

# **CAPITULO 3**

## **3. OBTENCION EXPERIMENTAL DE UN FLUIDO MAGNETORREOLOGICO CASERO Y DETERMINACION DE SU VISCOSIDAD BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE PRUEBA.**

En esta sección se presenta la preparación de un FMR básico. Además, se medirá la viscosidad a este fluido resultante cambiando ciertos parámetros en la toma de datos.

### **3.1. Selección y descripción de los elementos de un FMR casero.**

De acuerdo a lo analizado en el capítulo anterior, un FMR consta esencialmente de tres elementos: partículas magnéticamente polarizables (PHC), un líquido transportador (lubricante), y un agente estabilizador (grasa).

El PHC que va a ser usado es el de *grado CC*. Esta serie es producida por la reducción con hidrógeno. Sus propiedades son:

- ✓ El tamaño de las partículas de hierro varían entre 3 y 10 micrones. Esta propiedad es la más importante, porque si las partículas son muy grandes, se tiene un rápido asentamiento en la suspensión; pero si las partículas son muy pequeñas, el efecto MR disminuye.
- ✓ Partículas no aglomeradas, primariamente.
- ✓ Mecánicamente suave.
- ✓ Excelentes cualidades de compactación.
- ✓ Contenido de hierro arriba de 99,5%.
- ✓ Bajo contenido de carbón, nitrógeno y oxígeno.

Generalmente, un FMR típico tiene entre 20% y 40% de partículas de hierro por volumen.



**Figura 3.1 Polvo de Hierro Carbonyl grado CC.**

En el Apéndice B se muestran las especificaciones técnicas, certificado de análisis y las hojas de seguridad del PHC grado CC.

El lubricante que se va a emplear es el *Aceite 3 en 1*, por ser liviano y tener viscosidad baja.



**Figura 3.2 Aceite 3 en 1.**

En el Apéndice C se anexan las hojas de seguridad del aceite mencionado.

La grasa a utilizar es la *Grasa Blanca de Litio*, porque puede trabajar a altas temperaturas, tiene buena resistencia al agua (es decir, puede tolerar la adición de este líquido sin modificar su estructura y desempeño), y tiene excelente estabilidad mecánica

(o sea, tiene resistencia a los cambios permanentes debido a las aplicaciones de fuerzas de cizallamiento).



**Figura 3.3 Grasa Blanca de Litio.**

En el Apéndice D se encuentran la descripción general y las hojas de seguridad de dicha grasa.

### **3.2. Procedimiento experimental de mezclado.**

Para preparar aproximadamente 100 ml de FMR se requiere:

- ◆ 156 gramos de PHC grado CC.
- ◆ 55 gramos de aceite 3 en 1.
- ◆ 5 gramos de grasa blanca de Litio.
- ◆ Un recipiente plástico de 150 ml, de boca ancha y tapa roscable.

Para obtener mayores volúmenes de FMR se aumenta la cantidad de los tres primeros elementos en la misma proporción.

Debido a que se va a llevar a cabo un proceso experimental, es necesario el uso de mandil, gafas de protección y guantes.

El método de mezclado consiste en:

- a)** Medir correctamente las cantidades de PHC grado CC, aceite 3 en 1 y grasa blanca de Litio.
- b)** Colocar el aceite y la grasa dentro del recipiente plástico y cerrarlo.
- c)** Agitar vigorosamente el recipiente por cinco minutos.
- d)** Dejar descansar la mezcla por dos horas. Esto permitirá que la grasa se disuelva en el aceite.
- e)** Agitar nuevamente el recipiente por cinco minutos.
- f)** Añadir a la mezcla la mitad de la cantidad del PHC grado CC, y revolver.
- g)** Cuando la mezcla se vea uniforme, agregar la cantidad remanente del PHC, y continuar revolviendo hasta que vuelva a parecer homogéneo.
- h)** Finalmente, colocar la suspensión resultante en un mezclador de pintura, y batir por 10 minutos.



**Figura 3.4 FMR agitándose en una mezcladora de pintura.**

Para el presente trabajo se prepararon cuatro muestras de FMR, de 300 ml cada una.

### **3.3. FMR resultante.**

Presenta las siguientes características:

- + Su color es gris oscuro.
- + Tiende a asentarse. Por ser un FMR casero no cuenta con aditivos especiales (viscosificadores) que retarden este efecto.
- + Es similar al fluido MRF-122-2ED fabricado por Lord Corporation (en el Apéndice E se adjunta la información del mencionado FMR).



**Figura 3.5 Fluido Magnetorreológico resultante.**

Como se había mencionado anteriormente, la resistencia máxima de un FMR está dada por el porcentaje de las partículas de hierro por volumen. Sabiendo la masa y la densidad del PHC grado CC, y el volumen de la muestra de FMR, se tiene:

$$V_{\text{Fe}} = \frac{m_{\text{Fe}}}{\rho_{\text{Fe}}} = \frac{468 \text{ g}}{7.8 \text{ g/cm}^3} = 60 \text{ cm}^3 = \underline{\underline{60 \text{ ml}}}$$

$$\text{Porcentaje de Fe} = \frac{V_{\text{Fe}}}{V_{\text{FMR}}} \times 100\%$$

$$\text{Porcentaje de Fe} = \frac{60 \text{ ml}}{300 \text{ ml}} \times 100\%$$

Porcentaje de Fe = 20%
------------------------

Si se quiere lograr mayor resistencia en el fluido, se debe disminuir la cantidad de aceite en 10 gramos y mantener constantes los demás valores. Sin embargo, la suspensión resultante sería muy espesa.

