgaste para el efecto de protección para conseguir protección para las condiciones de contacto. El filme también permite redistribuir tensiones en la interface, proporciona una capa fácilmente rompible e incrementa el área real de contacto.

#### **2. Propiedades nano-lubricantes del filme**

##### **2.1. Adhesión**

La fuerza de adhesión depende de la naturaleza de los enlaces, del número de enlaces por molécula (en moléculas de alto peso molecular) y de la orientación molecular y de la densidad de empaquetamiento por unidad de área.

Las moléculas tienden a enlazarse preferencialmente a los defectos superficiales y a los sitios de alta energía (dislocaciones, defectos reticulares, etc).

## **2.2. Materiales y Triboquímica**

Las reacciones químicas entre las moléculas y la superficie bajo condiciones de frotamiento, dependen de la naturaleza de los enlaces de la superficie y del potencial químico entre la molécula y la estructura de la superficie. La química de superficie de la sílica es bien conocida (ILER. R.K, 1979).

Es sabido que la sílica reacciona con agua formando silica gel y ácido silícico, a través de la ruta alcoxídica.

## **2.3. Resistencia al desgaste y propiedad de auto-reparamiento**

Si el espaciado entre las moléculas es mayor que el tamaño o el volumen molecular individual, el filme se comporta como un líquido o como una mezcla sólido-líquido. La durabilidad del filme se incrementará debido a la facilidad de movimiento de las moléculas para alojar esfuerzos, pero la magnitud del esfuerzo cortante puede disminuir. El tamaño molecular también influencia la resistencia cortante del filme cuando el tamaño de la molécula es mayor que el radio de la teoría del contacto de Greenwood. Si el tamaño molecular es suficientemente grande y varias asperezas se encuentran en contacto con la misma molécula, la resistencia cortante aumentará debido a la gran cantidad de energía necesaria para romper la molécula bajo movimiento cortante.

La nanolubricación ha sido examinada sistemáticamente y ciertos principios han sido propuestos a fin de proporcionar protección efectiva a la superficie.

El principio básico de la nanolubricación, es importante para el avance del campo de la lubricación.

## **Anexo G. Análisis de viscosidad en Viscosímetro SVM3000.**

**Viscosidades de los aceites lubricantes.** (ADÃO. B, at el, 2005).

Primeramente se realizó un análisis del aceite lubricante automotor sin aditivos en el Viscosímetro SVM3000. Estos datos no fueron incluidos en el cuerpo del documento porque no eran apropiados para realizar el análisis con los datos obtenidos en el reómetro rotacional.

### **VISCOSÍMETRO SVM3000**

La viscosidad del aceite lubricante nuevo y usado fue medida en el Viscosímetro Stabinger, modelo SVM3000. El viscosímetro hace mediciones en un intervalo de temperatura de -20 °C a 100 °C. Las mediciones fueron realizadas en un intervalo de temperatura de 20 °C a 100 °C con una precisión de 0,005 °C, según la norma (ASTM D7042-04).

### **Medida de las Viscosidades y densidades de los aceites lubricantes**

La viscosidad del aceite tiene importancia fundamental en la lubricación hidrodinámica. La viscosidad de un fluido es la propiedad que determina el valor de su resistencia al cizallamiento. La viscosidad es debida, primeramente, a la interacción entre las moléculas del fluido (MOURA. C.R.S, 1975).

De acuerdo con la norma ASTM (“American Society of Testing Materials”), tenemos las siguientes definiciones:

“Viscosidad absoluta (dinámica) de un líquido newtoniano es la fuerza tangencial sobre el área unitaria de uno de dos planos paralelos separados de una distancia unitaria cuando el espacio es lleno con el líquido y uno de los planos se mueve en relación a otro con velocidad unitaria en su propio plano. La unidad cgs de

viscosidad dinámica o absoluta  $\mu$  es el poise, que tiene las dimensiones, gramos por centímetro por segundo”

“Viscosidad cinemática de un líquido newtoniano es el cociente de la viscosidad dinámica o absoluta dividida por la densidad,  $\mu/d$ , ambos a la misma temperatura. La unidad cgs de la viscosidad cinemática  $\nu$  es el Stock, que tiene las dimensiones, centímetros cuadrados por segundo. Es práctica común en la industria del petróleo expresar la viscosidad cinemática en centistoks (cSt). Un Stock equivale a 100 cSt”

“Líquido newtoniano (simple) es aquel en el cual la velocidad de corte (“rate of shear”) es proporcional al esfuerzo de corte (“shearing stress”).”

“Densidad,  $d$ , es el peso en el vacío (masa) de el volumen unitario de material en la temperatura establecida. La unidad cgs de densidad es gramos por centímetro cúbico.”

Figura G1. T (°C) Vs Viscosidad Dinámica (mPa\*s) de los aceites lubricantes automotores nuevo y usado.