### 3.4. Viscosidad del FMR.

Básicamente, la viscosidad es la resistencia a fluir. Uno de los factores que afecta su valor es la temperatura, ya que mientras más caliente esté una sustancia, será menos viscosa. Además, es una de las propiedades más importantes de un FMR, dado que ésta cambia drásticamente al aplicar un estímulo magnético. Esta transformación, de estado líquido a pastoso, es lo que permite tener una amplia gama de aplicación con estos fluidos.

A fin de tener un panorama más amplio del comportamiento del FMR resultante, se evaluará la viscosidad bajo las siguientes condiciones de prueba:

- ① A temperatura ambiente, aplicando un campo magnético constante.
- ② Variando la temperatura, aplicando un campo magnético constante.
- ③ A temperatura ambiente, sin aplicar campo magnético.

Los experimentos se realizaron en tres muestras iguales de 200 ml cada una.

### 3.4.1 Descripción de los equipos y materiales utilizados.

Para llevar a cabo las pruebas experimentales, se necesitó lo siguiente:

*Vaso de precipitación:* Dentro de éste se colocó el FMR. Tiene una capacidad de 250 ml, su marca es Pyrex.



**Figura 3.6 Vaso de precipitación Pyrex.**

*Bastón agitador:* Servía para batir manualmente al FMR.



**Figura 3.7 Bastón agitador.**

*Termómetro:* Se empleaba para medir la temperatura al FMR.



**Figura 3.8 Termómetro.**

Sus datos son:

**TABLA 5**

**Especificaciones Técnicas del Termómetro**

<i>Marca</i>	Boeco
<i>Tipo</i>	Inmersión total
<i>Rango de temperaturas</i>	-20°C hasta 110°C

*Bobina:* Sirve para crear el campo magnético requerido.

En las terminales del alambre se colocaron un par de lagartos para la correspondiente conexión con la batería.



**Figura 3.9 Bobina.**

Sus datos son los siguientes:

**TABLA 6**

**Datos de la Bobina**

<i>Material conductor</i>	Alambre de Cobre # 16
<i>Número de vueltas (N)</i>	370
<i>Longitud (L)</i>	0,06 metros
<i>Resistencia</i>	1,4 $\Omega$
<i>Corriente que circula (I)</i>	8,75 A

*Batería:* Es la fuente de voltaje del sistema.



**Figura 3.10 Bateria.**

Sus datos técnicos son los siguientes:

**TABLA 7**

**Datos de la Bateria**

<i>Marca</i>	Bosch
<i>Modelo</i>	42 Standard
<i>Voltaje en vacío (Voltios)</i>	12.90
<i>Voltaje en carga (Voltios)</i>	12.25
<i>Vida útil (años)</i>	1½ a 2

En el Apéndice F se encuentra la información técnica de la batería.

*Mezclador:* Se empleó para revolver el FMR antes de cada prueba, a fin de lograr homogeneidad.



**Figura 3.11 Mezclador.**

Sus datos técnicos son:

**TABLA 8**

**Especificaciones Técnicas del Mezclador**

<i>Marca</i>	Hamilton Beach
<i>Modelo</i>	727W
<i>Tipo</i>	DM01
<i>Voltaje</i>	120 V
<i>Frecuencia</i>	50 – 60 Hertz
<i>Velocidades</i>	2

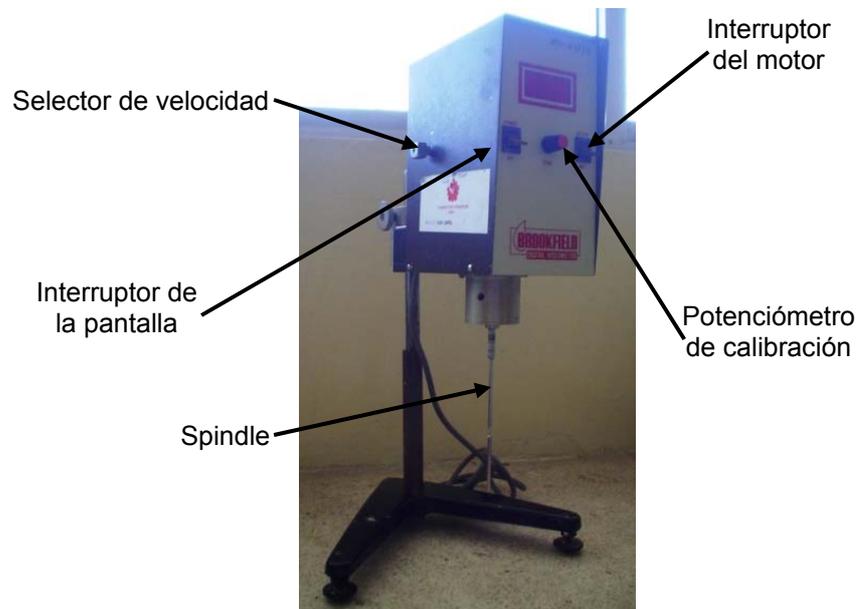
*Hidrómetro:* Proporcionaba la temperatura y la humedad del ambiente.



**Figura 3.12 Hidrómetro.**

*Viscosímetro:* Se utilizaba para medir la viscosidad del FMR. Consta de las siguientes partes:

- Selector de velocidad de rotación.
- Interruptor para encender la pantalla.
- Potenciómetro de calibración para encerar la pantalla antes de cada medición.
- Interruptor para encender el motor eléctrico.
- Spindle, que al girar mide la viscosidad de la suspensión.



**Figura 3.13 Viscosímetro.**

Sus datos técnicos son:

TABLA 9

## Especificaciones Técnicas del Viscosímetro

<i>Marca</i>	Brookfield
<i>Modelo</i>	RVTD
<i>Serie</i>	A02132
<i>Tipo</i>	Cono/Plato
<i>Rango de velocidad (rpm)</i>	5 hasta 100
<i>Precisión de la velocidad (rpm)</i>	±0,5
<i>Rango de la viscosidad (cP)</i>	100 hasta 13 millones
<i>Número de Spindles</i>	7
<i>Tipo de Spindles</i>	RV
<i>Presentación de datos</i>	Pantalla digital
<i>Voltaje</i>	120 V
<i>Frecuencia</i>	60 Hertz

Los spindles están numerados del 1 al 7, siendo el Spindle RV-1 para sustancias poco viscosas, y el Spindle RV-7 para sustancias muy viscosas. Para tomar la medición de la viscosidad, se sumerge dentro de la sustancia el spindle

adecuado hasta la marca respectiva, es decir hasta donde el cuerpo del éste tiene un diámetro menor.



**Figura 3.14 Juego de Spindles.**

Cada Spindle tiene su correspondiente factor de conversión con respecto a una velocidad determinada. Dicho factor se lo multiplica por el valor que muestra la pantalla del equipo, y esta cantidad resultante es la viscosidad de la sustancia expresada en cP. En el Apéndice G, que contiene la norma D2196-99 de la ASTM (American Society for Testing and Materials), se presentan los factores de conversión de los Spindles.

*Agitador Magnético – Calentador:* Se lo utilizó para elevar la temperatura del FMR.



**Figura 3.15 Agitador Magnético – Calentador.**

Los datos técnicos son los siguientes:

**TABLA 10**

**Especificaciones Técnicas del Agitador Magnético - Calentador**

<i>Marca</i>	Cole Parmer
<i>Modelo</i>	307N0035
<i>Rango de velocidad de agitación (rpm)</i>	0 hasta 1200
<i>Precisión de la velocidad (rpm)</i>	±20
<i>Rango de la temperatura</i>	0°C hasta 380°C
<i>Precisión de la temperatura</i>	±2%
<i>Material del Plato</i>	Aluminio
<i>Voltaje</i>	120 V
<i>Frecuencia</i>	60 Hertz

*Multímetro:* Se lo usó para controlar que el voltaje de la batería fuera siempre el mismo, y para medir la resistencia de la bobina y la corriente que pasa por ésta.



**Figura 3.16 Multímetro.**

### **3.4.2 Cálculo de B, H, y $\mu$ . [13]**

Para los FMRs, la relación entre la densidad de campo magnético (B) y la intensidad de campo magnético (H) no es lineal; depende de la fracción porcentual de las partículas de hierro por volumen. Por esta razón, la permeabilidad del FMR ( $\mu_{\text{FMR}}$ ) no es constante, y está en función de H.

La siguiente ecuación puede ser usada para estimar la relación entre B y H para cualquier FMR:

$$B = 1,91(\pi^{1,133}) \left[ 1 - e^{(-10,97 \times \mu_0 \times H)} \right] + H \mu_0 \quad (3.1)$$

donde  $\pi$  es la fracción de hierro por volumen,  $\mu_0$  es la permeabilidad del espacio libre,  $H$  está en A/m y  $B$  está en Tesla.

Sabiendo los datos de la bobina (Tabla 6), se calcula el valor de H:

$$H = \frac{NI}{L}$$

$$H = \frac{370 \text{ (8,75 A)}}{0,06 \text{ m}}$$

$$H = 53.958,33 \text{ A/m}$$

Sabiendo H y la fracción de hierro por volumen (0,2), se halla el valor de B:

$$B = 1,91(\pi^{1,133}) \left[ 1 - e^{(-10,97 \times \mu_0 \times H)} \right] + H \mu_0$$

$$B = 1,91(0,2^{1,133}) \left[ 1 - e^{(-10,97 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 53.958,33)} \right] + 53.958,33 (4\pi \times 10^{-7})$$

$$B = 0,23 \text{ Tesla}$$

Entonces, la permeabilidad del FMR es igual a:

$$\mu_{\text{FMR}} = \frac{B}{H\mu_0}$$

$$\mu_{\text{FMR}} = \frac{0.23 \text{ T}}{53.958,33 \text{ A/m} (4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A})}$$

$$\mu_{\text{FMR}} = 3,39$$

### 3.4.3 Medición de la viscosidad puntual del FMR.

Para obtener el valor promedio de la viscosidad del FMR se realizó cinco veces el ensayo para cada una de las tres muestras, y se obtuvo un valor promedio para cada medición. Además, se las hizo bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad.

#### Procedimiento Experimental.

a) Nivelar el viscosímetro.



**Figura 3.17** Visor de nivelación del Viscosímetro.

- b) Colocar el spindle RV-7 por tratarse de una sustancia muy viscosa.



**Figura 3.18 Spindle RV-7.**

- c) Colocar el selector de velocidades en 0,5 rpm. Se selecciona esta velocidad para que el movimiento rotacional del spindle no acelere el asentamiento del FMR.