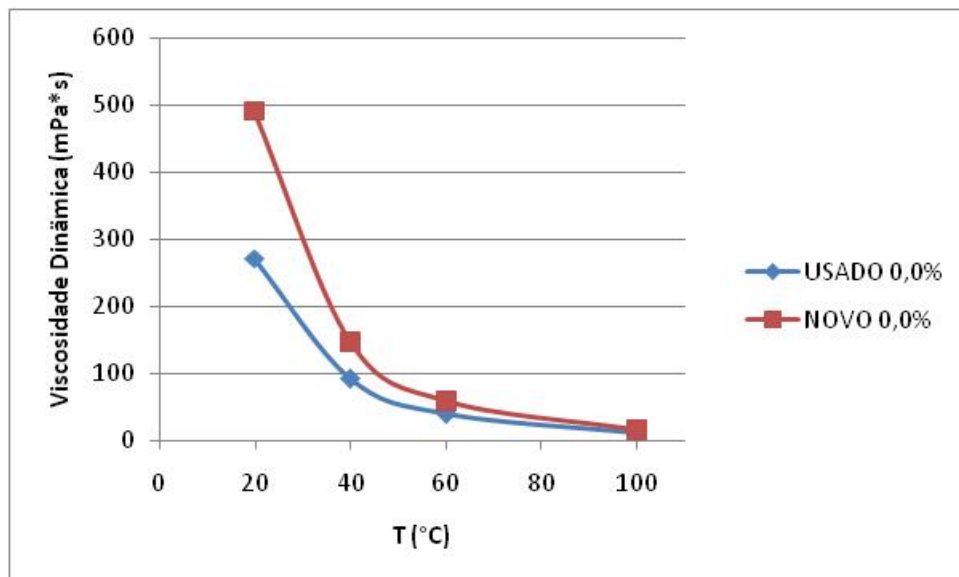


Figura G2. T (°C) Vs Viscosidad Cinemática (mm<sup>2</sup>/s) de los aceites lubricantes automotores nuevo y usado.

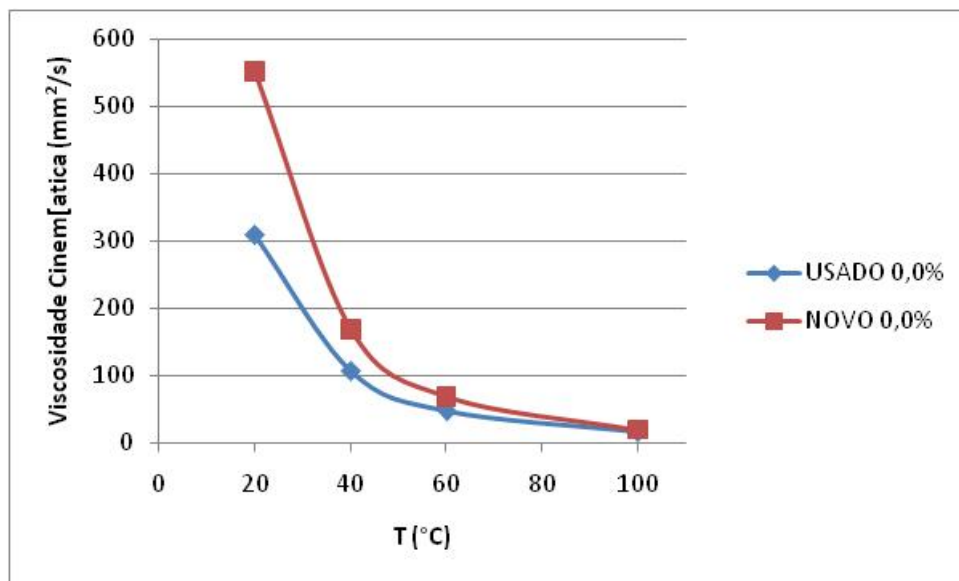
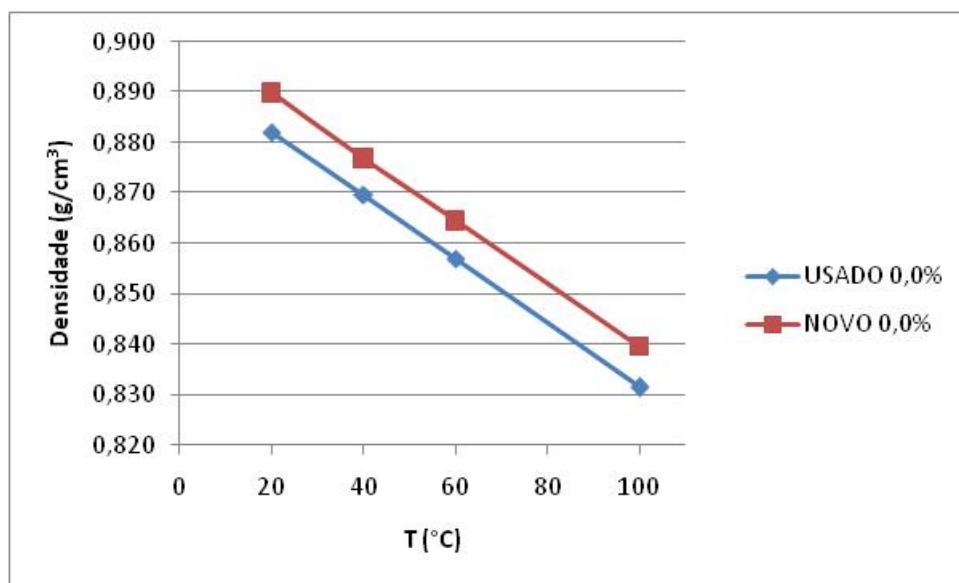


Figura G3. T (°C) Vs Densidad (g/cm<sup>3</sup>) de los aceites lubricantes automotores nuevo y usado.



Los resultados en las Figuras G1 y G2 muestran valores mayores de viscosidad en el aceite lubricante automotor nuevo comparado con los valores de viscosidad del aceite lubricante automotor usado. Sin embargo cuando la temperatura va aumentando estos valores de viscosidad se van acercando uno con el otro.

La Figura G3 es una representación lineal de los datos de densidad de los dos aceites sin aditivos. El valor de la densidad es mayor para el aceite lubricante a cualquier temperatura