**Figura 3.19 Selector de velocidades del Viscosímetro.**

- d) Mezclar con el bastón agitador el FMR durante 1 minuto.



**Figura 3.20 Mezcla del FMR con bastón agitador.**

- e) Tomar y anotar la temperatura inicial del FMR.



**Figura 3.21 Toma de temperatura del FMR con termómetro.**

- f) Tomar y anotar la temperatura y humedad del ambiente (ver Figura 3.12.).
- g) Revolver el FMR con el mezclador durante 1 minuto, para que se homogenice la suspensión. Se utiliza la velocidad más baja, porque el choque de las partículas

de hierro hacen que se eleve demasiado la temperatura del fluido.



**Figura 3.22 Agitación del FMR con mezclador.**

- h) Volver a tomar y a anotar la temperatura del FMR (ver Figura 3.21.).
  
- i) Colocar el vaso de precipitación con el FMR dentro de la bobina, y ubicarlo debajo del cuerpo del viscosímetro. El spindle se lo sitúa a un extremo del vaso de precipitación, debido a que en este lugar el campo magnético es más fuerte.



**Figura 3.23 Colocación del FMR en el Viscosímetro.**

- j) Bajar el cuerpo del viscosímetro dentro del vaso de precipitación, para sumergir el spindle hasta la marca respectiva.



**Figura 3.24 Colocación del spindle dentro del FMR.**

- k) Encender el interruptor de la pantalla del viscosímetro.
- l) Encerar el viscosímetro con el potenciómetro de calibración.



**Figura 3.25 Viscosímetro encendido.**

m) Conectar la bobina a la batería.



**Figura 3.26 Conexión de la bobina con la batería.**

n) Encender el motor del viscosímetro.

o) Cuando se establezca la lectura en la pantalla del viscosímetro, anotar el dato visualizado. El tiempo de espera es, generalmente, 1 minuto.



**Figura 3.27 Toma de viscosidad del FMR.**

- p)** Desconectar la bobina de la batería.
- q)** Apagar la pantalla y el motor del viscosímetro.
- r)** Levantar el cuerpo del viscosímetro.
- s)** Tomar la temperatura final de la suspensión (ver Figura 3.21.).
- t)** Repetir el procedimiento desde el paso d hasta el paso s por cuatro ocasiones para cada muestra de FMR.
- u)** Una vez llenada la respectiva tabla de datos, se multiplica cada dato obtenido en el paso o por el correspondiente factor de conversión del spindle RV-7 a

la velocidad de 0,5 rpm. El resultado calculado es la viscosidad expresada en cP.

- v) Finalmente, se calcula el promedio de estos resultados para determinar la viscosidad puntual del FMR en condiciones ambientales.

Las condiciones iniciales de la prueba son:

**TABLA 11**

**Condiciones Iniciales para la prueba de Viscosidad Puntual del FMR**

<i>Temperatura inicial del FMR</i>	25°C
<i>Temperatura ambiente</i>	25°C
<i>Humedad relativa</i>	70%
<i>Spindle</i>	RV-7
<i>Velocidad</i>	0,5 rpm
<i>Factor de corrección</i>	80.000
<i>Densidad de campo magnético</i>	0,23 Tesla
<i>Tiempo de estabilización</i>	1 minuto

Los datos obtenidos (promedio) son:

**TABLA 12**

**Datos y Resultados obtenidos en la prueba de  
Viscosidad Puntual del FMR**

<b>Dato</b>	<b><math>T_{final\ mezcla}</math> (°C)</b>	<b><math>T_{final}</math> (°C)</b>	<b>Valor</b>	<b>Viscosidad (cP)</b>
1	27	30	20,4	1'632.000
2	27	30	20,7	1'656.000
3	27	30	20,6	1'648.000
4	27	30	20,6	1'648.000
5	27	30	20,6	1'648.000

La  $T_{final\ mezcla}$  es la temperatura del FMR después de la revolverlo con el mezclador. La  $T_{final}$  es la temperatura de la suspensión después de la medición de la viscosidad. Este ligero aumento en la temperatura se debe al calentamiento producido por la bobina.

El valor promedio es:

$$\text{Viscosidad Puntual FMR} = 1'646.400 \text{ cP (1.646,4 Pa.s)}$$

Este resultado se encuentra dentro de los parámetros esperados, dada la estructura pastosa del FMR en presencia del campo magnético. Además, este valor es compatible con la viscosidad de la manteca de cerdo (ver Tabla 3).

En el Apéndice H se encuentran las tablas de datos y resultados de las tres muestras de FMR.

#### **3.4.4 Medición de la viscosidad puntual del FMR variando la temperatura.**

En esta prueba se evaluó la viscosidad del FMR a diferentes temperaturas para apreciar su consecuente comportamiento. Al igual que en el experimento anterior, se realizó cinco veces el ensayo a las tres muestras de FMR para cada temperatura específica, y se obtuvo un valor promedio para cada medición. El incremento de temperatura utilizado es de 20°C. Asimismo, se las hizo

bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad.

### **Procedimiento Experimental.**

- a)** Nivelar el viscosímetro (ver Figura 3.17.).
  
- b)** Colocar el spindle RV-7 por tratarse de una sustancia muy viscosa (ver Figura 3.18.).
  
- c)** Colocar el selector de velocidades en 0,5 rpm. Se selecciona esta velocidad para que el movimiento rotacional del spindle no acelere el asentamiento del FMR (ver Figura 3.19.).
  
- d)** Mezclar con el bastón agitador el FMR durante 1 minuto (ver Figura 3.20.).
  
- e)** Tomar y anotar la temperatura inicial del FMR (ver Figura 3.21.).
  
- f)** Tomar y anotar la temperatura y humedad del ambiente (ver Figura 3.12.).

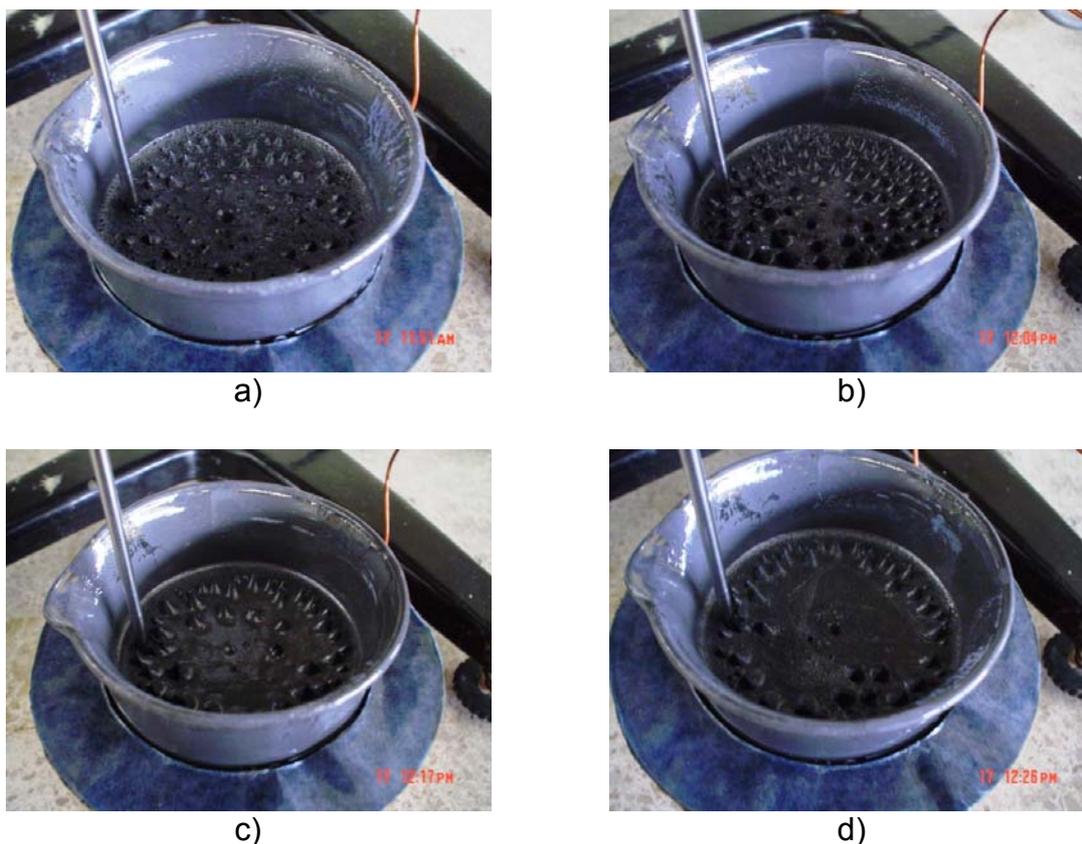
- g)** Revolver el FMR con el mezclador durante 1 minuto, para que se homogenice la suspensión. Se utiliza la velocidad más baja, porque el choque de las partículas de hierro hacen que se eleve demasiado la temperatura del fluido (ver Figura 3.22.).
- h)** Volver a tomar y a anotar la temperatura del FMR (ver Figura 3.21.).
- i)** Colocar el vaso de precipitación con el FMR dentro de la bobina, y ubicarlo debajo del cuerpo del viscosímetro. El spindle se lo sitúa a un extremo del vaso de precipitación, debido a que en este lugar el campo magnético es más fuerte (ver Figura 3.23.).
- j)** Bajar el cuerpo del viscosímetro dentro del vaso de precipitación, para sumergir el spindle hasta la marca respectiva (ver Figura 3.24.).
- k)** Encender el interruptor de la pantalla del viscosímetro.

- l)** Encerar el viscosímetro con el potenciómetro de calibración (ver Figura 3.25.).
  
- m)** Conectar la bobina a la batería (ver Figura 3.26).
  
- n)** Encender el motor del viscosímetro.
  
- o)** Cuando se estabilice la lectura en la pantalla del viscosímetro, anotar el dato visualizado. El tiempo de espera es, generalmente, 1 minuto.
  
- p)** Desconectar la bobina de la batería.
  
- q)** Apagar la pantalla y el motor del viscosímetro.
  
- r)** Levantar el cuerpo del viscosímetro.
  
- s)** Colocar el FMR en el agitador magnético – calentador para elevar su temperatura en 20°C. Durante este proceso, revolver la suspensión con el bastón agitador para lograr una distribución homogénea de la temperatura.



**Figura 3.28 Calentamiento del FMR.**

- t) Repetir el procedimiento desde el paso i hasta el paso s por tres ocasiones para cada muestra de FMR.



**Figura 3.29 Aspecto del FMR a diferentes temperaturas. a) A 27°C. b) A 47°C. c) A 67°C. d) A 87°C.**

- u) Una vez llenada la pertinente tabla de datos, se multiplica cada dato obtenido en el paso o por el correspondiente factor de conversión del spindle RV-7 a la velocidad de 0,5 rpm. El resultado calculado es la viscosidad expresada en cP.
  
- v) Por último, se calcula el promedio de todos los resultados para determinar la viscosidad puntual del FMR a diferentes temperaturas, y se traza una gráfica para visualizar su variación.

Las condiciones iniciales de la prueba son:

TABLA 13

**Condiciones Iniciales para la prueba de Viscosidad Puntual del FMR  
variando la temperatura**

<i>Temperatura ambiente</i>	25°C
<i>Humedad relativa</i>	70%
<i>Temperatura inicial del FMR</i>	25°C
<i>Temperatura final de mezcla del FMR</i>	27°C
<i>Spindle</i>	RV-7
<i>Velocidad</i>	0,5 rpm
<i>Factor de corrección</i>	80.000
<i>Densidad de campo magnético</i>	0,23 Tesla
<i>Incremento de temperatura</i>	20°C
<i>Tiempo de estabilización</i>	1 minuto

Los datos obtenidos (promedio) son:

TABLA 14

Datos y Resultados obtenidos en la prueba de  
Viscosidad Puntual del FMR a 27°C

<i>Dato</i>	<i>Valor</i>	<i>Viscosidad (cP)</i>
1	20,5	1'640.000
2	20,5	1'640.000
3	20,7	1'656.000
4	20,6	1'648.000
5	20,6	1'648.000

TABLA 15

Datos y Resultados obtenidos en la prueba de  
Viscosidad Puntual del FMR a 47°C

<i>Dato</i>	<i>Valor</i>	<i>Viscosidad (cP)</i>
1	19,5	1'560.000
2	19,3	1'544.000
3	19,2	1'536.000
4	19,4	1'552.000
5	19,6	1'568.000

TABLA 16

Datos y Resultados obtenidos en la prueba de  
Viscosidad Puntual del FMR a 67°C

<i>Dato</i>	<i>Valor</i>	<i>Viscosidad (cP)</i>
1	18,8	1'504.000
2	18,6	1'488.000
3	18,3	1'464.000
4	18,1	1'448.000
5	18,4	1'472.000

TABLA 17

Datos y Resultados obtenidos en la prueba de  
Viscosidad Puntual del FMR a 87°C

<i>Dato</i>	<i>Valor</i>	<i>Viscosidad (cP)</i>
1	17,5	1'400.000
2	17,4	1'392.000
3	17,5	1'400.000
4	17,7	1'416.000
5	17,4	1'392.000

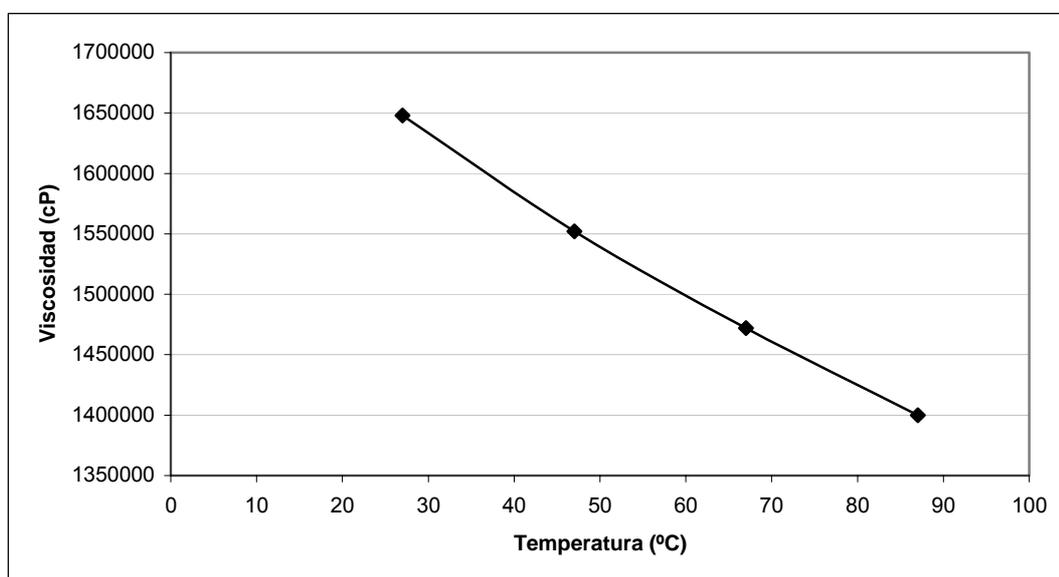
Promediando los resultados obtenidos, se tiene:

**TABLA 18**

**Viscosidad Puntual del FMR variando la temperatura**

<i>Dato</i>	<i>T<sub>prueba FMR</sub> (°C)</i>	<i>Valor</i>	<i>Viscosidad (cP)</i>	<i>Viscosidad (Pa.s)</i>
1	27	20,6	1'648.000	1.648
2	47	19,4	1'552.000	1.552
3	67	18,4	1'472.000	1.472
4	87	17,5	1'400.000	1.400

Graficando esta tabla:



**Figura 3.30 Variación de la Viscosidad Puntual del FMR**

**con respecto a la Temperatura.**

Sabiendo que la viscosidad disminuye con la temperatura, entonces los resultados obtenidos en este ensayo se encuentran dentro de los valores esperados.

En el Apéndice I se encuentran las tablas de datos y resultados de las tres muestras de FMR.

#### **3.4.5 Medición de la viscosidad puntual del FMR sin densidad de campo magnético.**

Con la finalidad de obtener el valor promedio de la viscosidad del FMR sin densidad de campo magnético, se procedió a medir primero la viscosidad del aceite 3 en 1, para establecer un parámetro de comparación. Luego se evaluó la viscosidad de la suspensión. El ensayo se llevó a cabo una vez para cada una de las tres muestras, y se obtuvo un valor promedio para cada medición. Además, se las hizo bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad.

**Procedimiento Experimental para medir la viscosidad del aceite 3 en 1.**

- a) En un vaso de precipitación, verter 200 ml de aceite 3 en 1.



**Figura 3.31 Vaso de precipitación con 200 ml de aceite 3 en 1.**

- b) Nivelar el viscosímetro (ver Figura 3.17.).

- c) Colocar el spindle RV-1 por tratarse de una sustancia poco viscosa.



**Figura 3.31 Spindle RV-1.**

- d)** Colocar el selector de velocidades en 0,5 rpm. Se selecciona esta velocidad para que el movimiento rotacional del spindle no contribuya a la formación de burbujas en el aceite (ver Figura 3.19.).
- e)** Tomar y anotar la temperatura del aceite.
- f)** Tomar y anotar la temperatura y humedad del ambiente (ver Figura 3.12.).
- g)** Colocar el vaso de precipitación con el aceite debajo del cuerpo del viscosímetro, para sumergir el spindle hasta la marca respectiva.
- h)** Encender el interruptor de la pantalla del viscosímetro.
- i)** Encerar el viscosímetro con el potenciómetro de calibración (ver Figura 3.25.).
- j)** Encender el motor del viscosímetro.

- k) Cuando se establezca la lectura en la pantalla del viscosímetro, anotar el dato visualizado. El tiempo de espera es, generalmente, 20 segundos.



**Figura 3.32 Toma de viscosidad del aceite 3 en 1.**

- l) Apagar la pantalla y el motor del viscosímetro.
- m) Levantar el cuerpo del viscosímetro.
- n) En último lugar, se multiplica el valor obtenido en el paso k por el correspondiente factor de conversión del spindle RV-1 a la velocidad de 0,5 rpm. El resultado calculado es la viscosidad expresada en cP.

Las condiciones iniciales para esta medición son:

TABLA 19

## Condiciones Iniciales para la prueba de Viscosidad del Aceite 3 en 1

<i>Temperatura inicial del aceite</i>	25°C
<i>Temperatura ambiente</i>	25°C
<i>Humedad relativa</i>	70%
<i>Spindle</i>	RV-1
<i>Velocidad</i>	0,5 rpm
<i>Factor de corrección</i>	200
<i>Tiempo de estabilización</i>	20 segundos

El dato obtenido fue de **0,3**. Multiplicando por el factor de corrección respectivo, se tiene que:

Viscosidad<sub>3 en 1</sub> = Valor obtenido x factor de corrección

$$\text{Viscosidad}_{3 \text{ en } 1} = 0,3 \times 200$$

Viscosidad <sub>3 en 1</sub> = 60 cP
--------------------------------------

**Procedimiento Experimental para medir la viscosidad puntual del FMR sin densidad de campo magnético.**

- a) Nivelar el viscosímetro (ver Figura 3.17.).
- b) Colocar el spindle RV-2 por tratarse de una sustancia poco viscosa.



**Figura 3.33 Spindle RV-2.**

- c) Colocar el selector de velocidades en 0,5 rpm. Se selecciona esta velocidad para que el movimiento rotacional del spindle no acelere el asentamiento del FMR (ver Figura 3.19.).
- d) Mezclar con el bastón agitador el FMR durante 1 minuto (ver Figura 3.20.).

- e)** Tomar y anotar la temperatura inicial del FMR (ver Figura 3.21.).
  
- f)** Tomar y anotar la temperatura y humedad del ambiente (ver Figura 3.12.).
  
- g)** Revolver el FMR con el mezclador durante 1 minuto, para que se homogenice la suspensión. Se utiliza la velocidad más baja, porque el choque de las partículas de hierro hacen que se eleve demasiado la temperatura del fluido (ver Figura 3.22.).
  
- h)** Volver a tomar y a anotar la temperatura del FMR (ver Figura 3.21.).
  
- i)** Colocar el vaso de precipitación con el FMR debajo del cuerpo del viscosímetro, para sumergir el spindle hasta la marca respectiva.



**Figura 3.34 Colocación del FMR en el Viscosímetro (sin bobina).**

- j) Encender el interruptor de la pantalla del viscosímetro.
- k) Encerar el viscosímetro con el potenciómetro de calibración (ver Figura 3.25.).
- l) Encender el motor del viscosímetro.
- m) Cuando se estabilice la lectura en la pantalla del viscosímetro, anotar el dato visualizado. El tiempo de espera es, generalmente, 30 segundos.



a)



b)



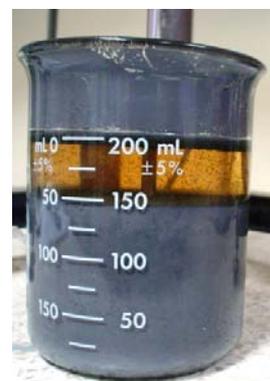
c)



d)



e)



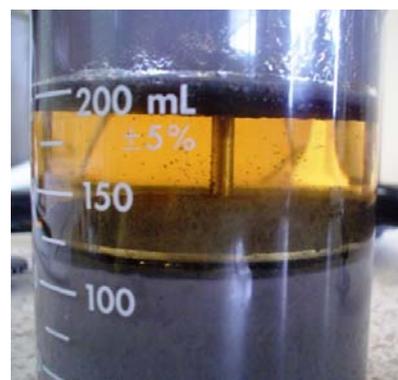
f)



g)



h)



i)

**Figura 3.35 Asentamiento del FMR. a) y b) Al inicio. c) A los 120 minutos. d) A los 240 minutos. e) A los 360 minutos. f) A los 480 minutos. g) A los 600 minutos. h) e i) A los 1540 minutos.**

- n)** Apagar la pantalla y el motor del viscosímetro, sin retirar el vaso de precipitación.
  
- o)** Repetir el procedimiento desde el paso j hasta el paso n cada diez minutos para cada muestra de FMR, hasta que la suspensión se haya asentado completamente.
  
- p)** Una vez llenada la respectiva tabla de datos, se multiplica cada dato obtenido en el paso m por el correspondiente factor de conversión del spindle RV-2 a la velocidad de 0,5 rpm. El resultado calculado es la viscosidad expresada en cP.
  
- q)** Para terminar, se calcula el promedio de estos resultados para determinar la viscosidad puntual del FMR sin densidad de campo magnético, y se bosqueja una gráfica para representar su cambio con el tiempo.

Las condiciones iniciales de la prueba son:

TABLA 20

**Condiciones Iniciales para la prueba de Viscosidad Puntual del FMR sin densidad del campo magnético**

<i>Temperatura ambiente</i>	25°C
<i>Humedad relativa</i>	70%
<i>Temperatura inicial del FMR</i>	25°C
<i>Spindle</i>	RV-2
<i>Velocidad</i>	0,5 rpm
<i>Factor de corrección</i>	800
<i>Tiempo de estabilización</i>	30 segundos

Los datos obtenidos (promedio) son:

TABLA 21

**Datos y Resultados obtenidos en la prueba de Viscosidad Puntual del  
FMR sin densidad de campo magnético**

<i>Dato</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Valor</i>	<i>Viscosidad (cP)</i>	<i>Viscosidad (Pa.s)</i>
1	0	19,8	15.840	15,84
2	10	12,1	9.680	9,68
3	20	11,8	9.440	9,44
4	30	12,2	9.760	9,76
5	40	13,0	10.400	10,40
6	50	12,8	10.240	10,24
7	60	13,7	10.960	10,96
8	70	15,0	12.000	12,00
9	80	15,5	12.400	12,40
10	90	15,9	12.720	12,72
11	100	16,6	13.280	13,28
12	110	17,9	14.320	14,32
13	120	18,0	14.400	14,4
14	130	17,8	14.240	14,24
15	140	17,2	13.760	13,76
16	150	18,5	14.800	14,80

<i>Dato</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Valor</i>	<i>Viscosidad (cP)</i>	<i>Viscosidad (Pa.s)</i>
17	160	18,4	14.720	14,72
18	170	18,7	14.960	14,96
19	180	19,1	15.280	15,28
20	190	18,4	14.720	14,72
21	200	19,0	15.200	15,20
22	210	18,7	14.960	14,96
23	220	22,8	18.240	18,24
24	230	23,1	18.480	18,48
25	240	23,8	19.040	19,04
26	250	23,0	18.400	18,40
27	260	23,1	18.480	18,48
28	270	20,2	16.160	16,16
29	280	19,3	15.440	15,44
30	290	19,4	15.520	15,52
31	300	18,8	15.040	15,04
32	310	18,7	14.960	14,96
33	320	19,1	15.280	15,28
34	330	18,1	14.480	14,48
35	340	17,6	14.080	14,08
36	350	18,1	14.480	14,48

<i>Dato</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Valor</i>	<i>Viscosidad (cP)</i>	<i>Viscosidad (Pa.s)</i>
37	360	18,3	14.640	14,64
38	370	18,1	14.480	14,48
39	380	17,4	13.920	13,92
40	390	17,3	13.840	13,84
41	400	16,6	13.280	13,28
42	410	20,5	16.400	16,40
43	420	21,7	17.360	17,36
44	430	20,6	16.480	16,48
45	440	20,8	16.640	16,64
46	450	21,0	16.800	16,80
47	460	22,3	17.840	17,84
48	470	22,0	17.600	17,60
49	480	23,0	18.400	18,40
50	490	22,2	17.760	17,76
51	500	22,8	18.240	18,24
52	510	22,3	17.840	17,84
53	520	20,7	16.560	16,56
54	530	19,6	15.680	15,68
55	540	20,2	16.160	16,16
56	550	19,2	15.360	15,36

<b><i>Dato</i></b>	<b><i>Tiempo (min)</i></b>	<b><i>Valor</i></b>	<b><i>Viscosidad (cP)</i></b>	<b><i>Viscosidad (Pa.s)</i></b>
57	560	20,5	16.400	16,40
58	570	22,8	18.240	18,24
59	580	23,9	19.120	19,12
60	590	20,1	16.080	16,08
61	600	20,4	16.320	16,32
62	610	19,7	15.760	15,76
63	1540	0,1	80	0,08

Graficando esta tabla: