

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

---

---



**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS  
E INGENIERÍA**

0447711236370 Marina

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA

"VISCOSIDAD DE UN FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO  
BAJO PERTURBACIONES MAGNÉTICAS"

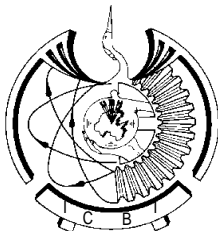
**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO INDUSTRIAL

P R E S E N T A:

P.D.I.I. JUANA ANGELES RAMOS.

**DIRECTOR: DR. FERNANDO DONADO PEREZ**  
Mineral de la Reforma, Hgo.



## **Agradecimiento:**

A cada uno de mis compañeros y amigos que durante toda la carrera me brindaron su amistad en especial a Ines, Liz, Nalleli y a Gustavo por su apoyo incondicional.

A la Universidad Autónoma Del Estado de Hidalgo por permitirme ser parte de sus egresados y a cada uno de mis maestros por su paciencia y dedicación, a los directivos, secretarias, trabajo social ya que cada uno aporta parte de su trabajo para que podamos recibir una educación de calidad.

Un especial agradecimiento al Doctor Fernando Donado Pérez director de esta tesis ya que contribuyo de una manera muy significativa en mi formación y me abrió horizontes e hizo darme cuenta de mis deficiencias para así mejorarlas y aprender de mis errores ya que lo importante no es caerse sino levantarse

**A PROMEP** por el apoyo económico otorgado en el marco de la beca contemplada en el proyecto con carta de liberación PROMEP / 103.5 / 06 / 1275, PTC-234, con lo cual fue posible alcanzar nuestros objetivos y metas planeadas.

**Dedicatoria:**

A todas las personas que me apoyaron en el transcurso de mi formación es especial a:

**Dios**, que me permitió el gran privilegio de terminar mi carrera.

**Mi madre**, (Juana Ramos Alvarado) por sus oraciones y consejos que siempre estuvieron cuando los necesite.

**Mi padre**, (Francisco Angeles Uribe) por su paciencia y apoyo hasta el día de hoy.

**Mis hermanos**, (Francisco, Marcos, Daniel, Israel y Samuel) por su apoyo y cariño.

**Mis cuñadas**, (Marina, Paola, Mary y Mireya) que siempre me alentaban para seguir al frente.

## Contenido.

Lista de Graficas. ....	5
Justificación. ....	9
Objetivo General.....	10
Objetivos Particulares .....	10
Hipótesis. ....	11
Resumen .....	12
Capítulo 1 .....	14
Los Fluidos. ....	14
1.1 Antecedentes.....	14
1.2 Tipos de fluidos.....	17
1.2.1 Los fluidos newtonianos. ....	18
1.2.2 Los fluidos no newtonianos. ....	19
1.3 Fluidos Magneto-reológicos.....	22
1.3.1 Características de los fluidos Magneto-reológicos.....	25
1.3.2 Factores determinantes del estudio. ....	26
1.4 Reducción de tamaño bajo métodos mecánicos. ....	31
1.4.1 Objetivos de la molienda mecánica.....	32
1.4.2 Parámetros de molienda.....	32
1.5 Obtención de la magnetita por molienda .....	34
1.6 Algunos de los fluidos MR que contienen hierro. ....	36
Capítulo 2.....	37
Descripción del equipo.....	37
2.1 Introducción.....	37
2.2 Etiramiento y tensión.....	39
2.3 Comportamientos de los sólidos.....	39
2.4 Reómetros.....	41
2.4.1 Reómetros de tipo rotacional.....	43
2.4.2 Reómetros de tipo tubo. ....	44
2.5 Sistema de reometría. ....	46
2.6 Descripción de las bobinas de Helmholtz. ....	49
2.7 Procedimiento para la toma de mediciones.....	54
2.7.1 Flujo grama Experimental.....	56
Capítulo 3 .....	57
Parte Experimental.....	57
3.1 Serie 1 (magnetita con aceite de silicona) .....	60
-Concentración 0.03 .....	60
- Concentración 0.05 .....	64
- Concentración 0.07 .....	68
- Concentración 0.10 .....	72
3.2 Serie 2 (magnetita con aceite de transmisión). ....	78
3.3 Serie 3 (partículas de carbonilo con aceite de transmisión). ....	82
- Concentración 0.01 .....	83
3.4 serie 4 (Normalización). ....	88
CONCLUSIONES. ....	103
GLOSARIO. ....	109
REFERENCIAS.....	111

## **Lista de Graficas.**

Grafica 1.2 Comportamiento de un fluido cuando experimenta un esfuerzo cortante.....	17
Grafica 1.2.1 Muestra el comportamiento de la viscosidad en los fluidos newtonianos.....	18
Grafica 1.2.2 Comportamiento de los fluidos no newtonianos.....	19
Grafica 1.2.3 Tipos de fluidos .....	21
Grafica 1.2.4 Comportamiento de la viscosidad de los diferentes fluidos.....	21
Grafica 1.2.5 Comportamiento de los fluidos sujetos a esfuerzo cortante.....	22
Grafica 1.4 Muestra una vista de la acción de fuerzas en un molino de bolas.....	31
Grafica 1.5 molino de bolas.....	34
Grafica 2.4 clasificación de los reómetros.....	43
Grafica 2.5 Sistema de reometría.....	46
Grafica 2.6 Bobinas de Helmholtz.....	49
Grafica 2.6.1 Representación de los parámetros de las bobinas.....	51
Grafica 2.7.1 Proceso experimental.....	56
Grafica 3.1.1 Comportamiento de la viscosidad de un fluido MR con pre-acondicionamiento con concentración de 00.03.....	61
Grafica 3.1.2 Comportamiento de la viscosidad de un fluido MR con pre-acondicionamiento con concentración de 00.3.....	62
Grafica 3.1.3 Comportamiento de la viscosidad de un fluido MR con pre-acondicionamiento con concentración de 0.03.....	63
Grafica 3.1.4 Comportamiento de la viscosidad de un fluido MR con pre-acondicionamiento con concentración de 0.03.....	63

Grafica 3.2	Nos muestra el comportamiento de una mezcla con una concentración de 0.05 con condiciones generales similares a la anterior.....	64
Grafica 3.2.1	Nos indica el comportamiento de referencia.....	65
Grafica 3.2.2	Existe aumento en el campo primario.....	66
Grafica 3.2.3	Aplicación del campo perturbativo.....	67
Grafica 3.2.4	Aplicación de campos simultáneamente.....	67
Grafica 3.2.5	Cambios en g.....	68
Grafica 3.3.1	Curva de referencia.....	69
Grafica 3.3.2	Variando a g.....	69
Grafica 3.3.3	Variando g.....	70
Grafica 3.3.4	Variando g.....	71
Grafica 3.3.5	Variando g.....	71
Grafica 3.4	Concentración de 0.10 con pre-acondicionamiento.....	72
Grafica 3.4.1	Referencia de los cambios con pre-acondicionamiento.....	73
Grafica 3.4.2	Con pre-acondicionamiento.....	74
Grafica 3.4.3	Con pre-acondicionamiento.....	75
Grafica 3.4.4	Con pre-acondicionamiento.....	75
Grafica 3.4.5	Con pre-acondicionamiento.....	76
Grafica 3.4.6	Esta grafica nos representa la comparación de la viscosidad de nuestra muestra al ir cambiando la amplitud en nuestro campo secundario, transversal o perturbativo con una concentración de $\phi=0.03$ .....	77
Grafica 3.5	Curvas del comportamiento de la viscosidad a diferentes concentraciones con intensidad de campo similar.....	78
Grafica 3.6	Se muestra las curvas con pre-acondicionamiento, pero con intensidad de campo diferente.....	80

Grafica 3.7 Muestran los resultados de la viscosidad de la muestra a una concentración $\phi=0.01$ con una velocidad de una rpm.....	82
En la grafica 3.8 Se muestran los resultados similares a los mostrados en la grafica 3.7 Realizados con una rapidez de corte mayor que la anterior.....	84
En la grafica 3.9 Se muestran los resultados de la viscosidad de la muestra a una concentración $\phi=0.01$ con una velocidad de 5 rpm.....	85
Grafica 3.10 Se puede observar el cambio existente en la viscosidad de nuestro fluido MR con una concentración de .01 y una velocidad de 3rpm donde la curva de referencia nos permite visualizar las modificaciones existente en la viscosidad al existir un campo perturbativo comparado con otra donde no existe dicho campo.....	88
Grafica 3.10.1 Donde $\phi$ es de 0.01 y las velocidades son diferentes.....	8
Grafica 3.10.2 Muestra la similitud del comportamiento al variar la intensidad del campo magnético y tener constante la velocidad.....	89
Grafica 3.10.3 Con una concentración de .02 a diferentes velocidades.....	90
Grafica 3.10.4 Con una concentración de .03 a diferentes velocidades.....	90
Grafica 3.10.5 Con concentración de .05 normalizada con pc-92.....	91
Grafica 3.11.1 Con concentración de .01 con los datos originales.....	92
Grafica 3.11.2 Con concentración de 0.01 y los datos originales de 92.....	99
Grafica 3.11.3 Con una concentración de .01 con las velocidades de 3 y 10 rpm con campos de 80 y 92 G.....	93
Grafica 3.12.1 Con una concentración de .02 a diferentes velocidades con un campo de 80 G.....	94
Grafica 3.12.2 Grafica con la concentración .02 a diferentes velocidades con un campo de 92 G.....	95

Grafica 3.12.3 Con la concentración .02 con la velocidad de 3 y de 10 rpm.....	96
Grafica 3.13.1 Con la concentración de .03 a diferentes velocidades a un campo de 80 G.....	96
Grafica 3.13.2 Con la concentración de .03 a diferentes velocidades a un campo de 92 G.....	97
Grafica 3.13.3 Con la concentración de .03 con las velocidades de 3 y de 10 rpm.....	97
Grafica 3.14.1 Grafica con la concentración de .05 a diferentes velocidades con un campo de 80 G.....	98
Grafica 3.14.2 Con una concentración de 0.05 a diferentes velocidades con un campo de 92 G.....	98
Grafica 3.14.3 Con una concentración de .05 con las velocidades de 3 y de 10.....	99
Grafica 3.15.1 Datos originales de todas las concentraciones a una velocidad de 2rpm.....	100
Grafica 3.15.2 Datos normalizados de todas las concentraciones a una velocidad de 2rpm.....	100
Grafica 3.16.1 Datos originales de todas las concentraciones a una velocidad de 7 rpm.....	101
Grafica 3.16.2 Datos normalizados de todas las concentraciones a una velocidad de 7 rpm.....	101



---

## Justificación.

En esta sociedad tan cambiante, los factores sociales, económicos, políticos e industriales inciden cada día más y se nos exige estar a la vanguardia en todo momento innovando y presentando nuevos productos. Se requiere que estos productos presenten propiedades y características que permitan satisfacer las necesidades planteadas por la industria, sociedad y el desarrollo de la tecnología. La elaboración de estos productos debe de minimizar los costos de producción y distribución pero al mismo tiempo tienen que satisfacer los estándares de calidad y seguridad del mercado donde se distribuirá para que sean más competitivos. Por esto, se tiene la tarea de estar en constante evolución proponiendo y estudiando nuevos productos y procesos que nos permitan alcanzar nuestro objetivo.

Por estas razones desde hace algunos años se han estado estudiando los fluidos inteligentes a los cuales se les esta dando una importancia por sus características que presentan, Debido a esto es necesario aumentar su estudio como se esta haciendo en los países de primer mundo para perfeccionar su desempeño y controlar mejor sus propiedades y así poder ampliar su aplicación. La mayoría de las investigaciones y experimentos que se les han realizado han ido trazando el camino que nos indica que en un futuro no muy lejano estos fluidos vendrán a revolucionar las maquinas

## **Objetivo General**

Determinar el efecto que causa un campo oscilatorio transversal de baja intensidad sobre la viscosidad en un fluido magneto-reológico que esta sometido también a un campo magnético estático.

## **Objetivos Particulares**

Para alcanzar nuestro objetivo general se enmarcaron los siguientes objetivos particulares:

1. -Implementar un diseño experimental que permita el estudio de la viscosidad de un fluido magneto-reológico expuesto a combinación de campos magnéticos, uno de los cuales es oscilatorio y de baja intensidad y que actúa transversalmente al otro campo, estático y de mayor intensidad.
2. -Determinar los rangos de intensidades de los campos en los cuales se realizara el estudio, esto con base en la respuesta del sistema.
3. Establecer la frecuencia en que se realizará el estudio con base en la reacción del sistema
4. -Evidenciar las concentraciones de partículas adecuadas para el estudio.
5. -Realizar las mediciones de viscosidad del fluido MR a diferentes condiciones del campo oscilatorio, frecuencia y amplitud, y de rapidez de deformación.

### **Hipótesis.**

La hipótesis de trabajo es que la aplicación simultánea de un campo estático y de uno perturbativo induce mayores cambios en la viscosidad que la aplicación de un solo campo estático del mismo gasto energético que los dos campos.

## Resumen

En este trabajo nos enfocaremos en los fluidos Magneto-reológicos (MR), a los cuales se les esta dando suma importancia en la solución de algunos problemas planteados en la industria. Por las características que presentan nos permiten una amplia gama de aplicaciones en diferentes áreas.

La mayoría de las investigaciones y experimentos que se han realizado van trazando el camino que nos indica que en un futuro no muy lejano estos fluidos vendrán a revolucionar algunos dispositivos mecánicos como frenos, amortiguadores y embragues. Una necesidad en el campo de estudio de los fluidos MR es aumentar la respuesta del fluido MR cuando se expone a un campo magnético. Para esto se están proponiendo varias técnicas.

Por ejemplo variando el tamaño de las partículas, aumentando su respuesta al campo magnético o variando las características estructurales de los agregados que se forman. En la literatura puede encontrarse abundante información acerca de la dependencia de los cambios que sufren los fluidos MR con el campo magnético. También se puede encontrar literatura acerca de la síntesis de partículas apropiadas para la preparación de fluidos MR. Sin embargo, es escasa la literatura acerca de métodos para afectar la estructura, por eso en este trabajo nos enfocaremos en el desarrollo de un método para cambiar las características reológicas de los fluidos MR. Por medio del desarrollo y estudio de un método que afecte la micro estructura.

Se estructuro nuestro trabajo en cuatro capítulos. En el de los Antecedentes se muestran los resultados de la intensa búsqueda de información existente de los fluidos magneto-reológicos mostrando lo más relevante e importante para entender y comprender el tema.

En el segundo capítulo se describe el equipo de reometría que se utilizó para el estudio del comportamiento del fluido MR, se caracteriza la respuesta del campo producido por las bobinas cuando variamos la intensidad del voltaje aplicado. Se detallan sus componentes y características más sobresalientes. En particular se describen los dos pares de bobinas que nos proporcionan el campo magnético primario y el secundario o perturbativo.

En el tercer capítulo se muestran los resultados de la viscosidad de los fluidos MR bajo diferentes condiciones de concentraciones de partículas, campos aplicados y frecuencia de perturbación.

En el cuarto capítulo se encuentra el análisis de los resultados que nos permiten dictaminar las conclusiones que se obtuvieron al realizar el presente trabajo.

Finalmente complementamos el trabajo con algunos apéndices.

---

# Capítulo 1

## LOS FLUIDOS.

### 1.1 ANTECEDENTES

Los materiales compuestos tienen propiedades que son determinadas por las propiedades de los componentes. Cambiando la composición relativa, se pueden controlar las propiedades del compuesto. En la industria y en la ingeniería, los materiales compuestos juegan un papel de gran importancia comercial. Muchas aplicaciones son impensables sin el uso de materiales compuestos. También en la naturaleza observamos materiales compuestos como ejemplo tenemos a la leche, arena, las proteínas, el petróleo, etc.

Una clase particular e interesante de materiales compuestos son los llamados materiales inteligentes, materiales a los que pueden controlarse sus propiedades por medio de estímulos externos. Ejemplos de ellos son los fluidos magneto-reológicos (MR), los ferrófluidos y los fluidos electro-reológicos (ER). En el presente trabajo nos enfocaremos a los fluidos magneto-reológicos. Estos son dispersiones de micropartículas que varían sus propiedades mecánicas cuando están expuestas a un campo magnético.

Para describir el cambio en las características de los fluidos MR es necesario que antes estudiemos las peculiaridades de los fluidos a nivel general para tener conocimiento previo de que es un fluido y cuales son sus características. La materia se encuentra principalmente en tres estados que

---

son el sólido, líquido y gaseoso. Los sólidos conservan su forma, se deforman elásticamente cuando se someten a un esfuerzo cortante. Algunos sólidos son cristalinos, estos cuentan con una estructura ordenada y periódica. Al pensar en el estado gaseoso se tiene una estructura molecular completamente desordenada. El estado líquido tiene características intermedias.

El estado gaseoso y el líquido presentan algunas características en común por lo que los agrupamos en lo que llamamos fluidos. Un fluido es una sustancia o medio continuo que fluye, esto es que se deforma constantemente en el tiempo ante la aplicación de un esfuerzo cortante sin importar la magnitud de este, ya que debido a su poca cohesión intermolecular carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene. El término fluido se aplica tanto a los líquidos como a los gases sin olvidar que un gas tiene una densidad muy baja debido a la separación que existe en sus moléculas por lo que se pueden comprimir con facilidad, un líquido es incomprensible. Así pues un líquido no tiene forma definida pero sí volumen. A continuación enunciamos algunas de las propiedades de los fluidos:

- Tensión superficial: permite que la superficie de un líquido se comporte como una membrana elástica.
- Cohesión: es la fuerza que mantiene unidas a las moléculas de una misma sustancia.
- Adherencia: es la fuerza de atracción que se manifiesta entre dos sustancias diferentes (podemos observar que entre el vidrio y el mercurio no existe adherencia).

- Capilaridad: existe cuando hay contacto del líquido con una pared sólida.
- Peso específico: determinado por el valor de su peso entre el volumen que ocupa.
- Densidad: definido como masa por unidad de volumen. Si el material es homogéneo, como el hielo o el hierro, la densidad es la misma en toda la materia.
- La viscosidad: es la resistencia que opone el líquido a fluir. Dentro de la viscosidad observamos la absoluta o dinámica y la cinemática.

**La viscosidad dinámica** es la tensión de corte o fuerza requerida para deslizar una capa de un fluido sobre otra capa y se desarrolla cuando este está en movimiento mientras que **la viscosidad cinemática** se define como el cociente entre la viscosidad dinámica o absoluta de un fluido y su densidad y es representada por la letra  $\eta$ . En la tabla 1 se muestra las unidades de la viscosidad dinámica y cinemática.

Tabla 1.- unidades de viscosidad (Fuente: "Física General", Héctor P. Montiel)

	Unidades de viscosidad	
Viscosidad absoluta $\eta_0$	PASCAL SEGUNDO (Pa*s)	=10 poises =1000 cP
Viscosidad Cinemática $\eta = \eta_0 / \delta$	Stoke	=cm <sup>2</sup> /s

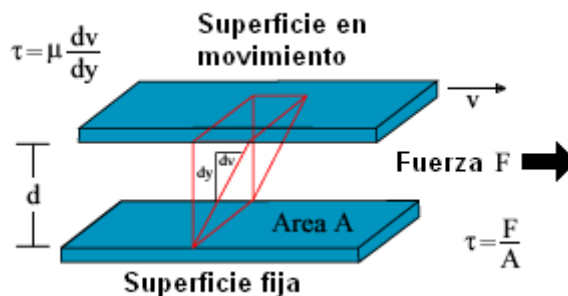


## 1.2 TIPOS DE FLUIDOS.

Existen diferentes clasificaciones y subdivisiones de los fluidos basadas en la curva de tensión de corte y su gradiente de velocidad. Cuando se aplica una fuerza de corte o cizalla a un fluido, ésta origina una deformación; que se denomina flujo. Si la fuerza de cizalla  $F$  se aplica sobre un área  $A$  de la superficie de un fluido de contacto con un plano estacionario, entonces la capa superior del fluido se desplazara con una velocidad  $V$  mientras que la capa en contacto con el plano quedara estacionaria (Fig. 1).

Figura 1.2 comportamiento de un fluido cuando experimenta un esfuerzo cortante

(fuente [http://www.fondouni.com/Archivos/Fluidos/1%20MF%20-%20INTRODUCCION%202005\\_2\\_PDF.pdf](http://www.fondouni.com/Archivos/Fluidos/1%20MF%20-%20INTRODUCCION%202005_2_PDF.pdf) )



La capa superior a su vez arrastra a la capa subyacente con una velocidad ligeramente reducida y esta a su vez arrastra a la capa subsiguiente. En consecuencia se establece un gradiente de velocidad dentro del fluido que obedecerá a la viscosidad del mismo. Dependiendo del comportamiento viscoso que presentan los fluidos se clasifican en newtonianos y no newtonianos [1]

### 1.2.1 Los fluidos newtonianos.

En estos la viscosidad es independiente del gradiente de rapidez de corte y puede depender solo de la temperatura o de la presión. Como ejemplos tenemos el aire, la gasolina, el agua, las disoluciones diluidas de azúcares, las bebidas carbónicas, algunas de las bebidas alcohólicas, los extractos de carne, el jarabe de maíz, ciertas mieles, algunos aceites ligeros de cocina, la leche cruda y homogeneizada. Estos fluidos cumplen la ecuación:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dh} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

$\tau$  Es el esfuerzo o módulo cortante,  $\eta$  es la viscosidad dinámica,

$\frac{dv}{dh}$  Es el gradiente de la rapidez de corte, v es la rapidez con la que se desplaza una placa respecto de la otra, separadas transversalmente por una distancia h.

Grafica 1.2.1 comportamiento de fluidos newtonianos.  
(fuente: <http://polaris.esfm.ipn.mx/~labfisica3/practfis/fis2/viscosi.pdf>)



## 1.2.2 Los fluidos no newtonianos.

este término se utiliza para clasificar a todos los fluidos donde el esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la rapidez de deformación entre los cuales encontramos a los:

Grafica 1.2.2 Comportamiento de los fluidos no newtonianos  
(Fuente: <http://polaris.esfm.ipn.mx/~labfisica3/practfis/fis2/viscosi.pdf>)



a). **Fluidos Plásticos de Bingham:** se comportan como un sólido bajo condiciones estáticas, requieren que se aplique un esfuerzo mínimo para comenzar a fluir, en condiciones adecuadas pueden comportarse como un fluido newtoniano, en estos fluidos la relación módulo cortante y velocidad de deformación es lineal, algunos ejemplos son: suspensiones de arcilla y roca, la margarina y el chocolate [1], [2], [3].

b). **Fluidos Pseudo plásticos** (fluidos adelgazantes, fluidificantes). Su viscosidad aparente decrece cuando aumenta el gradiente de velocidad de deformación. Este comportamiento indica una ruptura o reorganización continua de la estructura, dando como resultado una menor resistencia al flujo, y es debido a la presencia de sustancias de alto peso molecular así como a la

---

dispersión de sólidos en la fase líquida. Algunos ejemplos son los derivados de frutas y vegetales como los zumos y purés, el lodo de las aguas residuales, la celulosa, el jabón, la tinta de impresora, el almidón, soluciones de látex.

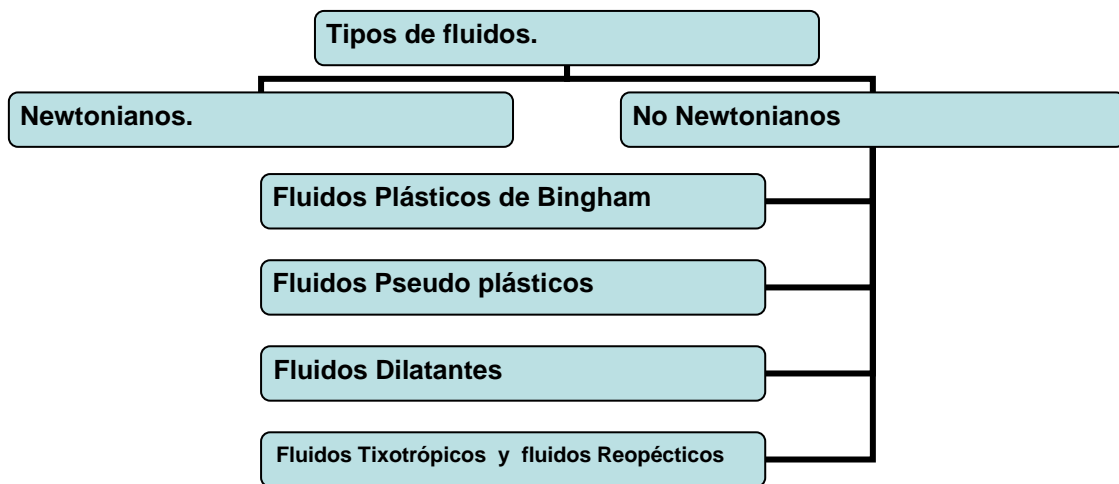
c). **Fluidos Dilatantes** (fluidos espesantes) Su principal característica es que a medida que aumenta el esfuerzo de corte aplicado aumenta su viscosidad. Estos fluidos son poco frecuentes, cuestan más pero puede existir un mayor caudal de ellos. Algunos ejemplos son el feldespato, la mica, la arcilla, la arena de playa, las arenas movedizas, el almidón en agua, pastas de resinas vinílicas, entre otros.

d). **Fluidos Tixotrópicos y fluidos Reopécticos.**

**-Fluidos Tixotrópicos:** Son considerados todos aquellos que al aplicarles una velocidad de deformación constante, muestran una disminución del esfuerzo cortante y de la viscosidad aparente con el tiempo. Esto es debido al cambio continuo de la estructura del material, que puede ser en cualquier caso reversible o irreversible. La tixotropía indica una continua ruptura o reorganización de la estructura dando como resultado una disminución de la resistencia del flujo, como las sustancias sol-gel al someterlo a velocidad se produce la transición de gel (alta viscosidad a solución menor viscosidad) ya que al mantener la cizalla constante se rompen los enlaces y disminuye su resistencia a la deformación. Algunos ejemplos son la leche condensada, la mayonesa, la clara de huevo, lodo de perforación, pinturas y tintas, los aderezos de ensalada, el puré de albaricoque.

**-Fluidos Reopécticos:** Aumentan su viscosidad aparente con gran rapidez al ser agitados o golpeados rítmicamente, al mantener la velocidad constante se crea estructura y aumenta su resistencia ya que experimentan un aumento en el módulo cortante. Ejemplos son arcillas de bentonita, grasas, la celulosa carboxymethyl, suspensiones coloidales de pentóxido de vanadio y las suspensiones de yeso con agua y mieles de eucalipto.

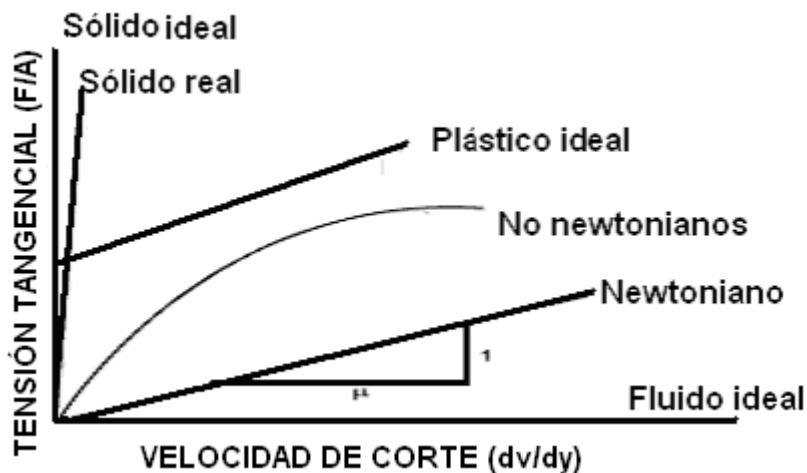
Figura 1.2.3 tipos de fluidos (fuente: Antonio Valiente B., Problemas de flujo de fluidos pp.505-510)



Grafica 1.2.4 comportamiento de la viscosidad en los diferentes fluidos



Graficas 1.2.5 se observa el comportamiento de los diferentes fluidos sujetos a un esfuerzo cortante.



### 1.3 FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS.

Dentro de los fluidos encontramos una clase de sistemas cuyas propiedades pueden ser controladas mediante la aplicación de un campo magnético. Se trata de los llamados fluidos magneto-reológicos (fluidos MR). Son dispersiones de micropartículas magnéticas en un líquido, generalmente un aceite mineral de baja viscosidad. Al someter el sistema a un campo magnético las partículas forman estructuras que hacen que el sistema experimente cambios en sus propiedades mecánicas, pasando de un comportamiento newtoniano a uno no newtoniano y con características viscoelásticas.

Los fluidos magneto-reológicos se empezaron a estudiar desde la década de los 40's del siglo pasado pero sólo desde hace pocos años se les está dando la importancia a sus aplicaciones en dispositivos mecánicos.

---

El estudio de los fluidos MR empieza con la publicación de J. Rabinow "The Magnetic Fluid Clutch" en 1948 [4], [5], [6]. En el año siguiente fue publicado "Induced Fibration of Suspensions" de W. M. Wilson, donde se realizaron los primeros estudios de los fluidos electro-reológicos (ER) y de un sistema MR [7]. Se encuentra que la viscosidad depende del cuadrado del campo aplicado. En 1951 y 1953 Rabinow logra las patentes de un embrague MR y otros mecanismos de transmisión de fuerzas, pero debido a la inestabilidad en el fluido su estudio perdió fuerza [8]. Para 1960 fueron estudiados y sintetizados los primeros ferro-fluidos quienes reflejaron tener una estabilidad mejor frente a la sedimentación y una viscosidad también dependiente del campo magnético pero su comportamiento y descripción física era diferente a los MR. Mac Tague encontró una anisotropía en la viscosidad siendo 2 veces mayor cuando usa un campo paralelo al flujo que cuando el campo es perpendicular a este. Mac Tague propone que la disipación en los ferro-fluidos proviene de la fricción de las partículas con las capas del surfactante y el líquido que las rodea. En 1985 Rosensweig publicó su libro Ferrohydrodynamics considerado un clásico de la literatura de los ferrófluidos [9].

En los siguientes años es muy difícil ver publicaciones y hasta la década de los 90 es cuando vuelven a ser considerados. En la siguiente década se observa un renacer el cual va en aumento cada día. Actualmente el interés en el uso de fluidos MR se enfoca a resolver problemas de la supresión de vibraciones, particularmente el de las grandes estructuras como lo son los amortiguadores para puentes, edificios o coches. También se están utilizando

---

en los robots para acelerar el movimiento de sus partes y tener una respuesta más rápida y precisa con movimientos más exactos para la realización de sus tareas. En la medicina se utiliza para crear suelas inteligentes, cuya característica es mejorar el confort del calzado, o bien prótesis que ayuden al paciente a tener una mejor calidad de vida. Además cabe mencionar que en Europa se pretenden aplicar en sistemas de estabilidad y control de tracción en los automóviles para incrementar su vida.

Los estudios empiezan a ser más numerosos, sobretodo por la posible amplia gama de aplicaciones que se les puede dar si se logra obtener un fluido que alcance las especificaciones de los fabricantes. Esto significa encontrar los parámetros adecuados para maximizar el efecto de respuesta de los fluidos. Entre estos parámetros están una combinación precisa del tamaño de las partículas, la concentración de partículas, las características del líquido portador, y la intensidad del campo magnético.

Dependiendo del tamaño de las partículas magnéticas dispersas en los líquidos podemos distinguir dos clases de sistemas:

- **Los Ferrófluidos.** A las dispersiones donde las partículas son del orden de 3 a 15 nm [10], [11], [12], y se encuentran suspendidas en un solvente que es un líquido orgánico o el agua. Las nano-partículas ferromagnéticas son cubiertas de un surfactante para prevenir su aglomeración. Los ferrófluidos no muestran ferromagnetismo, ya que ellos no conservan la magnetización en ausencia de un campo aplicado por fuera, y estos suelen mostrar el paramagnetismo.



- 
- **fluidos magneto-reológicos (MR)**. Son dispersiones donde las partículas de encuentran entre  $0.05-30 \mu\text{m}$  [13], [14], [15], Los cambios más notables experimentados por los fluidos MR son cuando se les aplica un campo magnético y ocurren en milisegundos. Puede pasar de un fluido simple a un semisólido debido a la formación de estructuras al aplicar el campo magnético. Las estructuras modifican la viscosidad efectiva de la dispersión. ¿Como sucede esto? Al aplicar el campo magnético externo al sistema, las partículas suspendidas empiezan a interactuar, los dipolos inducidos dan origen a la formación de estructuras columnares alineadas en dirección del campo magnético. Estas restringen el movimiento y dan lugar a notables cambios en las propiedades mecánicas del fluido, por ejemplo en la viscosidad, donde se observan cambios de algunos órdenes de magnitud [4]. Al retirar el campo magnético los parámetros que habían experimentado un cambio temporal vuelven a su estado original sin ninguna modificación.

### **1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS.**

Los fluidos magneto-reológicos pueden modificar sus propiedades mecánicas al exponerlo a un campo magnético, debido a que cambian sus características estructurales:

- 
- A bajas concentraciones se forman estructuras alargadas como cadenas.
  - Si el campo y la concentración son bajos las cadenas que se forman prácticamente no interactúan.
  - A mayores concentraciones y campos bajos las separaciones iniciales de las cadenas son pequeñas por lo que la interacción entre las cadenas depende del campo magnético, esta interacción aumenta con el campo magnético.
  - Para concentraciones intermedias y mayores al aplicar el campo magnético, se forman estructuras más complejas con muchas interconexiones.

### 1.3.2 Factores determinantes del estudio.

Dentro de los factores más relevantes que determinan las características de los fluidos magneto-reológicos están:

- **La concentración de micro partículas**, ya que de esta depende la estructura de las cadenas que se formaran.
- **El líquido portador (aceite de silicona y de transmisión para autos tipo Dexron)**, que dependiendo de su viscosidad determina parcialmente la rapidez de los cambios.

- **La intensidad de los campos magnéticos.** Fijos los otros factores, el campo magnético regula la intensidad de las interacciones y por tanto controla la rapidez y la intensidad de los cambios que experimenta el fluido MR.

Para la preparación de fluidos MR pueden usarse una amplia variedad de partículas en sustancias diversas (ver tabla 2). En el siguiente cuadro resumimos algunas características de partículas que se han usado para preparar fluidos magneto-reológicos.

Tabla 2 características de algunas partículas (fuente: [www.monografias.com/trabajaos11/nomecom.html](http://www.monografias.com/trabajaos11/nomecom.html))

MINERAL	CONTENIDO DE Fe (%)	SISTEMA CRISTALINO	Formula usual del cristal	DENSIDAD gr./cm <sup>3</sup>	COLOR
Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	40-70	trigonal	Hexagonal en placas	5.26	Rojo brillante
Magemita (Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	70-72	Cúbico o tetragonal	Cubos	4.87	Roja o café
Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	72.4	Cúbico	Cubos	5.18	Negro
Hidróxido de hierro Fe(OH) <sub>3</sub>	98	Cúbico	Cubos	2.1	Marrón oscuro

---

En el trabajo desarrollado en esta tesis usamos un óxido de hierro que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre. Respecto a los óxidos podemos mencionar algunas características generales, éstas son:

- Si se encuentran presentes, aunque sea en concentraciones pequeñas, dan a los sedimentos colores.
- Generalmente se presentan como cristales pequeños (5-100 nm) y consecuentemente únicamente bajo condiciones exhiben un área superficial extensa y reactiva.
- Poseen grupos funcionales en su superficie que les permiten adsorber una amplia gama de iones y moléculas tales como fosfato, metales pesados y ácidos orgánicos.
- Poseen solubilidades muy bajas a pesar de su pequeño tamaño.
- La habilidad de las especies de Fe para ser oxidadas o reducidas y por lo tanto de ser precipitadas o disueltas une el ciclo del Fe con el del oxígeno (oxidante) y el del carbón (reductor).
- El estado sólido y la química superficial de algunas de las fases de Fe imparten a estos óxidos la habilidad de catalizar reacciones redox.

En particular para el desarrollo de los experimentos reportados en el presente trabajo, usamos la variedad del óxido de hierro que contiene un gran porcentaje de magnetita y algunas impurezas de sílica y titanio.

La magnetita es un mineral de hierro constituido por óxido ferroso-diférrico ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Su fuerte magnetismo se debe a un fenómeno de

---

ferromagnetismo: los momentos magnéticos de los distintos cationes de hierro del sistema se encuentran fuertemente acoplados, por interacciones antiferromagnéticas, pero de forma que en cada celda unidad resulta un momento magnético no compensado. La suma de estos momentos magnéticos no compensados, fuertemente acoplados entre sí, es la responsable de que la magnetita pueda comportarse como un imán. Presenta una estructura cristalina regular de color negro metálico. Es un mineral cristalino que pertenece a la familia de las ferritas, de composición química  $\text{Fe}^{3+}(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})\text{O}_4$ , su estructura cristalina es cúbica muy cercano al empaquetamiento compacto cúbico (c.c.p.) donde los intersticios octaédricos y tetraédricos son ocupados parcialmente por iones  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  [16]. La dirección de fácil magnetización de la magnetita es la (111). Su temperatura de Curie,  $T_c$  es de  $580^\circ\text{C}$ , y la magnetización de saturación a temperatura ambiente,  $j$  es 480 G. Por otro lado su resistividad eléctrica,  $\rho$  es  $4 \times 10^{-3}$  ohm/cm; esta se atribuye al continuo intercambio de electrones entre los iones  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  que ocupan las posiciones octaédricas, su peso molecular es de 231.55, densidad de  $5.2 \text{ g/cm}^3$  [17] , [18].

Existen en la literatura diferentes técnicas de obtener la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), entre ellas esta la basada en coprecipitación de soluciones parcialmente reducidas de cloruro ferrico, otra técnica se basa en la obtención a partir de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con un tratamiento térmico apropiado. Por otra parte, debido a que es abundante en la naturaleza se le puede extraer de ella en forma de granos y generalmente se encuentran junto con silicatos, en algunas ocasiones la composición puede ser tan alta como el 50%.

---

Para la realización de nuestro trabajo, los granos del óxido son recolectados de la arena común, pasando un imán de barra por encima de ella. Como las partículas de la muestra que se recolecta son acompañadas en un porcentaje variable de impurezas, principalmente de sílice es necesaria que sean separadas. Para ello, se pasa nuevamente el imán por encima de la muestra esparcidas sobre una mesa a una distancia tal que las partículas con gran porcentaje de sílice no sean atraídas.

A las partículas atraídas por el imán, se vuelven a esparcir en una mesa y luego se le vuelve a pasar un imán encima de ellas, lo suficientemente lejos como para que solo sean atraídas las partículas con mayor contenido del óxido de hierro.

Para la preparación de los fluidos magneto-reológicos se requiere de partículas magnéticas cuyo tamaño sea del orden de micras. Los granos de óxido que encontramos en la naturaleza son generalmente muy grandes para usarlos directamente en la preparación de los fluidos magneto-reológicos. Por esto es necesario usar un método apropiado para a partir de ellos, obtener partículas más pequeñas. En procesos industriales, como en la fabricación de cementos, es común el uso de molienda de polvos metálicos.

En seguida describimos el proceso de reducción de tamaño por medios mecánicos. Pues es este el método que usamos en el presente trabajo de tesis.

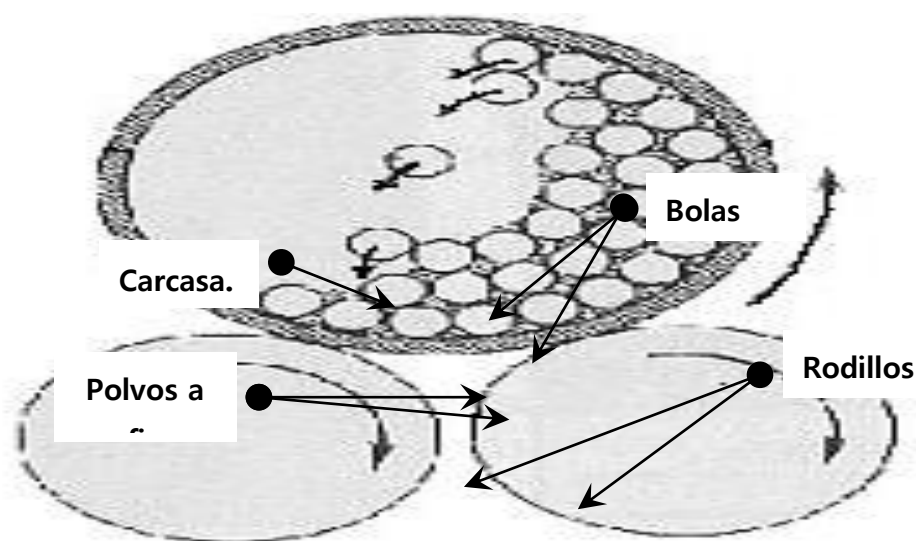
## 1.4 REDUCCIÓN DE TAMAÑO BAJO METODOS MECÁNICOS.

El método de molienda de polvos es el método primario para reducir el tamaño de partículas grandes y de partículas aglomeradas. Durante la molienda, las fuerzas actúan en las partículas para modificar su forma y tamaño. Fuerzas de impacto, desgaste, corte y de compresión afectan a la partícula (Ver figura 1.5).

Este método mecánico es utilizado en la industria para refinar el tamaño de partícula de cerámicos o metales. Una de sus desventajas mayores es que introduce contaminación de hierro en los polvos. Su mayor ventaja es que tiene posibilidad de alcanzar una alta producción.

Algunos de los dispositivos de molienda comercialmente disponibles son los molinos de bolas, molinos de martillos, de vibración y molino horizontal de bolas. [19], [20]

Figura 1.4 Muestra una vista de la acción de fuerzas en un molino de bolas. Fuente: "Powder Metallurgy Science" Second Edición, R.M. Gernert, MPIF.



La molienda mecánica es el método más usado para la producción de metales duros y óxidos de polvo [22]. El progresivo interés por los polvos metálicos con tamaños de partícula finos, producidos por atomización ha reavivado el interés en la molienda, particularmente en la formación de aleación al estado sólido. La molienda de materiales frágiles y dúctiles es de fundamental interés en la investigación y económicamente importante en aplicaciones industriales [19].

#### **1.4.1 Objetivos de la molienda mecánica.**

- Reducción de tamaños de partículas
- Cambio de forma.
- Aglomeración.
- Formación de aleación al estado de sólido (aleación mecánica).
- Mezcla en estado sólido (aleación incompleta).
- Modificación, cambio o alteración de las propiedades del metal (densidad, fluidez y endurecimiento en el caso de aleación mecánica).

#### **1.4.2 Parámetros de molienda.**

Los parámetros de la molienda en un molino de bolas son los elementos que intervienen en el proceso de desintegración, son: la velocidad del molino,



---

la superficie de las bolas, la selección del material de las bolas, la distribución de tamaños de bolas y su densidad.

- **Velocidad del molino.** Permite que actúen las fuerzas de colisión y que se transmita la energía cinética entre dos o más elementos de molienda. El movimiento de las bolas varía mucho, actuando también las fuerzas de fricción entre los elementos de molienda. Estas últimas fuerzas son derivadas por el movimiento rotacional de los balines dentro del molino y el contacto de las paredes con las bolas.
- **La superficie de las bolas.** La superficie muy áspera y una gran energía de fricción, incrementan la acción abrasiva. Las fuerzas de fricción ejercen una acción de desgaste entre las partículas, reduciendo su tamaño.
- **Las fuerzas de impacto.** Las fuerzas de impacto reducen los tamaños de partículas en la molienda, estas son deseables para el proceso de formación de los polvos metálicos, como la producción de hojuelas de polvo. La molienda por atrición es más efectiva en polvos finos para moler materiales duros y dúctiles. En este tipo de molienda predominan las fuerzas por atracción y las fuerzas por impacto. Cuando las fuerzas son muy enérgicas, la soldadura puede ocurrir entre las partículas de

---

polvo, entre las partículas de polvos y las bolas, y entre las partículas de polvo y las paredes del molino [21].

- **La selección del material.** Para materiales duros y frágiles, la resistencia a la fractura es el único criterio de selección. Los medios de molienda grandes de materiales densos son usados en molindas para obtener partículas grandes. Mientras que los medios de molienda de diámetros más pequeños son usados para molindas finas, por ejemplo cerámicos.

## 1.5 OBTENCIÓN DE LA MAGNETITA POR MOLIENDA

Existen dispositivos comercialmente disponibles para la molienda de partículas como son: molinos de los martillos, de vibración y molino horizontal de bolas. Este último es el que se utilizo para la molienda mecánica de la magnetita. Se coloca una muestra de 25 gramos de magnetita natural agregándole 0.3 ml de alcohol cuyo fin es el de humedecer un poco al material, se cierra herméticamente y posteriormente es llevado a la mesa de rodillos, la cual es accionado por un motor de potencia de 0.5 Hp, con una velocidad máxima de 1750 rpm.



**Graficas 1.5 MOLINO HORIZONTAL DE BOLAS  
MOLINO DE BOLAS**



**MESA DE RODILLOS PARA  
MODELO DCX PLUS.**

La medición de la muestra de 25 gramos fue pesada usando una balanza analítica de precisión  $-0.0004$  gr. En el proceso de molienda, durante el movimiento se provoca el impacto entre los balines y como resultado las partículas se trituran. Este proceso es favorecido debido a que los óxidos son relativamente frágiles.

Las partículas obtenidas usando el molino de bolas presentan una amplia dispersión de tamaños y formas, dependiendo del tiempo de molienda. Con un tiempo de molienda de 240 minutos, tenemos un rango de tamaños de 4 a 15  $\mu\text{m}$ . Al final de cada molienda, se lava la muestra con agua para eliminar las impurezas. En los estudios de reología y estructuración que se quieren realizar en los fluidos MR, es necesario disponer de partículas lo mas homogéneas posibles en forma y tamaño para obtenerlas se realizó un tamizado que consiste en pasar las partículas por un conjunto de mallas las cuales van a ir separando las partículas por tamaños para tener una estandarización.

## 1.6 ALGUNOS FLUIDOS MR QUE CONTIENEN HIERRO.

En la tabla 3 podemos observar algunos fluidos MR elaborados por Lord Company que tiene disponibles.

Tabla 3 fluidos MR que contienen hierro (fuente: <http://literature.lord.com/root/rheonetic/prop5.pdf>)

Fluido MR	Porcentaje de volumen de hierro	Fluido portador	Densidad gr./cm <sup>3</sup>
MRX-126 DP	26	Aceite de hidrocarburo	2.66
MRX-140 D	40	Aceite de hidrocarburo	3.64
MRX-242 AS	42	Agua	3.88
Mrx-336 AG	36	Aceite de silicona	3.47

Otro elemento con el que se realizaron algunas mediciones fue el hidróxido de carbonilo que contiene 98% de hierro elemental puro, no se encuentra formando sales ferrosas o férricas, proviene de la descomposición de hierro penta carbonilo y tiene un tamaño de partícula de 4 a 6 micrones

---

## Capítulo 2

### DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.

#### 2.1 Introducción.

El primer uso de la palabra 'reología' fue sugerido por Eugene Cook Bingham, quien también describió los objetos como  $\pi \alpha \nu \tau \alpha \epsilon \acute{\iota}$  ("panta rhei", de los trabajos de Heraclito, un filósofo griego pre- socrático, que vivió en el año 500 d. C.), para definir la rama de la física que tiene por objeto el conocimiento de la deformación o flujo de la materia. La reología moderna, además del comportamiento elástico y viscoso, estudia los sistemas complejos que presentan simultáneamente propiedades elásticas y viscosas, es decir sustancias visco-elásticas. Así, son objetos de estudio de la reología materiales tales como plásticos, fibras sintéticas, pastas, lubricantes, cremas, suspensiones, emulsiones, etc., los cuales constituyen la materia prima de las industrias farmacéuticas, cosmética, agroalimentaria, cerámica, de pinturas entre otras.

La Reología esta bien establecida ahora como la ciencia de la deformación y la fluidez de la materia: es el estudio de la manera en la que los materiales responden a la aplicación de estiramiento y tensión. Todos los materiales tienen propiedades reológicas y el área es relevante en muchos campos de estudio, como en la geología, tecnología de concretos, mecánica

de suelo, procesos de fabricación de plástico, polímeros, tribología (estudio de la lubricación, fricción), bioingeniería, reología interfacial, materiales estructurales, electro-reología y magneto-reología. El entendimiento de la reología es crítico en la optimización del esfuerzo del desarrollo de los productos, en la metodología de proceso y la calidad del producto final.

Existen numerosas áreas donde los datos reológicos son necesarios en el adecuado desarrollo de la industria:

- a. Procesos de cálculos de ingeniería que involucran equipos como: intercambiadores de calor, homogenizadores y viscosímetros en línea.
- b. Determinación de la funcionalidad del ingrediente en el desarrollo del producto.
- c. Control de calidad del producto intermedio o final.
- d. Examen de vida del estante.
- e. Evaluación del sustento de textura en correlación de datos sensoriales.
- f. Análisis de ecuaciones reológicas de estado o ecuaciones constitutivas

---

## 2.2 ESTIRAMIENTO Y TENSION.

Empezaremos nuestro estudio con una exposición del significado de los conceptos que usaremos a lo largo de este trabajo. En particular son fundamentales los conceptos de tensión y estiramiento.

La tensión es una fuerza que tira ó es la fuerza aplicada por unidad de superficie y depende del punto elegido; por ejemplo, la fuerza que actúa sobre un cable que sostiene un peso. Bajo tensión, un material suele estirarse, y recupera su longitud original si la fuerza no supera el límite elástico del material. Bajo tensiones mayores, el material no vuelve completamente a su situación original, y cuando la fuerza es aún mayor, se produce la ruptura del material.

Estiramiento es todo tipo de deformación causado por fuerzas externas

## 2.3 COMPORTAMIENTO DE LOS SÓLIDOS

Cuando una fuerza es aplicada a un material sólido y la tensión resultante contra la curva de estiramiento es una línea recta desde el origen, el material obedece a la ley de Hooke. La relación puede ser establecida por una fuerza de tensión y una fuerza de estiramiento. Estos materiales no fluyen, son elásticos linealmente. La tensión permanece constante hasta que la fuerza es retirada y el material regresa a su forma original. A veces la forma no se

---

recupera completamente debido a un retraso por un proceso atómico conocido como inelasticidad. Por lo que la tensión es la fuerza a la que puede estar sometido un cuerpo sin alterar su estado molecular, mientras que la elasticidad es el grado de deformación que puede alcanzar un cuerpo antes de romperse o deformarse.

La ley de Hooke puede ser usada para describir el comportamiento de muchos sólidos (metal, cáscara de huevo, pasta seca, caramelo duro, etc.) cuando son sujetas a pequeños estiramientos, típicamente menos de 0.01% debido a que grandes estiramientos con frecuencia producen una fractura o un comportamiento no- lineal. El comportamiento de los sólidos de Hooke es investigado por el estudio de la compresión de los ejes de una muestra cilíndrica. Si un material es comprimido y este experimenta una carga en el largo y el radio, entonces el estiramiento normal y la tensión pueden ser calculados y esta información puede ser utilizada para determinar los módulos de elasticidad de una muestra.

Si un material esta sujeto a un cambio uniforme con una presión externa, este puede experimentar un cambio volumétrico. Estas cantidades son usadas para definir los módulos de volumen.



---

## 2.4 REOMETROS

Para el estudio de las propiedades elásticas y viscosas se necesitan instrumentos los cuales se denominan Reómetros. Los reómetros miden la viscosidad dinámica, la viscosidad compleja, el módulo elástico, el módulo viscoso y el módulo de cesión.

El costo de los reómetros varía tremendamente desde el viscosímetro de vidrio hasta el caro instrumento rotatable capaz de medir propiedades dinámicas y diferencias de tensión normales.

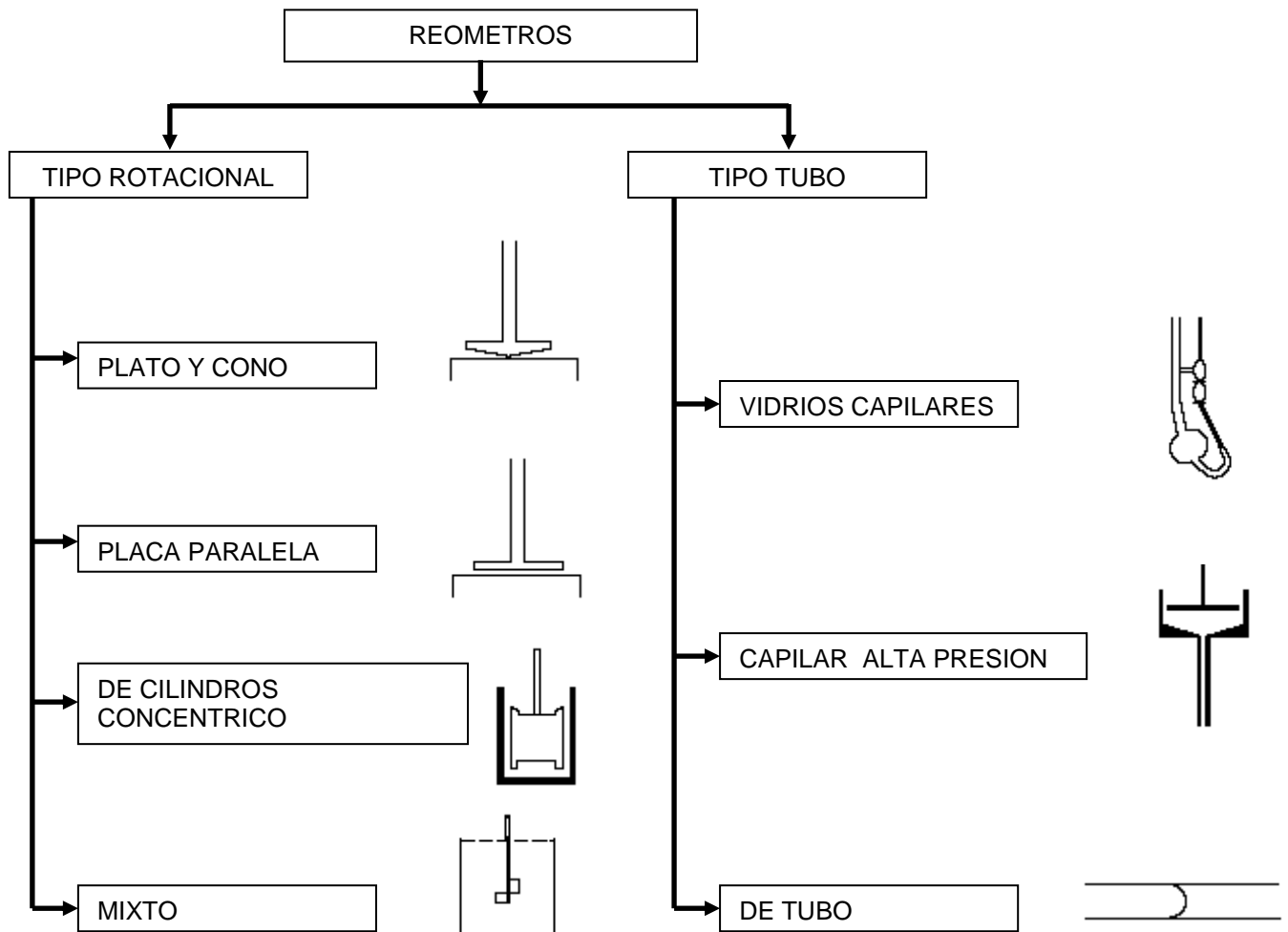
La utilización del tipo de reómetro varía de acuerdo a los requerimientos del proceso que se quiere analizar, en algunos casos es necesario usar varios de ellos. Por ejemplo, en la observación del comportamiento reológico en pinturas, las muestras son sometidas a una amplia gama de velocidades de deformación, desde aquellas que son extremadamente pequeñas hasta las relacionadas con los diferentes tipos de aplicación que son considerablemente mayores.

De acuerdo a su utilización encontramos reómetros para el control de calidad y para el desarrollo de investigación. Los primeros tienen un principio de funcionamiento más simple, ya que son fabricados para cumplir con los requerimientos de un proceso industrial predeterminado, por lo que su

velocidad de corte de igual manera ya fue previamente establecida para determinadas características. Los reómetros utilizados para fines de investigación son instrumentos con una mayor complejidad en su funcionamiento debido a que la velocidad de corte puede ser manipulada y definida para la obtención de valores bajo diferentes rangos de la misma; además que se pueden analizar diferentes sustancias.

Los reómetros se encuentra clasificados por factores geométricos en dos categorías los de tipo rotacional y de tipo tubo Fig. 2.3. Dentro de los de tipo rotacional se encuentran de cono y plato, los mixtos, de cilindros concéntricos, de platos paralelos, mientras que los de tipo tubo se encuentran: de vidrios capilares, de presión capilar alta y de pipa.

FIGURA 2.4 CLASIFICACION DE LOS REOMETROS (fuente: <http://www.ual.es/~jfernand/TA/Tema4/Tema4-PropiedadesFisicasyReologia.pdf>)



### 2.4.1 Reómetros de tipo rotacional

Estos pueden operarse a una velocidad angular constante (esfuerzo estacionario) a esfuerzo constante o en forma oscilatoria (dinámica). Algunas de las funciones de los reómetros de rotación: en el control de modo tensión facilita la colección de los datos que nos sirven para entender la estructura interna de los materiales.

---

En la geometría conocida como cono y plato solo necesita una pequeña cantidad de muestra para la medida. Debido a su tensión superficial el líquido se mantiene entre una placa y un cono, de ángulo muy pequeño, situado muy cerca de la placa. Se aplica una velocidad de rotación a uno de los dos elementos (generalmente el cono) y se mide el par sobre el segundo; la fórmula de cálculo de la viscosidad es:

$$\eta = \frac{3\alpha}{2\pi R^3} \dots\dots\dots (2)$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo del cono y R su radio (23).

Presenta algunos problemas como los efectos de borde y efectos resultantes de la fuerza centrífuga.

Los sistemas de platos paralelos y los de cono y plato son comúnmente utilizados para la medición de bajos gradientes y los cálculos a realizar son simples, cuando el ángulo del cono es relativamente pequeño.

### **2.4.2 Reómetros de tipo tubo.**

Este sistema solo permite el paso de los materiales a través de los aparatos. Los reómetros tubulares tienen la capacidad de medir mezclas con partículas de mayor tamaño comparadas con las recomendadas para los rotacionales (de placas paralelas o de cono y placa); los problemas más frecuentes con este tipo de reómetros es el resbalamiento de la mezcla.

---

La Operación gravitacional de vidrios capilares, como el tipo de Canonn Fenske mostrado en la figura 2.3 son solo recomendados para los fluidos Newtonianos porque el corte varía durante la descarga y es un tubo capilar por el que el fluido cae por gravedad.

Los de tipo capilar de alta presión operan a altos gradientes de deformación, pero generalmente presentan problemas de corrección de presión en los extremos, este reómetro solo permite una sola pasada del material a través del instrumento es rápido y sencillo de usar

Los viscosímetros de Tubo son construidos con una gran resistencia y pueden funcionar a elevadas presiones. La información en bruto para estos viscosímetros es la de gota de presión y flujo volumétrico. La gota de presión es obtenida de los transductores de presión o, en el caso de los viscosímetros del tubo en forma de u, de la altura al punto de referencia. El flujo volumétrico es obtenido del flujo total. Es importante conocer la densidad del fluido ya que se requiere para este cálculo.

Otro tipo de viscosímetro es el de vibración que utiliza el principio del cargamento superficial, donde la superficie de una punta de prueba sumergida (una esfera o barra) genera una onda de corte que se disipa en el medio que lo rodea. Se utiliza un contenedor grande para que la fuerza no llegue a la pared y no las refleje a la punta de prueba. Las características de humedecer depende del líquido y es una función del producto de la viscosidad fluida y de la densidad. Los viscosímetros de vibración son populares como instrumentos

en línea para los sistemas de control de proceso. Es difícil el uso de estas unidades para la evaluación fundamental de las propiedades reológicas de los fluidos no-Newtonianos, pero los resultados subjetivos obtenidos con frecuencia se relacionan bien con sustentos importantes de atributos de calidad. El tiempo de coagulación y la estabilidad de cuaje de la leche retenida, por ejemplo, se ha investigado exitosamente usando el viscosímetros de vibración.

## 2.5 SISTEMA DE REOMETRIA.

Fig. 2.5 Sistema de reometría (fuente: propia)



Nosotros utilizaremos un sistema de reometría de Brookfield que consiste en un reómetro de tipo rotacional de rapidez controlada, este tipo de reómetro se utiliza generalmente para mediciones de calidad. El reómetro LV-III Ultra Brookfield, de tipo rotacional genera resultados de módulo cortante, velocidad de deformación y viscosidad. Está formado de una base, una

geométrica cono-plato, con un cono de 5 cm. de diámetro y ángulo de 0.3 grados con mecanismos electrónicos y procesamiento de datos que nos permiten controlar el proceso de muestreo. El cono y plato es uno de los diseños más populares pues este aplica una velocidad de corte uniforme a toda la muestra. El diseño de cono y plato se limita a valores bajos y medios de velocidad de corte (0.1 - 1000 1/ seg.), un husillo que es el que sostiene el cono. Para el control de la temperatura utiliza un controlador de temperatura TC-6021 de Brookfield, empleando como refrigerante el agua desionizada que circula a través del plato por medio de dos mangueras de hule tiene una precisión de  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . El reómetro tiene un sensor conectado al cono que se sumerge en el líquido de prueba, este mide la viscosidad del flujo a través de la resistencia que este presenta ante el movimiento rotacional del cono y es medida por la deflexión que ocurre en un resorte calibrado. Las mediciones de viscosidad son dadas en centipoises (cP) y esta determinada por la velocidad de rotación de la aguja, el tamaño y la forma de la misma. El reómetro consta de un puerto que permite mandar la información de las cantidades medidas a una PC.

Para la generación de los campos magnéticos que se aplican a las muestras hemos usado un conjunto de bobinas formado por dos pares de bobinas de Helmholtz que nos permiten aplicar un campo magnético principal vertical y uno secundario de forma transversal de baja intensidad al que llamamos campo perturbativo. Se usa también una balanza digital para pesar las partículas utilizadas en cada prueba así como una pipeta para realizar las

---

mediciones del líquido utilizado y un pincel para dispersar las partículas por agitación.

El reómetro está conectado a una PC y por medio del Programa de cómputo Rheocalc de Brookfield nos permite realizar los experimentos y guardar los datos. El software permite la creación de programas a través de comandos que sirven para aumentar o disminuir la velocidad (SSI), realizar un bucle (LSC-LEC), controlar el tiempo de ejecución (WTI), entre otros. Después de adquirir los datos se exportan a Excel, para poder comparar y analizar los resultados así se conoce el comportamiento de las cantidades de interés cuando variamos las condiciones de campo estático, de campo perturbativo y de concentración de partículas.

Para realizar nuestras mediciones e interpretar los resultados necesitamos conocer cada uno de los parámetros que mide el reómetro y que describiremos continuación.

- El módulo cortante ( $\sigma$ ) o esfuerzo de corte o cizalla es la fuerza tangencial por unidad de área

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[ \frac{\text{Dina}}{\text{cm}^2} \right] \dots\dots\dots 3$$

- la velocidad de deformación “shear rate” ( $\gamma$ ) es el cambio de velocidad que se observa entre una capa de fluido y otra separada por una distancia pequeña. Para una geometría donde una superficie se mueve respecto de otra a una distancia pequeña  $\gamma$  se obtiene dividiendo la



velocidad con que se mueven las superficies entre la distancia que las separa.

$$\gamma = \frac{dv}{dh} \left[ \frac{cm}{s} \right] \dots\dots\dots 4$$

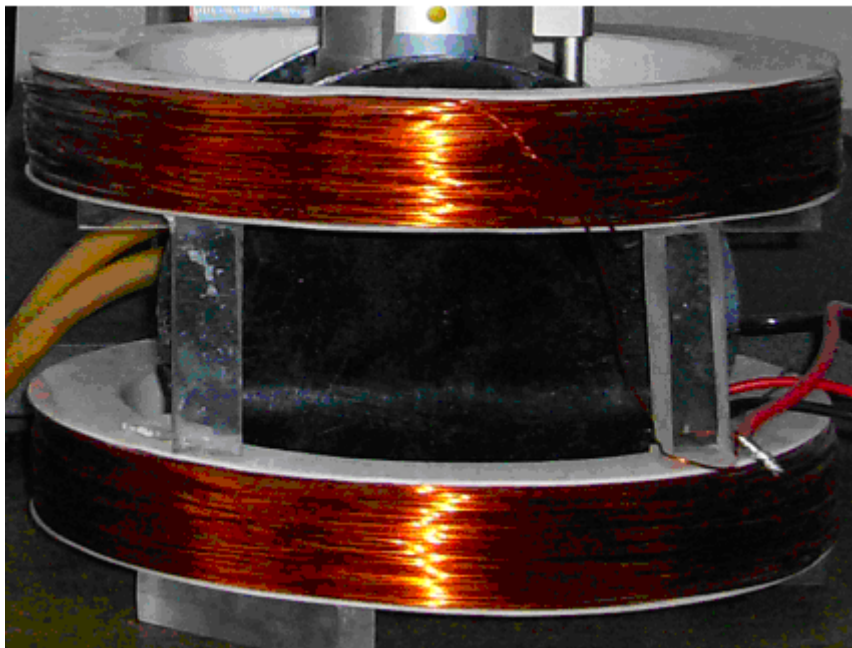
- la viscosidad ( $\eta$ ) que es la relación del esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación.

$$\eta = \frac{\sigma}{\gamma} \square$$

$$\left[ Poise \right] \dots\dots\dots 5$$

## 2.6 DESCRIPCIÓN DE LAS BOBINAS DE HELMHOLTZ.

Figura 2.6 bobinas de Helmholtz (Fuente propia).



---

Nuestro sistema de reometría Brookfield no cuenta con accesorios para mediciones con campos magnéticos por lo tanto se utilizaron dos pares de bobinas de Helmholtz, diseñadas tomando en cuenta las dimensiones del reómetro. En particular del contenedor de la muestra que tiene un diámetro externo de 6.3 cm. Para el diseño se considero además la existencia de dos mangueras de hule que llegan al contenedor de la muestra proveniente del baño térmico que controlada la temperatura de la muestra. No debemos olvidar el sujetador del contenedor que lo une al dispositivo electrónico que ocupa un espacio de 9 cm. de forma vertical.

Las bobinas de Helmholtz son empleadas para generar los campos magnéticos  $B$  en un intervalo de  $10 \mu\text{T}$  a  $50 \mu\text{T}$ . En este dispositivo el valor del campo magnético  $B$  es controlado por la intensidad de corriente  $I$  que circula a través de la bobina. Podemos decir que la bobina de Helmholtz es un dispositivo que consiste de dos bobinas circulares del mismo radio  $r_0$ , con un eje común, separadas por una distancia de tal forma que la segunda derivada del vector de inducción magnética se anule en un punto del eje, que se localice a la mitad de la separación entre las bobinas. En tales circunstancias es posible probar que el módulo de vector de inducción magnética en la región del espacio central es prácticamente constante. Considere entonces el dispositivo que se muestra en la figura 2.5, donde  $2b$  es la separación entre las bobinas y  $N$  el número de espiras de cada bobina.

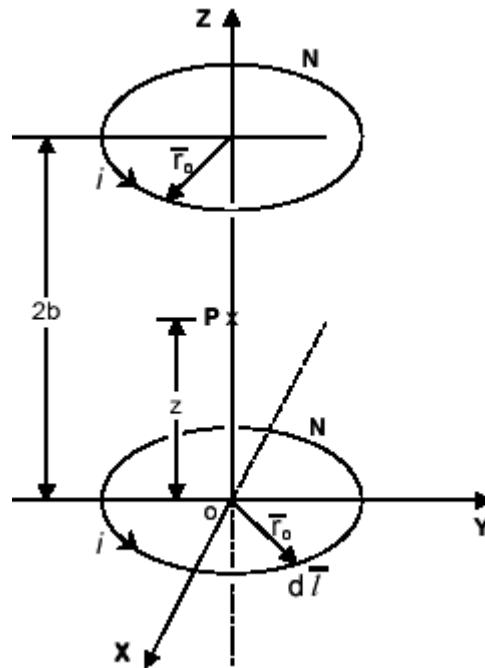


Figura 2.6.1 Representación grafica de los parámetros que intervienen en las bobinas

La inducción magnética en el punto P, se escribe:

$$B_z(z) = \frac{N * \mu_o * I * r_o^2}{2} \left[ \frac{1}{(r_o^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{(r_o^2 + (2b - z)^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \dots\dots\dots 6$$

Calculando la primera derivada de \$B\_z\$ con respecto a la variable \$z\$ se obtiene la expresión:

$$\frac{dB_z}{dz} = \frac{N * \mu_o * I * r_o^2}{2} \left[ \frac{-3z}{(r_o^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} + \frac{3z}{(r_o^2 + (2b - z)^2)^{\frac{5}{2}}} \right] \dots\dots\dots 7$$

Expresión que se anula cuando  $z=b$ . De manera análoga, al calcular la segunda derivada de  $B_z$ , se tiene:

$$\frac{d^2 B_z}{d^2 z} = -\frac{3N * \mu_o * i * r_o^2}{2} \left\{ \frac{1}{(r_o^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{5z^2}{(r_o^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{(r_o^2 + (2b-z)^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{5(z-2b)}{(r_o^2 + (2b-z)^2)^{\frac{3}{2}}} \right\}$$

$$\left. \frac{d^2 B_z}{d^2 z} \right|_{z=b} = -\frac{3N\mu_o * i * r_o^2}{2} \left\{ \frac{b^2 + r_o - 5b^2 + b^2 + r_o - 5b^2}{(r_o + z^2)^{\frac{7}{2}}} \right\} \dots\dots\dots 9$$

Expresión que se anula si  $2r_o^2-8b^2=0$ ; es decir  $r_o=2b$ . Lo anterior indica que la condición establecida se cumple si el radio de las bobinas es igual a la separación entre ellas: en estas circunstancias,  $z = \frac{r_o}{2} = b$  y

$$B_z(z) = \frac{N * \mu_o * i * r_o^2}{2} \left\{ \frac{1}{(r_o^2 + r_o^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{(r_o^2 + r_o^2)^{\frac{3}{2}}} \right\} \dots\dots\dots 10$$

Simplificando de obtiene

$$B_z(z) = \frac{N * \mu_o * i * 8}{r_o * 5^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots 11$$

O bien,

$$B_z = \frac{N * \mu_o * i}{\frac{5^{\frac{3}{2}} r_o}{4}} = 0.716 \frac{N * \mu_o * i}{r_o} \dots\dots\dots 12$$

En nuestro caso se ocupara un par de bobinas de Helmholtz con las que se producirán los campos magnéticos, el campo magnético primario y el campo secundario o perturbativo. Es decir se tiene un campo de 80 G y le suministro impulsos de 12 G. Las bobinas tienen las siguientes características.

Tabla 4.-Características de las bobinas (fuente: Propia )

	Campo (T)	INTENSIDAD (A)	N (· espiras)	Radio (m)	$\mu_0$ (Tm/A )
Bobina 1	0.008	2.5	356	0.10	$1.257 \times 10^{-6}$
Bobina 2	0.0012	0.154	71	0.07	$1.257 \times 10^{-6}$

Para el par de bobinas que genera el campo principal, la relación entre el campo y la corriente satisface la siguiente ecuación.

$$B = 31.6076 I + (-0.742161) \dots\dots\dots 13$$

Donde:

B es el campo magnético y I nos representa la intensidad de corriente eléctrica no olvidar que esa una aproximación o ajuste, realizada utilizando el método de regresión lineal.

---

## 2.7 PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MEDICIONES

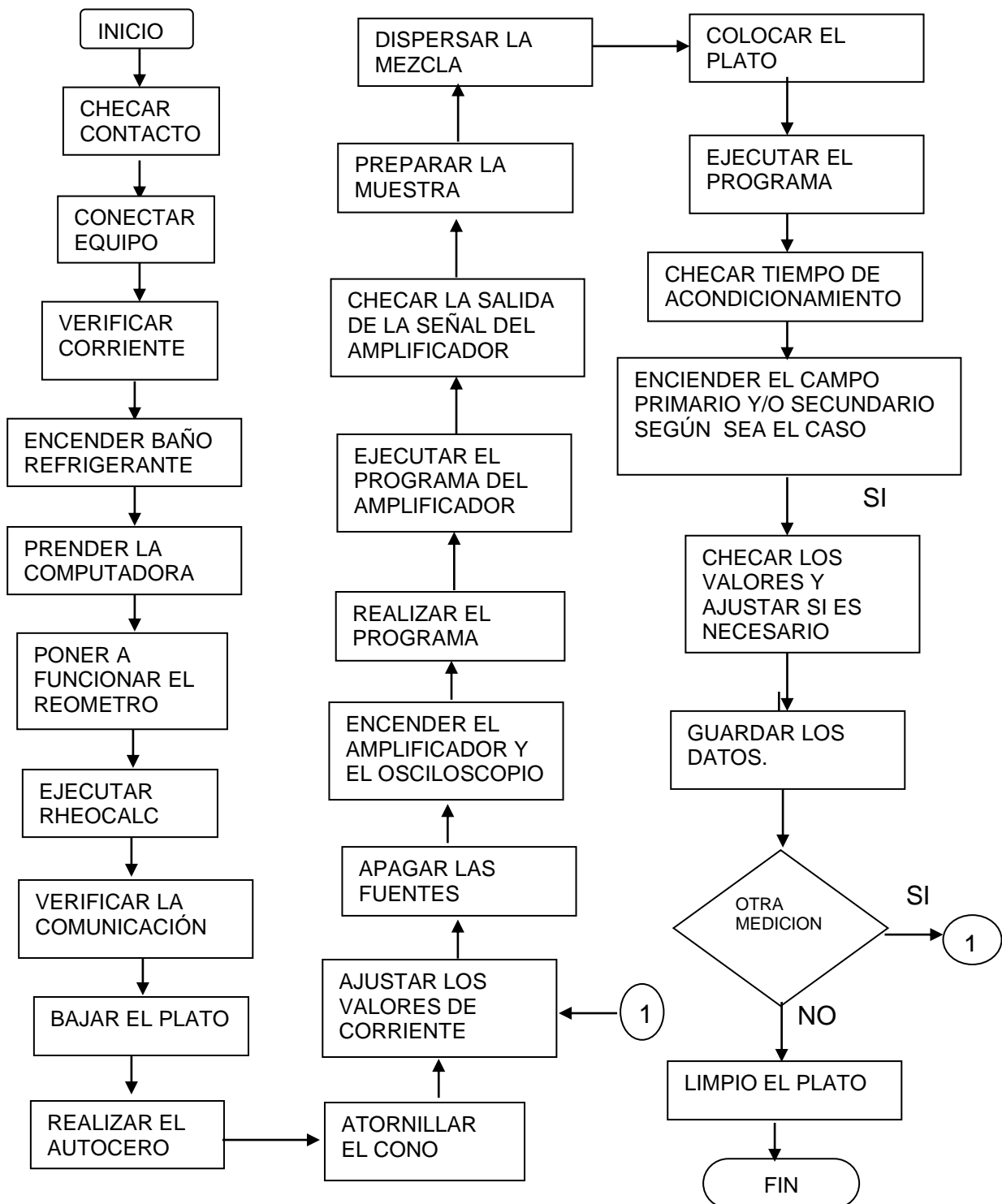
Para la toma de mediciones, debemos seguir el siguiente procedimiento indicado en el flujograma de la Fig. 2.6.

1. Checar que los contactos se encuentren en condiciones adecuadas
2. Conectar todo el equipo (las dos computadoras, el reómetro, el TC-6021).
3. Verificar que exista corriente.
4. Encender el baño refrigerante.
5. Prender la computadora.
6. Poner a funcionar el reómetro y seleccionar control externo (1).
7. Ejecutar el programa Rheocalc.
8. Confirmar que halla comunicación entre la PC y el reómetro, para esto se observa en la pantalla de inicio si junto a la leyenda de reómetro, aparece “encendido” el led verde. En caso contrario seleccione el puerto COM donde se conecta el reómetro, se guardan los cambios, se cierra programa y luego se vuelve a abrir.
9. Si esta puesto el plato en el reómetro se baja.
10. En el programa, se realiza el Autocero, para esto se acciona la opción en la pantalla de inicio (seguir las instrucciones).
11. Atornillar el cono.

- 
12. Ajustar los valores de corriente que pasan por el par de bobinas principales
  13. Apagar las fuentes de corriente.
  14. Encender el amplificador y el osciloscopio.
  15. Realizar el programa.
  16. Ejecutar el programa que envía la señal al amplificador y se ponen los valores de frecuencia que se usaran.
  17. Ver la señal de salida del amplificador y luego en el programa a la amplitud darle un valor de cero.
  18. Preparar la muestra, para esto se mide la cantidad de aceite que se requiere (cálculo previo) y se vierte en el plato, se pesa la cantidad de material magnético que se usara para esto:
  19. Dispersar las particular usando un pincel en el aceite (por agitación).
  20. Colocar el plato en el lugar correspondiente.
  21. Ejecutar el programa del reómetro.
  22. Poner la muestra a un tiempo de acondicionamiento predeterminado antes de encender los campos.
  23. Encender el campo primario y luego el secundario o ambos según el caso
  24. Verificar constantemente los valores de corriente en las bobinas principales, de ser necesario ajustar los valores.
  25. Guardar los datos.
  26. Preguntar si se requiere de otra medición, si es afirmativa la respuesta regresamos al paso 19.
  27. En caso de ser negativo limpiar el plato y finalizar.

### 2.7.1 FLUJOGRAMA EXPERIMENTAL.

Figura 2.7.1 flujo grama del proceso experimental





---

## Capítulo 3

### PARTE EXPERIMENTAL.

Si se requiere obtener los máximos de los cambios en la respuesta reológica de nuestro sistema, es necesario que se investigue el comportamiento de la viscosidad bajo diferentes condiciones. Esto permitirá proponer un modelo y con ello la posibilidad de encontrar las condiciones para maximizar la respuesta.

Al realizar diferentes pruebas haciendo combinaciones de factores como la concentración de partículas, la cantidad de aceite, la intensidad de los campos y la frecuencia de la perturbación.

Preparar una serie de muestras de diferentes concentraciones de partículas. En la tabla 5 se especifican las cantidades de partículas y aceite que se usaran para preparar las muestras con la concentración que se requiera, recordando que los fluidos MR se pueden prepara con líquidos como el aceite de silicona, keroseno, aceite mineral, aceite de oliva, aceite de hidrocarburo y agua. Para nuestro estudio utilizaremos el aceite de silicona y aceite de transmisión de autos por sus características, viscosidad y accesibilidad para obtenerlo.

Tabla 5 datos que componen nuestra muestra (Fuente: Elaboración Propia)

Concentración	Cantidad de partículas (gr)	cantidad de aceite de silicona o de transmisión (ml)
0.01	0.1	9.9
0.02	0.2	9.8
0.04	0.4	9.6
0.06	0.6	9.4
0.08	0.8	9.2
0.1	1	9
0.13	1.3	8.7
0.16	1.6	8.4
0.2	2	8
0.25	2.5	7.5
0.3	3	7
0.35	3.5	6.5
TOTAL	17	103

Estos datos fueron obtenidos de la siguiente manera:

La masa  $m$  de magnetita de densidad  $\delta$  usada para preparar la muestra de volumen  $V_t$  con una concentración  $\phi$  de partícula.

$$m = \phi \delta V_t \dots\dots\dots 14$$

Donde por definición  $\delta$  es la razón entre la masa y el volumen de una sustancia.

$$\delta = \frac{m}{v} \dots\dots\dots 15$$

La concentración  $\phi$ , también llamada fracción de volumen ocupada por la fase sólida se obtiene de:

$$\phi = \frac{v_p}{v_t} \dots\dots\dots 16$$

Es decir  $V_p = V_t \phi$  y el volumen del fluido es  $V_t - V_p$

Ejemplo de cálculo para la concentración 1:

$$\phi = 0.01$$

$$m = \phi \delta V_t \dots\dots\dots 17$$

$$m = (0.01) * (5.1) * (10) = 0.51 \text{gr}$$

$$V_p = \frac{m}{s}$$

$$V_p = \frac{0.51}{5.1} = 0.1 \text{gr}$$

$$V_t - V_p = 9.9 \text{ml}$$

Se estudia la viscosidad como función del tiempo de una muestra de fluido magneto-reológico expuesta a diferentes condiciones de campo principal y de campo secundario. El llamado campo principal es un campo estático y el campo secundario es un campo transversal al principal, se considera como un campo perturbativo porque tiene una amplitud de solo 12 G RMS y es oscilatorio con una frecuencia de 4 Hz. Las muestras de nuestro fluido MR fueron preparadas usando magnetita mineral y aceite de silicona, se consideraron las siguientes concentraciones de partículas de magnetita mineral  $\phi = 0.03, 0.05, 0.07, 0.1$ , donde  $\phi$  es la fracción de volumen ocupada por las partículas en la dispersión. Para realizar el experimento se usan 10 ml de muestra. Para asegurar una buena dispersión inicial de las muestras los experimentos se someten a un pre-acondicionamiento, que consiste en

---

someter la muestra a condiciones de flujo en el reómetro a rapidez constante de 1 rpm durante 3 minutos en ausencia de campo magnético.

Para este estudio se realizaron cuatro series de experimentos dos con aceite de silicona mineral, uno con aceite de transmisión de autos y en una serie se cambiaron las partículas de magnetita por partículas de carbonilo y se utilizó aceite de transmisión de autos para observar su comportamiento.

### **3.1 SERIE 1 (MAGNETITA CON ACEITE DE SILICONA)**

#### **-Concentración 0.03**

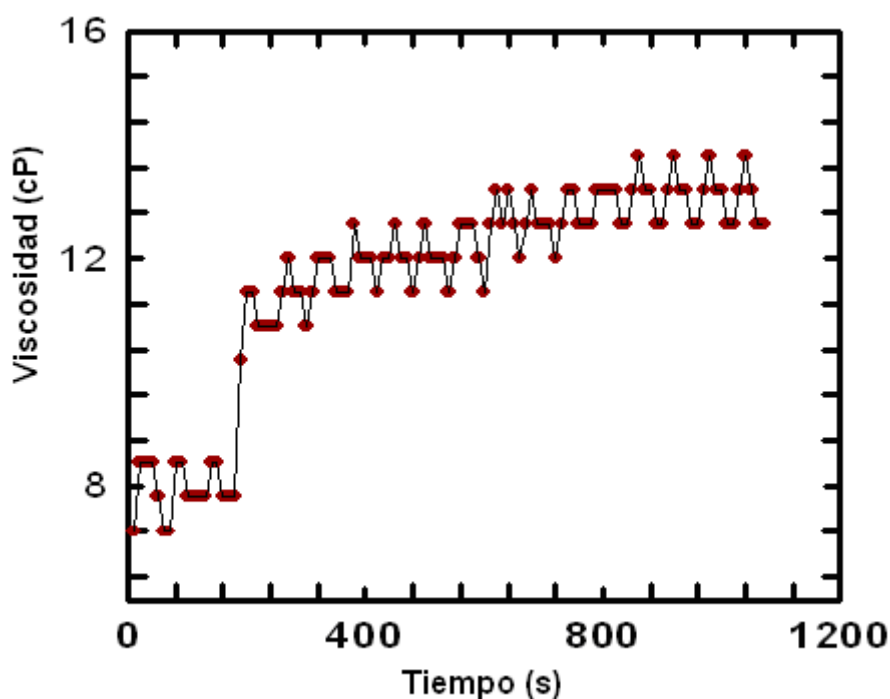
A continuación describimos los resultados de la viscosidad para un sistema diluido de concentración 0.03.

En general observamos que el campo produce cambios poco apreciables. Para cada experimento la muestra fue sometida a un pre-acondicionamiento que consiste, en poner la muestra por un tiempo de 5 minutos (300 seg.) encendiendo el campo primario de 80 G y después encender el campo perturbativo. Para obtener una referencia obtenemos la curva mostrada en la figura 3.1.1 donde se muestra el comportamiento de la viscosidad a un campo constante de 80 G.

Observamos cambios que la aplicación del campo magnético introduce cambios relativamente pequeños en la viscosidad. Primero hay un cambio casi abrupto y después cambios más lentos. También se observan una serie de oscilaciones que tienen una frecuencia de 50 seg.

Esta curva nos servirá de referencia para comparar el efecto del campo primario contra el que surge de aplicar el campo secundario

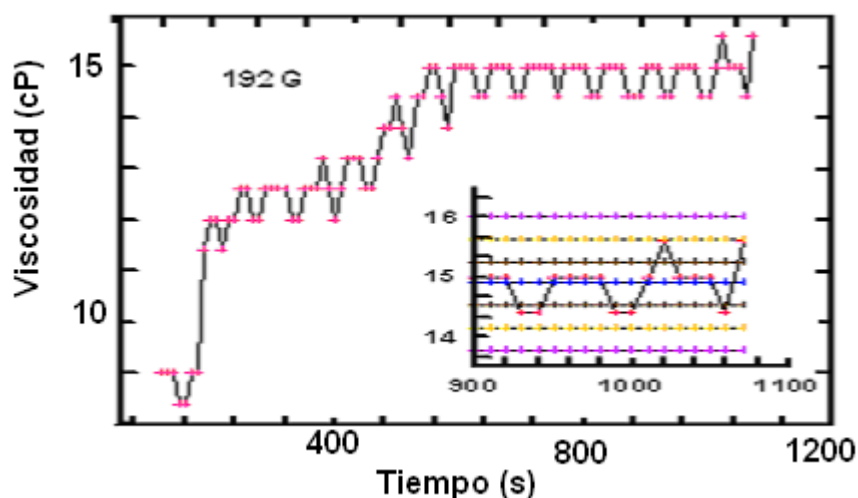
Grafica 3.1.1 comportamiento de la viscosidad de un fluido MR con pre-acondicionamiento con concentración de 0.3



En la Grafica 3.1.2 se muestra la curva 92G, donde se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de un fluido MR se le somete primero a un campo de 80 G durante 300 s y luego se incrementa el campo magnético a 92 G y se mantiene durante otros 300 seg., finalmente se disminuye el campo nuevamente al valor de 80 G y este valor se mantiene durante otros 300 s. Nótese que al aumentar el campo primario hay un

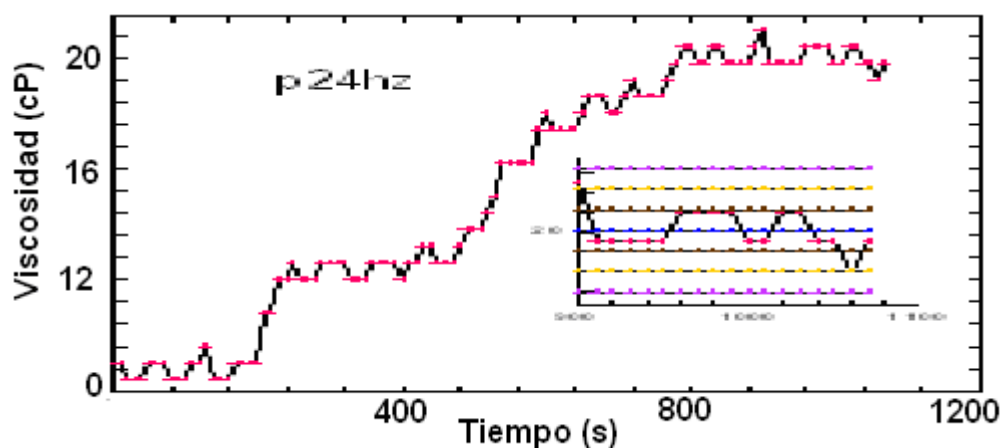
aumento de la viscosidad y luego se mantiene casi constante. Es de notar que al regresar el campo a 80 G, los valores de la viscosidad no disminuyen sino que se mantienen constantes.

Grafica 3.1.2 comportamiento de la viscosidad de un fluido MR con pre- acondicionamiento con concentración de 0.3



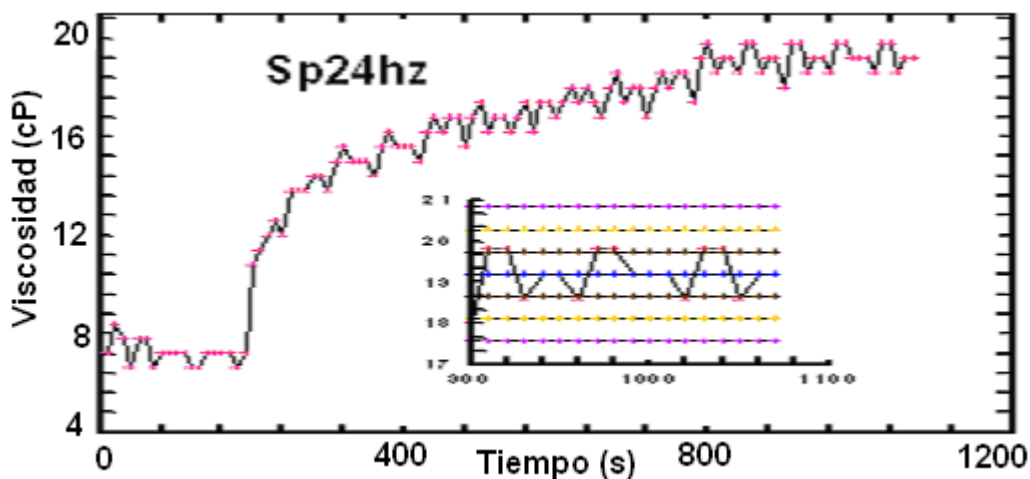
En la grafica 3.1.3 se muestra el comportamiento de la viscosidad cuando la muestra de fluido MR es sometida a un campo primario de 80 G durante 300 s, los siguientes 300 s se expone al campo secundario o perturbativo con una frecuencia de 4 Hz RMS y una oscilación de amplitud de 12 G y a continuación se apaga el campo perturbativo en los siguientes 300 s. Se puede destacar que la viscosidad va en aumento alcanzando los valores más altos en comparación con los obtenidos en experimentos previamente descritos.

Grafica 3.1.3 comportamiento de la viscosidad de un fluido MR con pre- acondicionamiento con concentración de 0.03



En la grafica 3.1.4 se observan los resultados de la viscosidad cuando a la muestra se somete simultáneamente a la acción del campo perturbativo y el campo primario. Nótese, como rápidamente alcanza volúmenes de 12-13 cP. Y luego continúa creciendo con menor rapidez.

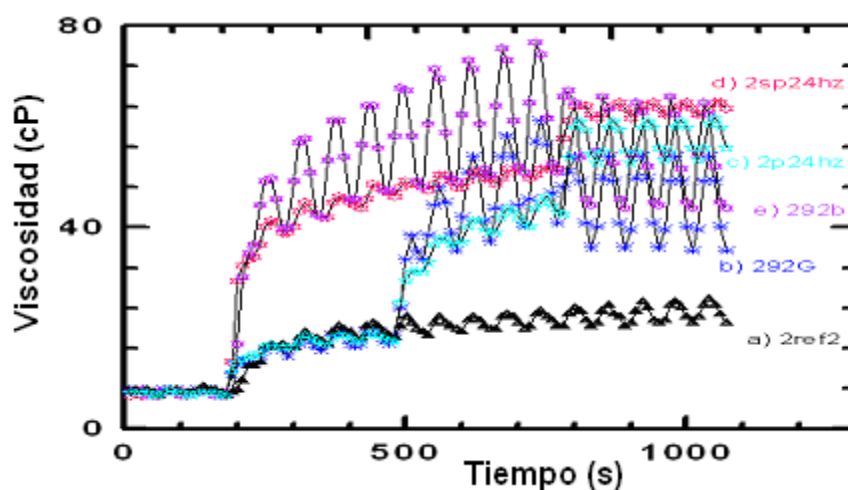
Grafica 3.1.4 comportamiento de la viscosidad de un fluido MR con pre-acondicionamiento con concentración de 0.3



## - Concentración 0.05

En la Grafica 3.2 se compara el comportamiento de la viscosidad para varias condiciones de campo primario y de campo secundario. Tenemos experimentos a campo constante en la curva a) 80 G que nos permite tener una idea del cambio existente al realizar la comparación con alguna de las curvas donde se aplica el campo secundario y la curva b) 92 G. En la que a simple vista se observa el incremento de la viscosidad. También tenemos curvas donde esta presente la aplicación de los dos campos. Todas las graficas empiezan con un pre-condicionamiento de 1 rpm durante 300 segundos. Observamos el siguiente comportamiento general donde al aplicar el campo secundario la viscosidad tiende a incrementar y cuando este campo se apaga la viscosidad aumenta con mayor rapidez aunque con fluctuaciones mas enmarcadas.

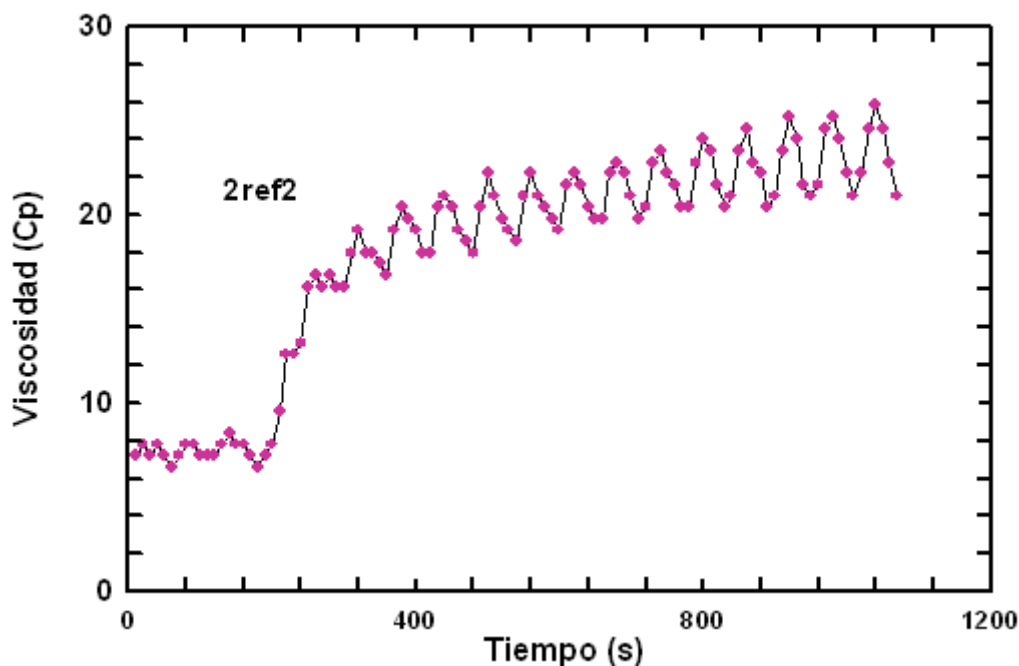
La grafica 3.2 nos muestra el comportamiento de una mezcla con una concentración de 0.05 con condiciones generales similares a la anterior.





En seguida describimos con mayor detalle algunas características de las curvas.

Grafica 3.2.1 nos indica el comportamiento de referencia

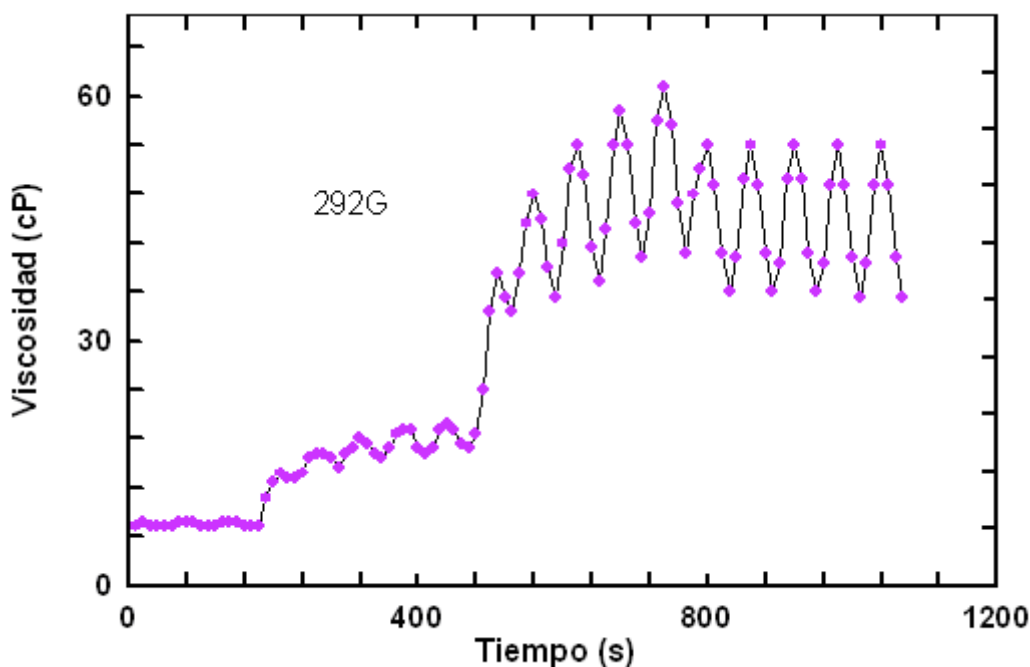


En la curva de referencia de la Grafica 3.2.1 observamos un crecimiento de los valores de viscosidad, primero de forma rápida y luego de forma lenta. Observamos además oscilaciones de aproximadamente 60 segundos se puede observar que la muestra se comporta de forma similar al ser sometida al campo constante de 80 G donde la viscosidad se mantiene constante a un después de apagar el campo primario.

En la grafica 3.2.2 indica la curva 292G donde se mantiene a la muestra con un campo primario de 80G durante los siguientes 300 s y luego se aumenta a 90 G durante los otros 300 s. Para terminar con un campo de 80 G en los últimos 300 s. Se observa claramente que al incrementar el

campo primario la viscosidad aumenta y luego se mantiene en oscilación, al regresar el campo a 80 G los valores de viscosidad también disminuyen aunque no lo hacen hasta los valores originales (en el tramo 400-600 seg.), se visualiza que la viscosidad pasa de 20 cP a 42 cP.

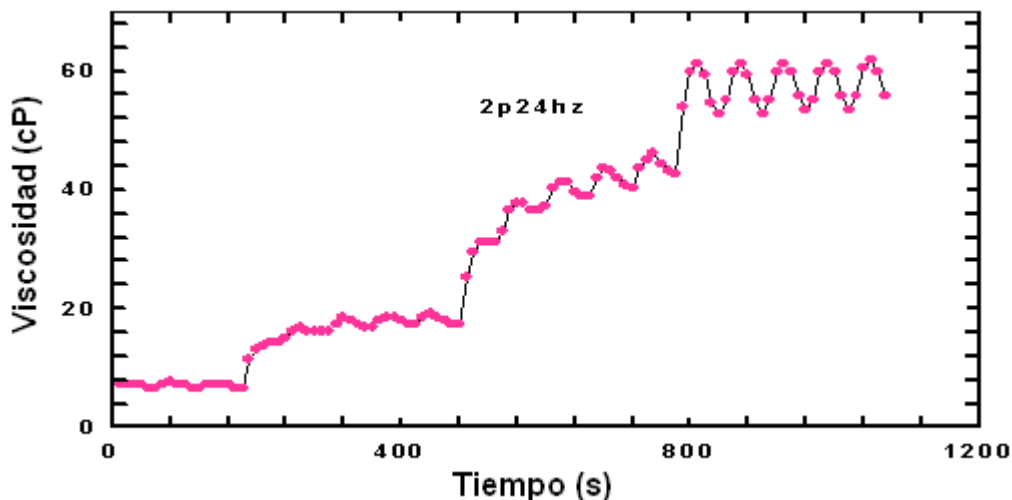
Grafica 3.2.2 existe aumento en el campo primario



En la Grafica 3.2.3 curva 2p24hz se muestra el resultado de la viscosidad cuando la muestra es sometida a un campo primario de 80 G durante 300 s y en los siguientes 300 s se le aplica el campo secundario también con una frecuencia de 4 hertz y una amplitud de 12 G. Los últimos 300 s se apaga el campo secundario, en estas condiciones se observa que

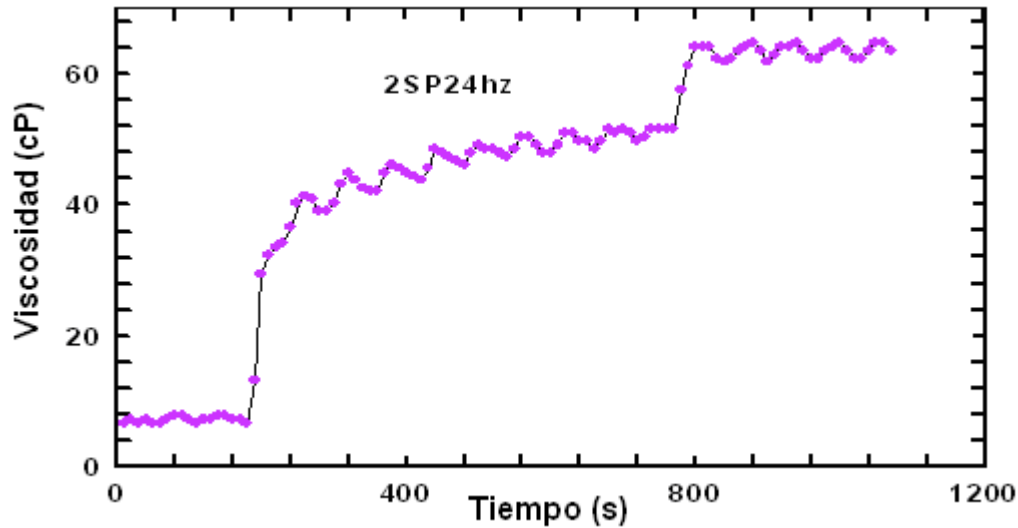
la viscosidad sigue en aumento aun cuando se apaga el campo secundario de forma uniforme.

Grafica 3.2.3 aplicación del campo perturbativo



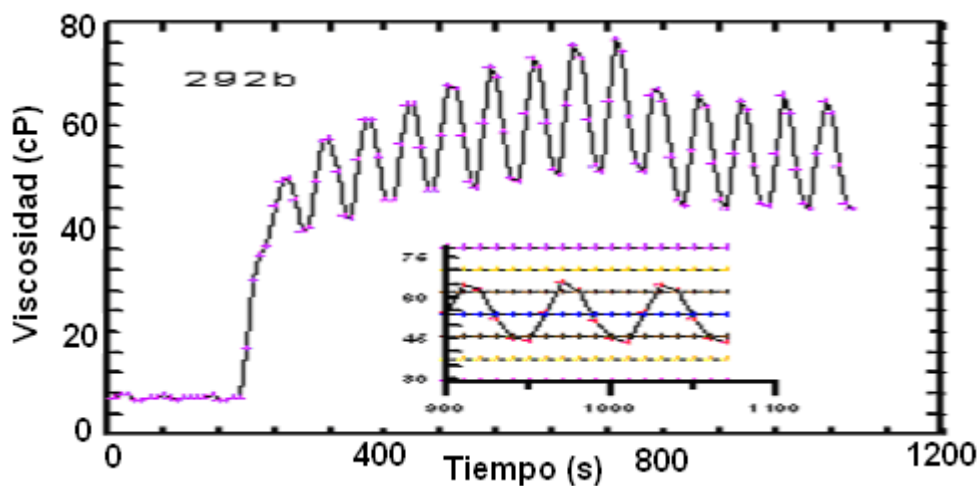
En la figura 3.2.4 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando están encendidos simultáneamente los campos primario y secundario durante un tiempo de 600 seg. al final del cual se apaga el campo secundario. Se observa; como en otros experimentos descritos anteriormente, que los valores incluso aumentan y que en el intervalo de 400 a 600 segundos presenta una media de 44 cP de viscosidad.

Grafica 3.2.4 aplicación de campos simultáneamente con pre-acondicionamiento.



En la figura 3.2.5 se tienen que durante 600 s se tiene un campo primario de 90 G y luego se baja a 80 G. Se observa que al final los valores disminuyen. Esta grafica y la anterior muestran claramente que el campo transversal juega un papel diferente al de solo alterar la intensidad del campo. En cierta forma es una comparación de que los agregados son más estables.

Grafica 3.2.5 cambios en g

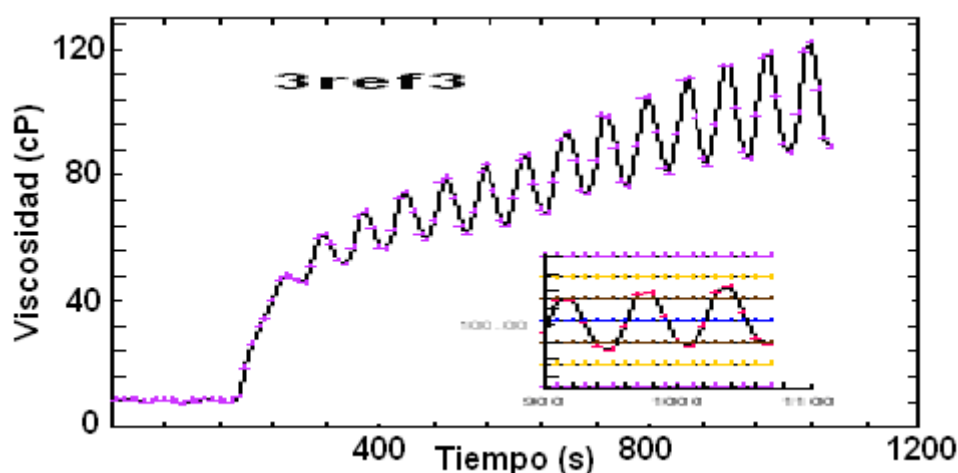


- **Concentración 0.07**

A continuación detallaremos las graficas obtenidas con una concentración de 0.07 con un pre-acondicionamiento.

En la curva de referencia de la Grafica 3.3.1 observamos un crecimiento de los valores de viscosidad de forma constante y periódica. Observamos además oscilaciones de aproximadamente 60 segundos donde se puede observar que la muestra se comporta de forma similar al ser sometida al campo constante de 80 G donde la viscosidad mantiene su comportamiento a un después de apagar el campo primario.

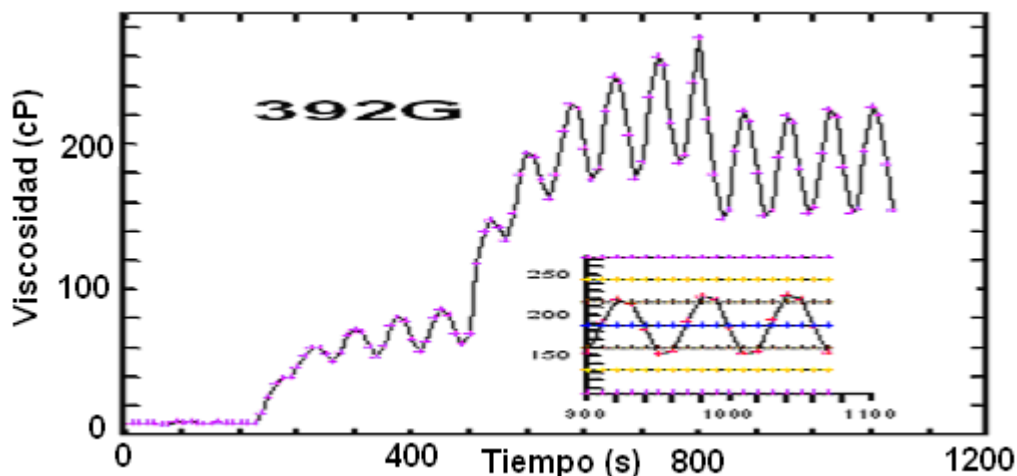
Grafica 3.3.1 curva de referencia.



En la grafica 3.3.2 indica la curva 392G donde se mantiene a la muestra con un campo primario de 80 G durante los siguientes 300 s y luego se aumenta a 90 G durante los otros 300 s. Para terminar con un campo de 80 G en los últimos 300 s. Se observa claramente que al incrementar el campo primario la viscosidad aumenta notablemente, al regresar el campo a 80 G los valores de viscosidad también disminuyen aunque no lo hacen hasta los

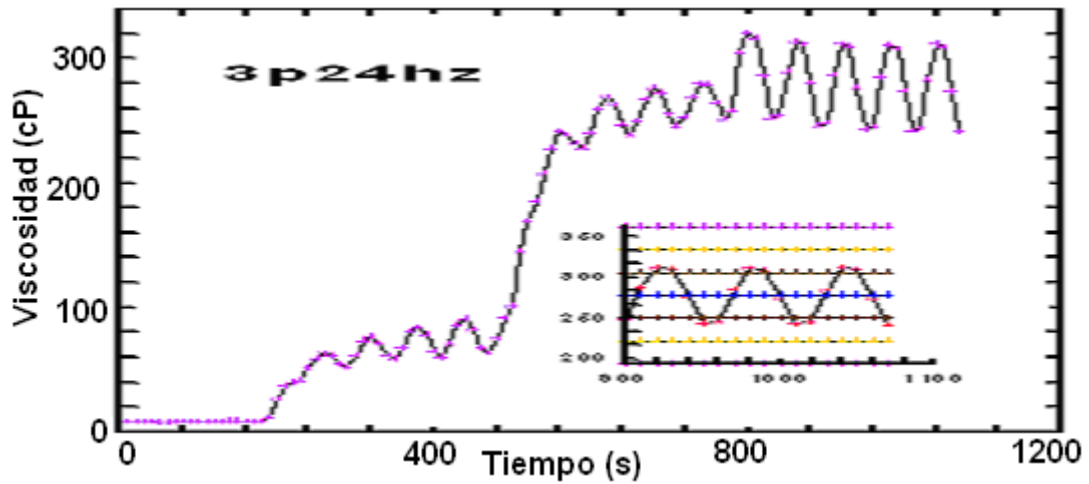
valores originales (en el tramo 500-800 seg.), se visualiza que la viscosidad pasa de 80 cP a 280 cP teniendo una media de 168 cP.

Grafica 3.3.2 variando a g.



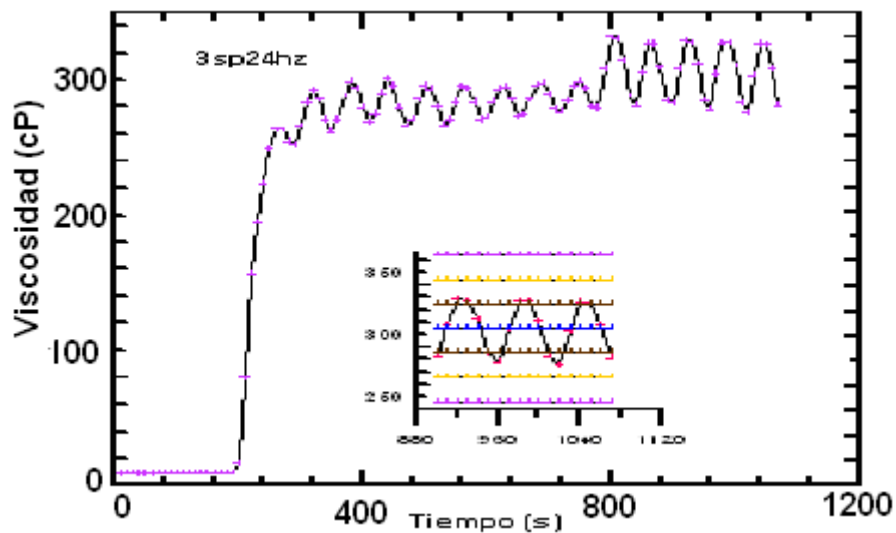
En la Grafica 3.3.3 curva 3p24hz se muestra el resultado de la viscosidad cuando la muestra es sometida a un campo primario de 80 G durante 300 s y en los siguientes 300 s se le aplica el campo secundario también con una frecuencia de 4 hertz y una amplitud de 12 G. Los últimos 300 s se apaga el campo secundario, en estas condiciones se observa que la viscosidad sigue en aumento aun cuando se apaga el campo secundario. En el intervalo de 500-800 seg. se tiene una viscosidad media de 243 cP mientras que de 800-1200 la viscosidad media es de 281 cP.

Grafica 3.3.3 variando a g.



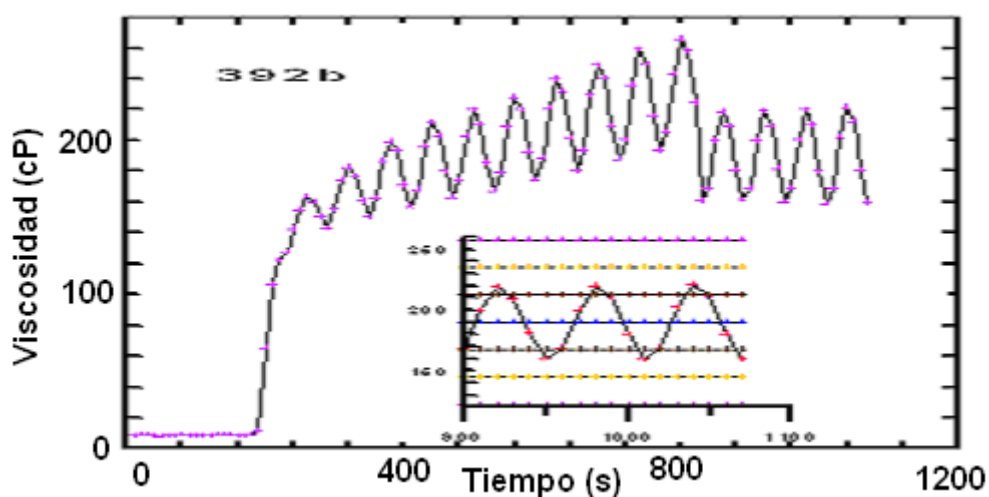
En la figura 3.3.4 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando están encendidos simultáneamente los campos principal y secundario durante un tiempo de 600 s al final del cual se apaga el campo secundario. Se observa; como en otros experimentos descritos anteriormente, que los valores incluso aumentan y que en el intervalo de 400 a 600 segundos presenta una media de 285 cP de viscosidad y de 800-1200.

Grafica 3.3.4 variando a g.



En la figura 3.3.5 se tienen que durante 600 s se tiene un campo primario de 90 G y luego se baja a 80 G. Se observa que al final los valores disminuyen. Esta grafica y la anterior muestran claramente que el campo transversal juega un papel diferente con solo alterar la intensidad del campo dado que se tiene una media de 201 cP en el intervalo de tiempo de 400 a 800 seg. mientras que en el intervalo de 800 a 1200 seg. es de 195 cP. En cierta forma es una comparación de que los agregados son más estables en sus enlaces.

Grafica 3.3.5 variando a g.



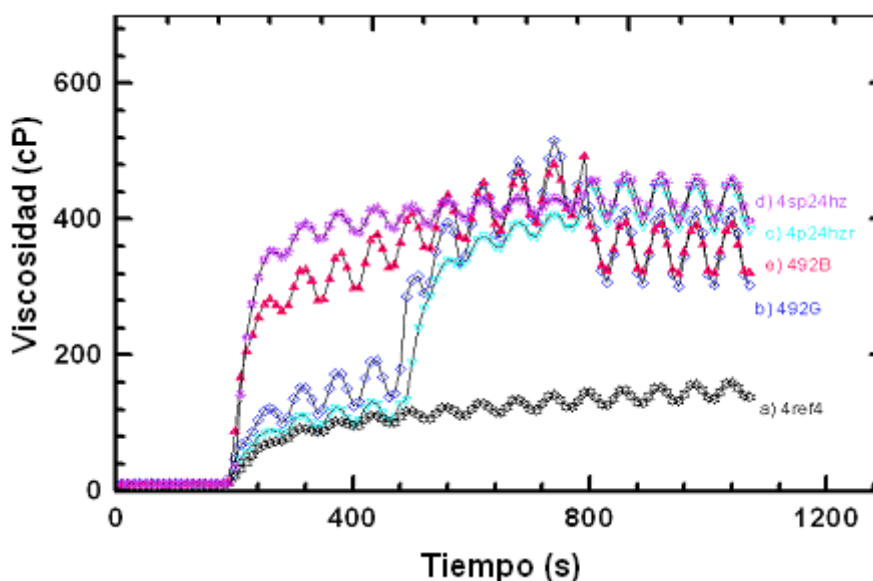
### -Concentración 0.10

En la Grafica 3.4 se compara el comportamiento de la viscosidad para varias condiciones de campo primario y de campo secundario. Tenemos experimentos a campo constante en la curva a) 80 G que nos permite tener una idea del cambio existente al realizar la comparación con alguna de las curvas donde se aplica el campo secundario y la curva b) 92 G. En la que a simple vista se observa el incremento de la viscosidad. También tenemos



curvas donde esta presente la aplicación de los dos campos. Todas las graficas empiezan con un pre-acondicionamiento de 1 rpm durante 300 segundos. Observamos el siguiente comportamiento general donde al aplicar el campo secundario la viscosidad tiende a incrementar y cuando este campo se apaga la viscosidad disminuye nuevamente.

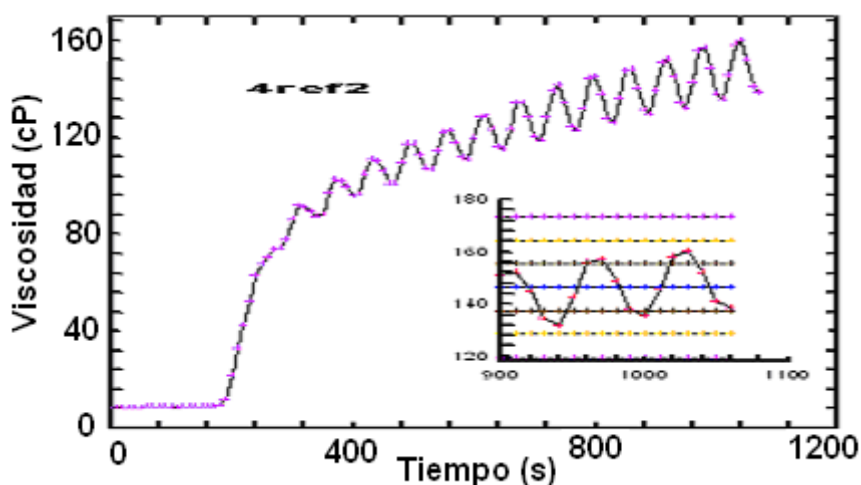
Grafica 3.4 con una concentración de 0.10 con pre-acondicionamiento



A continuación detallaremos el comportamiento de cada una de las curvas.

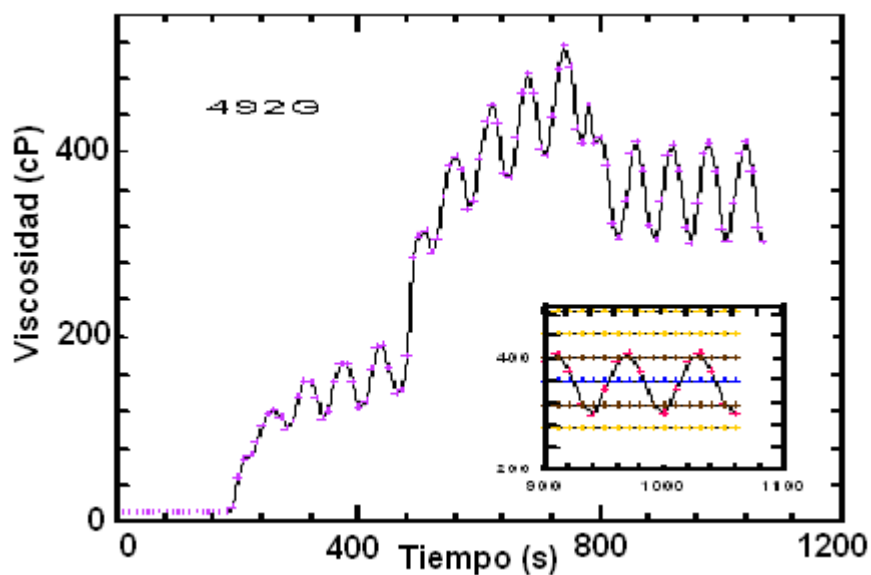
En la curva de referencia de la grafica 3.4.1 observamos un crecimiento de los valores de viscosidad de forma constante y periódica. Además las oscilaciones son de aproximadamente 60 segundos donde se puede notar que la muestra se comporta de forma similar al ser sometida al campo constante de 80 G donde la viscosidad mantiene su comportamiento a un después de apagar el campo primario.

Grafica 3.4.1 referencia de los cambios con pre-acondicionamiento.



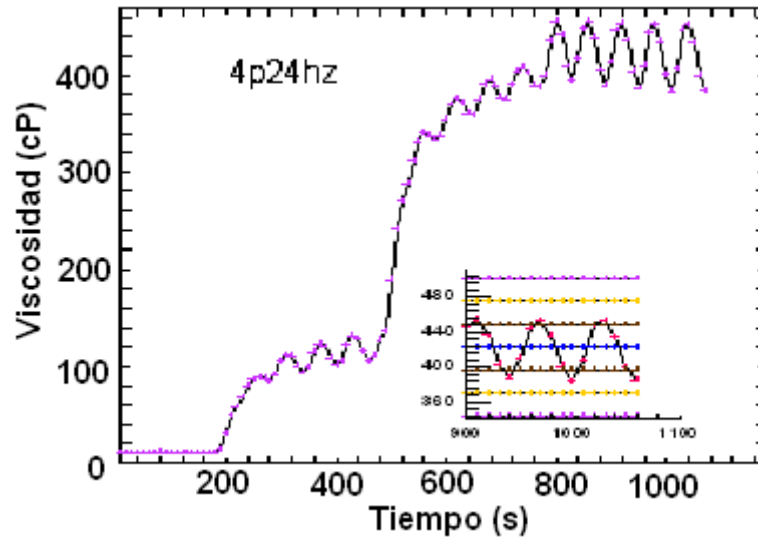
En la grafica 3.4.2 indica la curva 492G donde se mantiene a la muestra con un campo primario de 80 G durante los siguientes 300 s y luego se aumenta a 90 G durante los otros 300 s. Para terminar con un campo de 80 G en los últimos 300 s. Se observa claramente que al incrementar el campo primario la viscosidad aumenta notablemente, al regresar el campo a 80 G los valores de viscosidad también disminuyen aunque no lo hacen hasta los valores originales (en el tramo 400-800 seg.), se visualiza que la viscosidad pasa de 124cP a 515 cP teniendo una media de 302 cP.

Grafica 3.4.2 con pre-acondicionamiento.



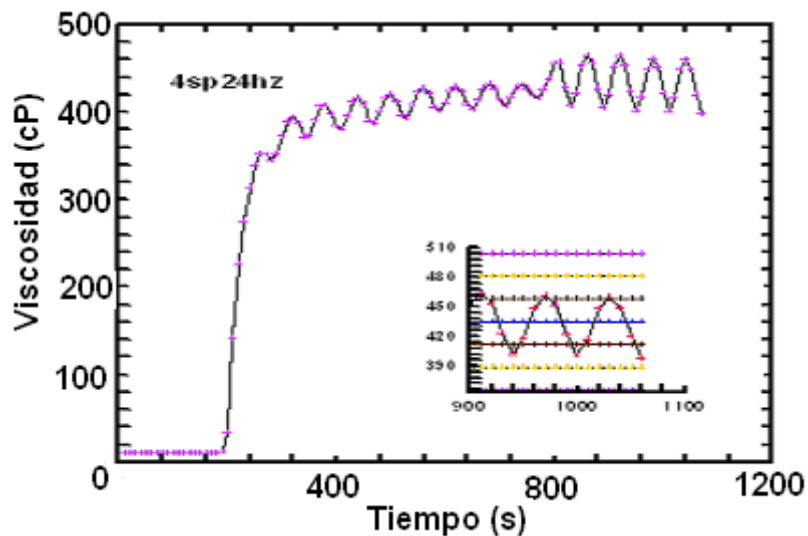
En la Grafica 3.4.3 curva 4p24hz se muestra el resultado de la viscosidad cuando la muestra es sometida a un campo primario de 80 G durante 300 s y en los siguientes 300 s se le aplica el campo secundario también con una frecuencia de 4 hertz y una amplitud de 12 G. Los últimos 300 s se apaga el campo secundario, en estas condiciones se observa que la viscosidad sigue en aumento aun cuando se apaga el campo secundario. En el intervalo de 500-800 seg. se tiene una viscosidad media de 359 cP mientras que de 800-1200 la viscosidad media es de 423 cP.

Grafica 3.4.3 con pre-acondicionamiento.



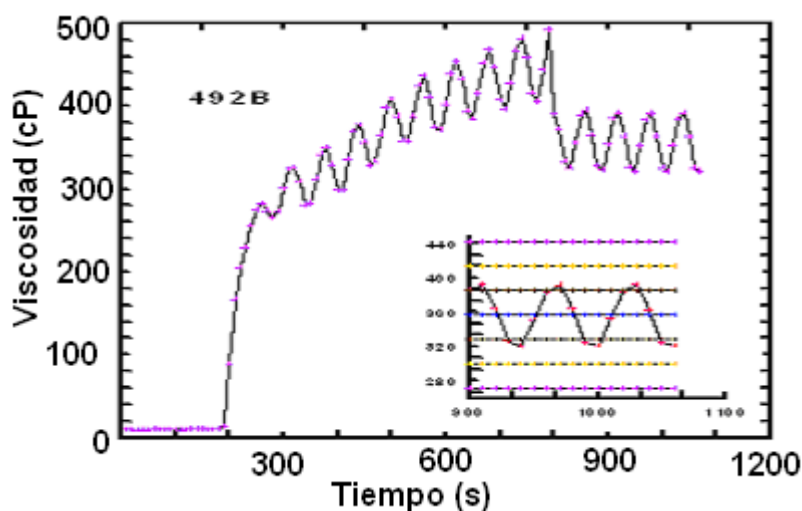
En la figura 3.4.4 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando están encendidos simultáneamente los campos el principal y el secundario durante un tiempo de 600 s al final del cual se apaga el campo secundario. Se observa; como en otros experimentos descritos anteriormente, que los valores incluso aumentan y que en el intervalo de 400 a 800 segundos presenta una media de 404 cP de viscosidad mientras que de 800-1200 seg. la media es de 420 cP.

Grafica 3.4.4 con pre-acondicionamiento



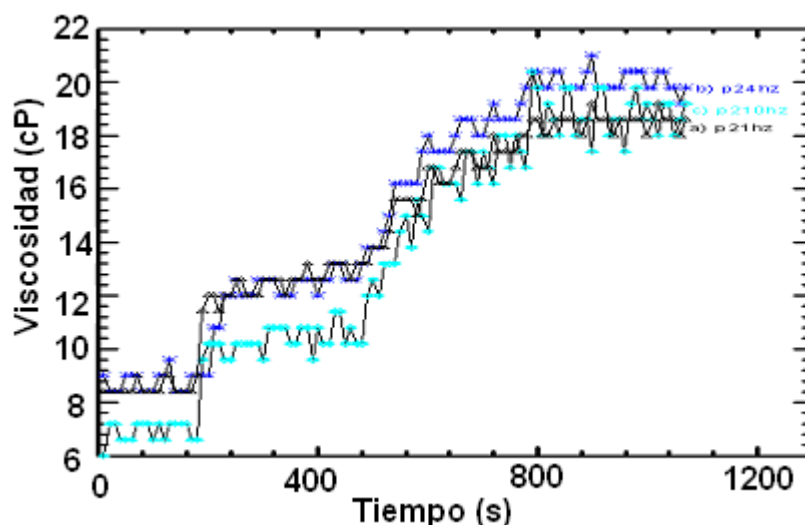
En la figura 3.4.5 se tienen que durante 600 s se tiene un campo primario de 90 G y luego se baja a 80 G. Se observa que al final los valores disminuyen. Esta grafica y la anterior muestran claramente que el campo transversal juega un papel diferente con solo alterar la intensidad del campo dado que se tiene una media de 401 cP en el intervalo de tiempo de 400 a 800 seg. mientras que en el intervalo de 800 a 1200 seg. es de 355 cP.

Grafica 3.4.5 con pre-acondicionamiento



En la Grafica 3.4.6 se puede observar el comportamiento de la viscosidad en nuestra muestra cuando a cada una de las pruebas modificamos la amplitud del campo secundario, transversal o perturbativo en 1, 4 y 10 hertz donde se visualiza claramente que el comportamiento que sigue es similar por lo que solo se realizaron las pruebas de la muestra con una amplitud de 4 hertz que es donde se tiene un mayor aumento en la viscosidad

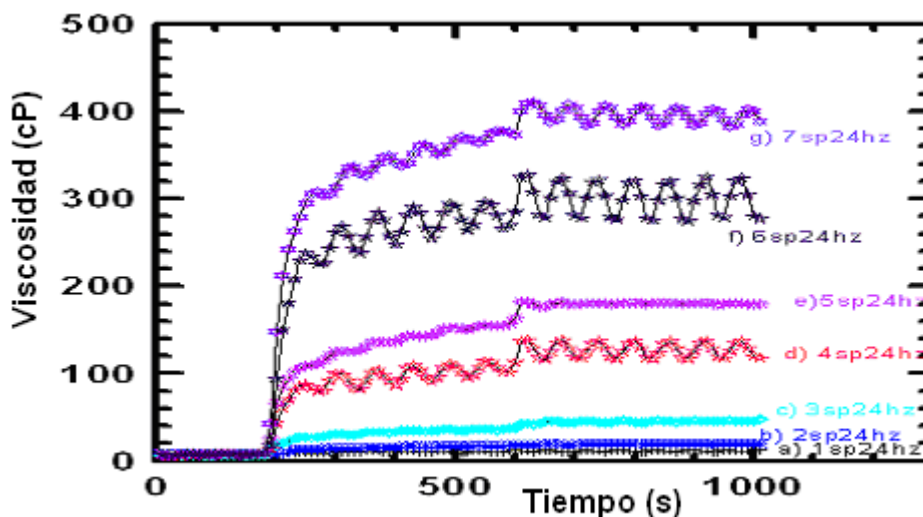
Grafica 3.4.6 esta grafica nos representa la comparación de la viscosidad de nuestra muestra al ir cambiando la amplitud en nuestro campo secundario, transversal o perturbativo con una concentración de  $\phi=0.03$



### 3.2 SERIE 2 (MAGNETITA CON ACEITE DE TRANSMISIÓN).

Un comportamiento general que hemos observado es que en los casos cuando se usa la perturbación, al apagarla los valores de la viscosidad se mantienen o incluso crecen de su valor original. Este comportamiento depende de la concentración de partículas. En la grafica 3.5 comparamos el comportamiento de la viscosidad para varias concentraciones cuando se ha seguido la secuencia de pre-acondicionamiento- campos simultáneos y finalmente suspensión del campo secundario. Se observa que a concentraciones bajas los valores de la viscosidad se mantienen al retirar la perturbación. Sin embargo para concentraciones mayores hay un aumento de la viscosidad que al retirar la perturbación decae un poco.

Grafica 3.5 curvas del comportamiento de la viscosidad a diferentes concentraciones con intensidad de campo similar.



En la grafica 3.5 se pueden observar los resultados de los experimento expuestos a dos campos simultáneos uno de ellos es un campo estático de 80 gauss con una intensidad de 2.5 A. El otro campo es transversal al primero considerado como secundario con una frecuencia de 4 Hertz y una amplitud de 12 gauss RMS (RAIZ CUADRADA DEL CUADRADO DE LA MEDIA\*).

Para preparar la muestra usamos magnetita mineral y aceite para transmisiones, se consideran varias concentraciones de la magnetita mineral que son: 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06.

Para realizar el experimento utilizamos 10 ml. de concentración en total. Las condiciones en las que se realizaron los experimentos son los siguientes:

- Una exposición de 3 minutos (180 seg.) con campo primario
- 7 minutos (420 seg.) con ambos campos (primario y perturbativo)
- y por último 7 minutos (420 seg.) más con campo primario

---

Las condiciones particulares mostrados en estas graficas son:

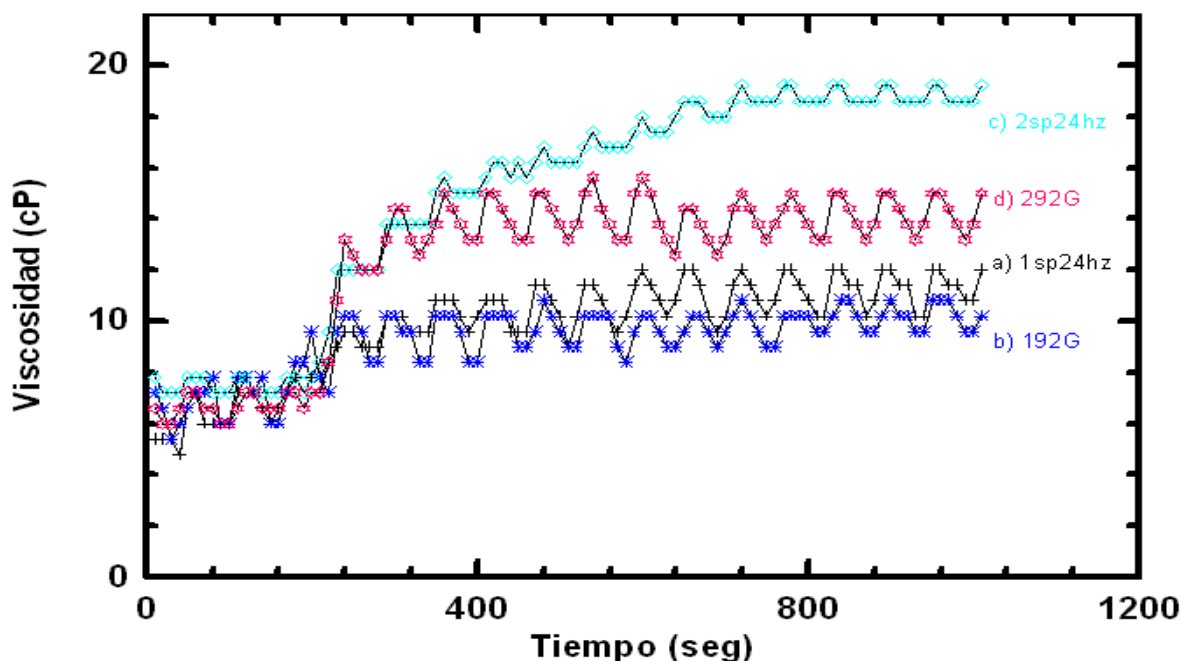
- a) 1sp24hz. Donde se tiene una concentración de 0.005 con una masa de 0.255 gramos de magnetita y un volumen de 9.95 ml de aceite. Y se puede observar que no existen cambios significativos debido a la cantidad de concentración de las partículas.
- b) 2sp24hz. Con una concentración de 0.01 con una masa de 0.51 gr. de magnetita y un volumen de 9.9 ml de aceite la fluctuación es mínima.
- c) 3ps24hz. Con una concentración de 0.02 con una masa de 1.02 gr. de magnetita y 9.8 ml de aceite se observa claramente como se empiezan a dar los cambios de una manera más enmarcada y la existencia de un aumento en la viscosidad aun con la ausencia del campo secundario.
- d) 4sp24hz. Con una concentración de 0.03 con una masa 1.53 gr. de magnetita y un volumen de 9.7 ml de aceite en estas condiciones las fluctuaciones son visibles claramente desde la aplicación del campo secundario se observa el comienzo de las fluctuaciones e incluso al apagar el campo secundario su presencia es inevitable debió a la mayor concentración de partículas existentes en nuestra mezcla y un aumento gradual en la viscosidad.
- e) 5sp24hz con una concentración de 0.04 con una masa 2.04 gr. de magnetita y un volumen de 9.6 ml de aceite se observan la e existencia de fluctuaciones de menor tamaño con una variabilidad casi uniforme.
- f) 6sp24hz con una concentración de 0.05 con una masa de 2.55 gr. de magnetita y un volumen de 9.5 ml de aceite donde las fluctuaciones son mayores pero de una forma más equilibrada que al apagar el campo



secundario se tiene un aumento de la viscosidad menor que en las pruebas anteriores.

- g) 7sp24hrz con una concentración de 0.06 con una masa de 3.06 gr. de magnetita y un volumen de 9.4 ml de aceite donde la viscosidad aumenta considerablemente debido a que las cadenas de las partículas que se tienden a formar están más cerca y esto permite que las fluctuaciones sean de menor tamaño ya que se pueden entrelazar con una mayor velocidad y rigidez.

Grafica 3.6 se muestra las curvas con pre-acondicionamiento, pero con intensidad de campo diferente



En la Grafica 3.6 las condiciones particulares mostrados son; la comparación del efecto de la perturbación comparado con el de aumentar la intensidad del campo para dos concentraciones diferentes para a y b es de 0.005 y para c y d es de 0.01. Enseguida se describen las condiciones a las cuales corresponden los experimentos.

- 
- a) 1sp24hz. Donde se tiene una masa de 0.255 gramos de magnetita y un volumen de 9.95 ml de aceite. Se aplico 3 min. Con campo primario de 80 gauss 7 min. ambos campos y otros 7 min. con campo primario.
  - b) 192G donde se tiene la misma mezcla pero se aumento a 90 gauss la intensidad del campo en los 7 min. intermedios y los últimos 7 min. fueron a 80 gauss como los primeros tres y se puede apreciar que los cambios son mínimos.
  - c) 2sp24hz. Con una masa de 0.51 gr. de magnetita y un volumen de 9.9 ml de aceite donde la viscosidad aumenta demasiado al disminuir el campo primario.
  - d) 292G mismas concentración que la anterior mezcla pero se aumento a 90 gauss la intensidad del campo en los 7 min. intermedios y los últimos 7 min. fueron a 80 gauss como en los primeros 3 min. Y se observo que la viscosidad disminuyo un poco al retirar el campo secundario.

Se observa que para la menor concentración el efecto de la perturbación es muy similar al efecto de aumentar el campo magnético. Sin embargo para la concentración mayor se observa que la perturbación induce mayores cambios.

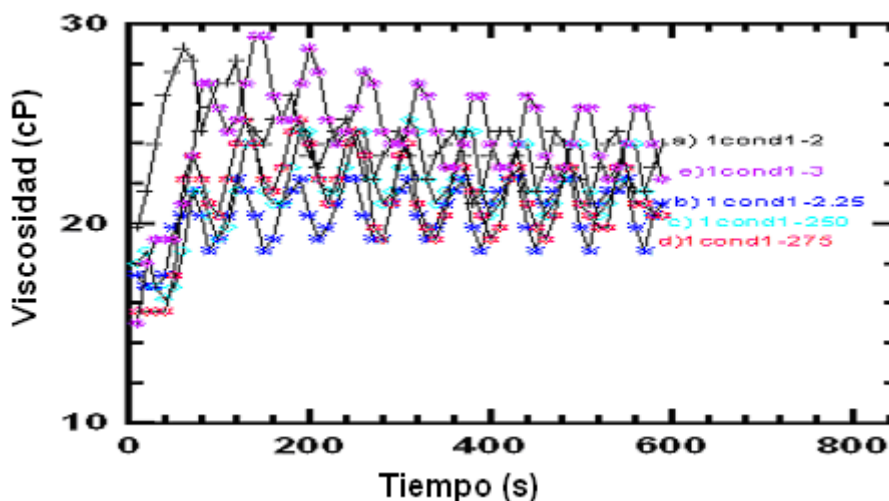
### **3.3 SERIE 3 (PARTÍCULAS DE CARBONILO CON ACEITE DE TRANSMISIÓN).**

En los experimentos que hemos realizado se ha usado magnetita mineral como fase dispersa, material que responde fuertemente al campo

magnético. Se ha mostrado que introducir un campo perturbativo induce cambios en el comportamiento de la viscosidad. A raíz de estos resultados surge la interrogante acerca de lo que ocurrirá si usamos otro material como fase dispersa. Para responder a esta interrogante hemos realizado experimentos para saber el comportamiento de la viscosidad de una dispersión de hidróxido de hierro disperso en aceite de transmisión. A continuación describimos los resultados.

### - Concentración 0.01

En la grafica 3.7 se muestran los resultados de la viscosidad de la muestra a una concentración  $\phi=0.01$  con una velocidad de una rpm



La grafica 3.7 que nos representa el comportamiento de la viscosidad de un fluido magneto-reológico con una rapidez de corte de 1 rpm con intensidades de campo de 64, 72, 80, 88, 96 G.

a) En la curva 1cond1-2 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una

---

velocidad de 1 rpm, con una intensidad de campo magnético de 64 Gauss donde la viscosidad no tiene variaciones notables respecto al caso sin campo.

b) En la curva 1cond1-2.25 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una velocidad de 1 rpm. con una intensidad de campo magnético de 72 Gauss.

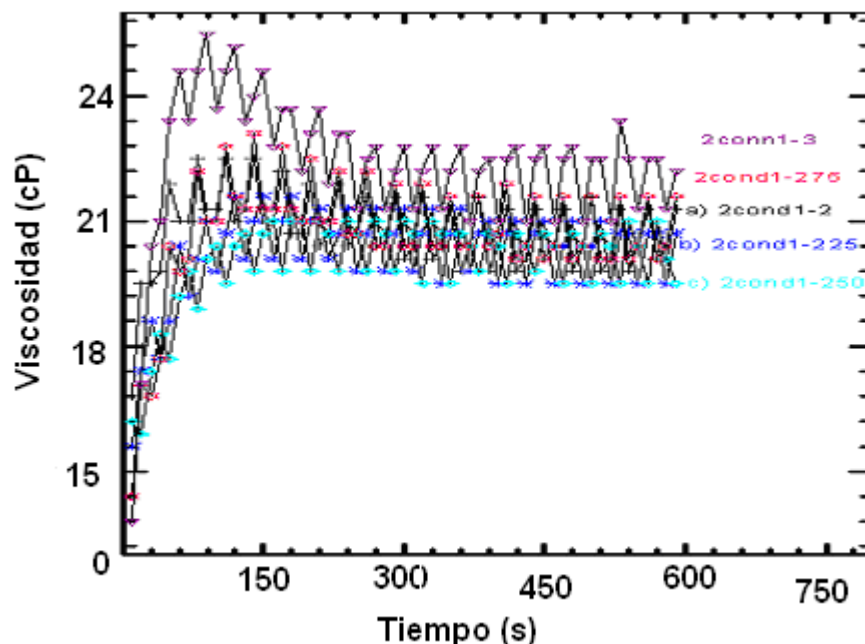
c) En la curva 1cond1-2.50 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una velocidad de 1 rpm con una intensidad de campo magnético de 80 Gauss.

d) En la curva 1cond1-2.75 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una velocidad de 1 rpm. con una intensidad de campo magnético de 88 Gauss.

e) En la curva 1cond1-3 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una velocidad de 1 rpm. Con una intensidad de campo magnético de 96 Gauss. Nótese que es donde nuestra muestra alcanza los valores más altos de viscosidad debido a que la intensidad del campo magnético primario es mayor.

Es de subrayar que en todas las mediciones los valores de la viscosidad no aumentan notablemente respecto al caso sin campo.

En la grafica 3.8 se muestran los resultados similares a los mostrados en la grafica 3.7 realizados con una rapidez de corte mayor que la anterior.



Se presenta en la grafica 3.8 el comportamiento de la viscosidad del fluido magneto-reológico con una rapidez de corte de 2 rpm. con intensidades de campo de 64, 72, 80, 88, 96 Gauss

a) En la curva 1cond1-2 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una intensidad de campo magnético de 64 Gauss y donde se puede destacar que es el punto medio de las variaciones existentes en la viscosidad de nuestra muestra.

b) En la curva 1cond1-2.25 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una intensidad de campo magnético de 72 Gauss y se obtiene una curva que no tiene muchas fluctuaciones en la viscosidad.

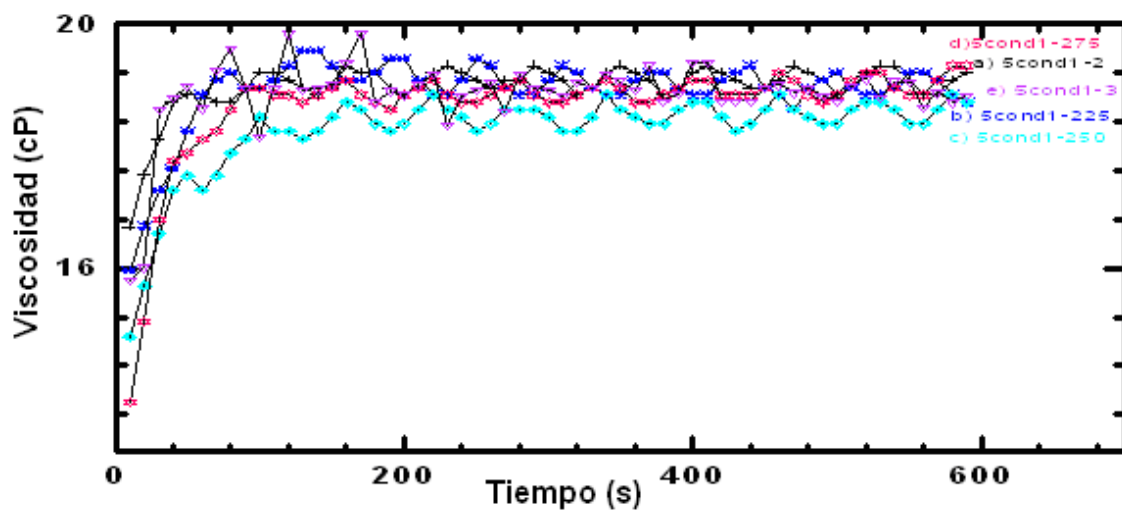
c) En la curva 1cond1-2.50 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una intensidad de campo magnético de 80 Gauss y se aprecia claramente que en estas condiciones la viscosidad tiene los puntos más bajos.

d) En la curva 1cond1-2.75 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una intensidad de campo magnético de 88 Gauss.

e) En la curva 1cond1-3 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una velocidad de dos rpm. Con una intensidad de campo magnético de 96 Gauss.

En general se observa un comportamiento como en el caso de una rapidez de corte de 1 rpm. Aunque como se esperaba los valores de la viscosidad son menores a la mayor rapidez de corte.

En la grafica 3.9 se muestran los resultados de la viscosidad de la muestra a una concentración  $\phi=0.01$  con una velocidad de 5 rpm



---

Grafica 3.9 nos presenta el comportamiento de la viscosidad de un fluido magneto-reológico con una velocidad de 5 rpm con intensidades de campo de 64, 72, 80, 88, 96 Gauss. Se nota claramente que nuestro fluido tiene un comportamiento más uniforme donde las fluctuaciones son menores.

a) En la curva 1cond1-2 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una intensidad de campo magnético de 64 Gauss.

b) En la curva 1cond1-2.25 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una intensidad de campo magnético de 72 Gauss.

c) En la curva 1cond1-2.50 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una intensidad de campo magnético 80 Gauss y se aprecia claramente que en estas condiciones la viscosidad tiene los puntos más bajos.

d) En la curva 1cond1-2.75 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una intensidad de campo magnético de 88 Gauss.

e) En la curva 1cond1-3 se observa el comportamiento de la viscosidad cuando a la muestra de nuestro fluido magneto-reológico se le somete a una intensidad de campo magnético de 96 Gauss.

---

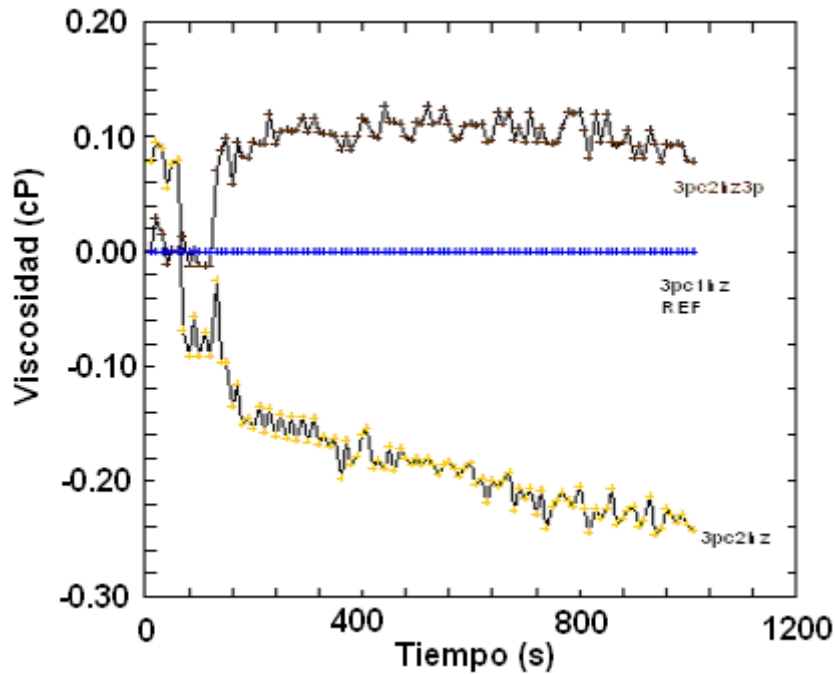
De los resultados de esta serie de experimentos, observamos que el sistema bajo estas condiciones no es tan sensible a los cambios en el campo magnético. De hecho, todas las curvas prácticamente se traslapan. De estos resultados y las anteriores relaciones con el uso de hidróxido de carbonilo podemos concluir que un fluido magneto-reológico preparado con este material, presenta cambios en la viscosidad menores que los que presenta uno preparado con magnetita. Por lo que se realizaron los experimentos con magnetita.

### **3.4 SERIE 4 (NORMALIZACIÓN).**

En las gráficas donde hemos comparado el comportamiento de la viscosidad con presencia de perturbación respecto al comportamiento cuando usamos un solo campo estático de mayor intensidad (de gasto energético similar al caso donde se usan los dos campos), se han puesto las graficas tal y como resultan de las mediciones. En algunos casos se ha observado que los valores de viscosidad en ausencia del campo no son iguales, posiblemente debido a las diferencias en la dispersión inicial, es decir en algunos casos las partículas están más dispersas que en otras. Para realizar una comparación mas explicita entre el caso de perturbación y sin ella los datos de viscosidad lo hemos "normalizado". Este proceso consiste en que son divididos por el promedio de los datos de viscosidad en la etapa de pre-acondicionamiento. Con las curvas normalizadas procedemos a encontrar la función entre los valores de la curva con perturbación y la correspondiente a la curva con campo de 92 G (grafica 3.10).

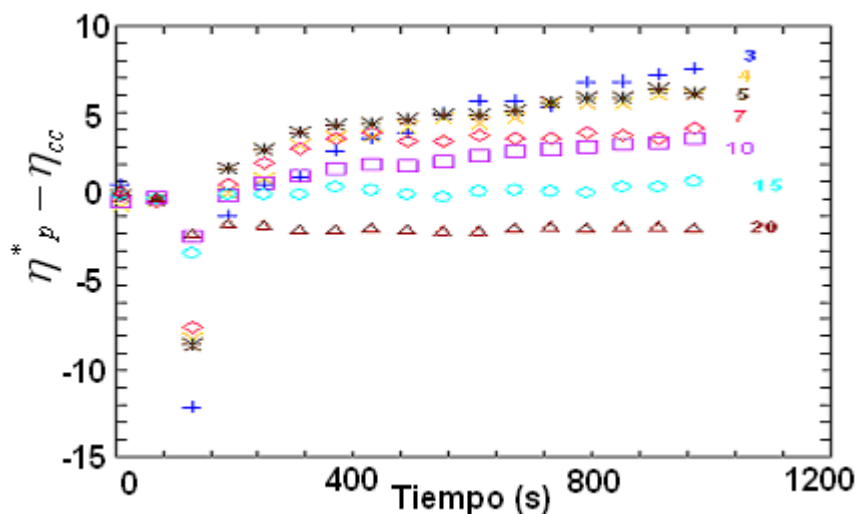


Grafica 3.10 se puede observar el cambio existente en la viscosidad de nuestro fluido MR con una concentración de .01 y una velocidad de 3rpm donde la curva de referencia nos permite visualizar las modificaciones existente en la viscosidad al existir un campo perturbativo comparado con otra donde no existe dicho campo.



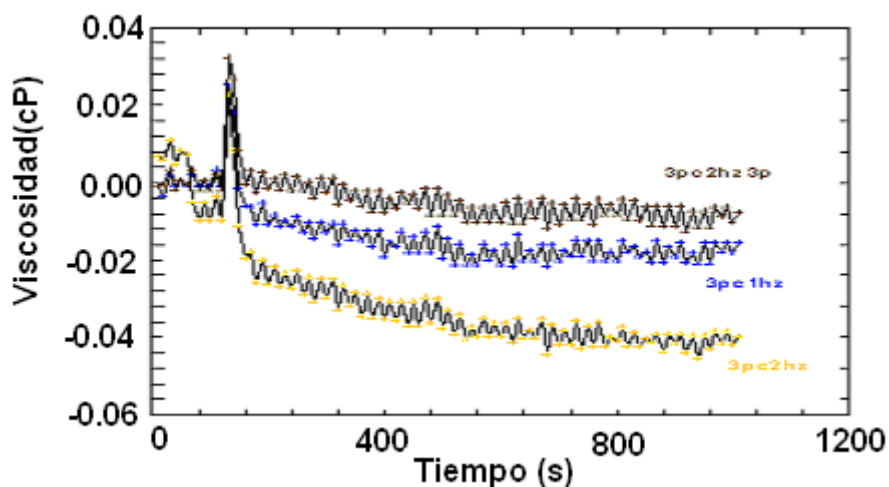
En las siguientes graficas se observa el comportamiento de la viscosidad de un fluido MR preparado con magnetita y aceite de silicona con las siguientes concentraciones .01, .02, .03 y .05

Grafica 3.10.1 donde  $\phi$  es de 0.01 y las velocidades son diferentes.



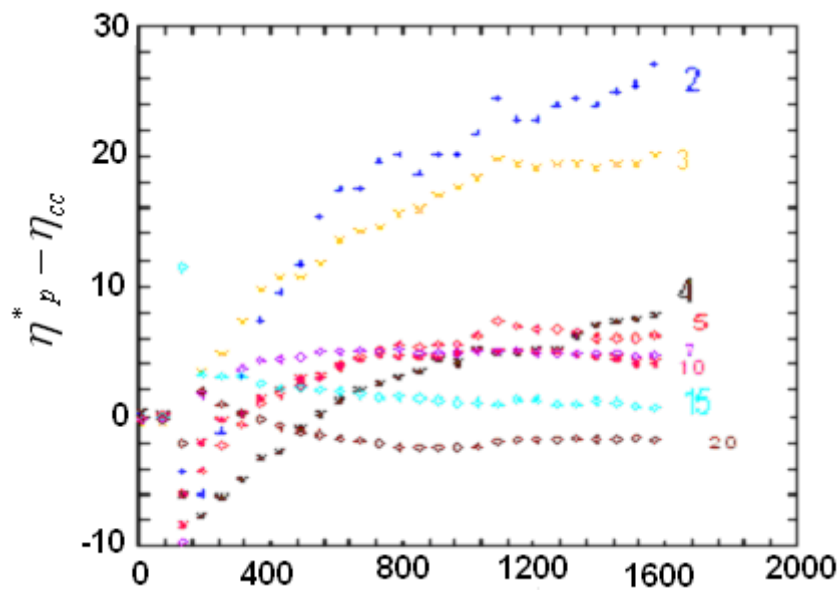
En la grafica 3.10.1 se pueden observar las curvas del comportamiento de la viscosidad del fluido MR con una concentración de .01 a una velocidad de 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20 rpm y donde nos muestra claramente que con una velocidad de 10 rpm no existen fluctuaciones preponderantes mientras que a una velocidad de 3 rpm se alcanza una mayor viscosidad pero las fluctuaciones se ven reflejadas constantemente en toda la curva.

Grafica 3.10.2 muestra la similitud del comportamiento al variar la intensidad del campo magnético y tener constante la velocidad



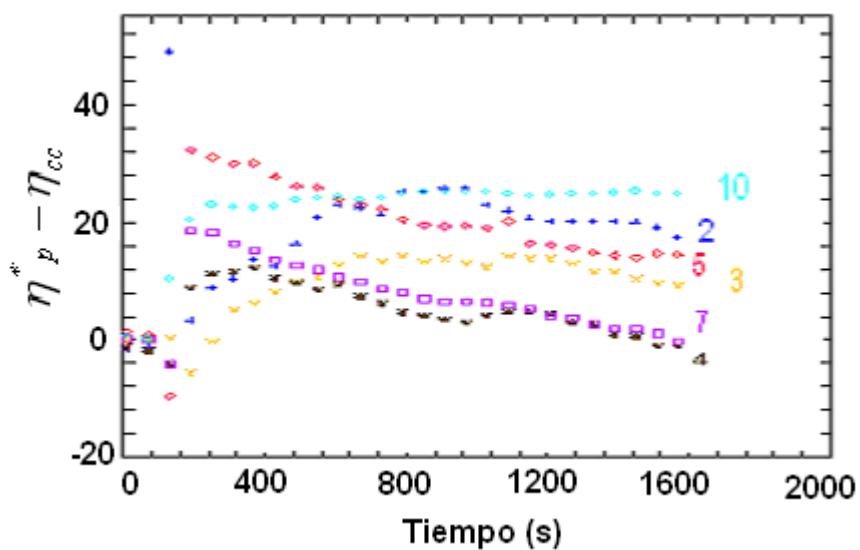
Grafica 3.10.2 se aprecian las diferencias en la viscosidad de un fluido MR que se obtienen al aplicar diferentes intensidades en los campos en una concentración de .01 con una velocidad de 3 rpm donde su comportamiento sigue una trayectoria similar.

Grafica 3.10.3 con una concentración de .02 a diferentes velocidades.



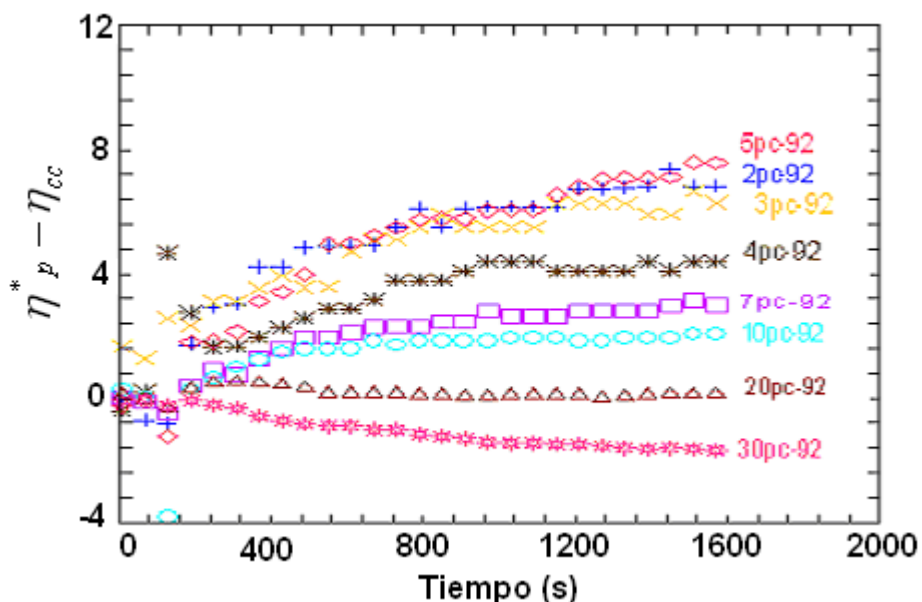
En la grafica 3.10.3 se puede apreciar el comportamiento de las curvas de la viscosidad de un fluido MR de una concentración de .02 con una velocidad de 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20 y nos muestra que a menores velocidades existe un mayor cambio, aunque vallamos aumentando la velocidad no quiere decir que nuestra viscosidad también lo haga por el contrario la viscosidad del fluido MR tiende a disminuir.

Grafica 3.10.4 con una concentración de .03 a diferentes velocidades.



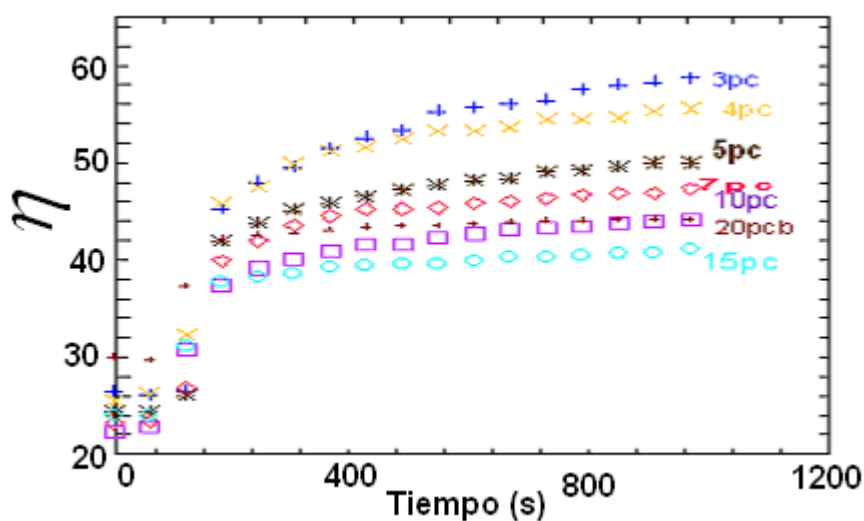
En la grafica 3.10.4 se puede observar el comportamiento de las curvas con una concentración de .03 donde la viscosidad comienza a aumentar la velocidad.

Grafica 3.10.5 con una concentración de .05 normalizada con pc-92



En la grafica 3.10.5 mostramos el resultado función diferencia para diferente rapidez de corte. La frecuencia del campo perturbativo fue 4 Hz. y una amplitud de 12 GRPM. Se observa que la función diferencia es diferente de cero y además que es dependiente de la rapidez de corte, siendo mayor a las rapidezces de corte menores. Es interesante notar que la función diferencia disminuye con la rapidez de corte. Para 20 rpm la función diferencia es prácticamente cero y para una rapidez de corte de 30 rpm incluso se hace negativa. Esto posiblemente tiene su origen en que el mecanismo por medio del cual actúa la perturbación es menos eficiente a rapidezces de corte mayores donde el efecto de las interacciones directas es más importante que el efecto de los cambios estructurales que puede sufrir el sistema bajo perturbaciones.

Grafica 3.11.1 con una concentración de .01 con los datos originales.

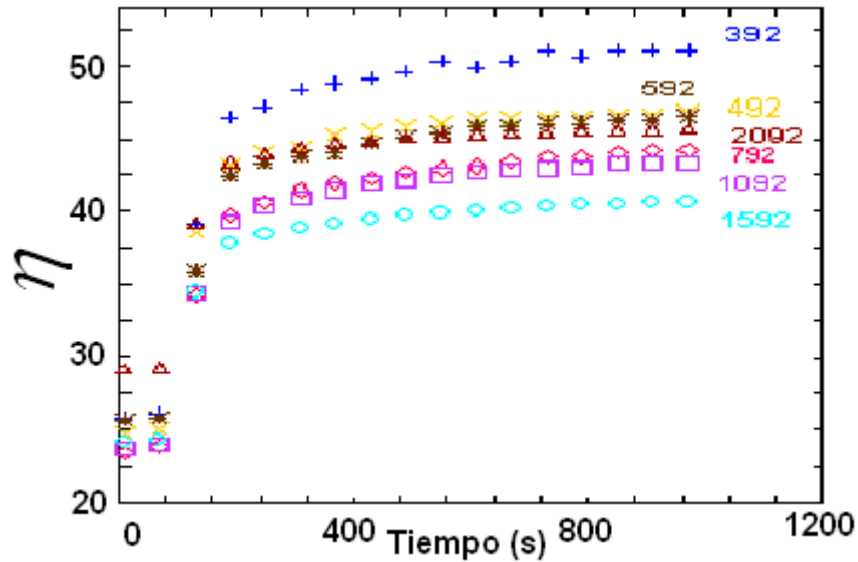


En la grafica 3.11.1 se muestran los resultados de la viscosidad para cuando se aplican simultáneamente un cambio constante de 80 G. y una perturbación de 12 G. (RMS) a 4 Hz. El parámetro que va ha cambiar es la rapidez de corte. En la grafica 3.11.2 se muestran los resultados de la viscosidad se muestran los resultados de la viscosidad para las mismas rapidez de corte que en la gráfica anterior pero ahora solo tenemos un campo constante de 92 G.

Como hemos mostrado anteriormente la función diferencia entre los valores con perturbación y de campo constante es mayor para rapidez de corte más baja. Así en lo sucesivo solo mostraremos gráficamente las diferencias entre valores con perturbación y sin ella.

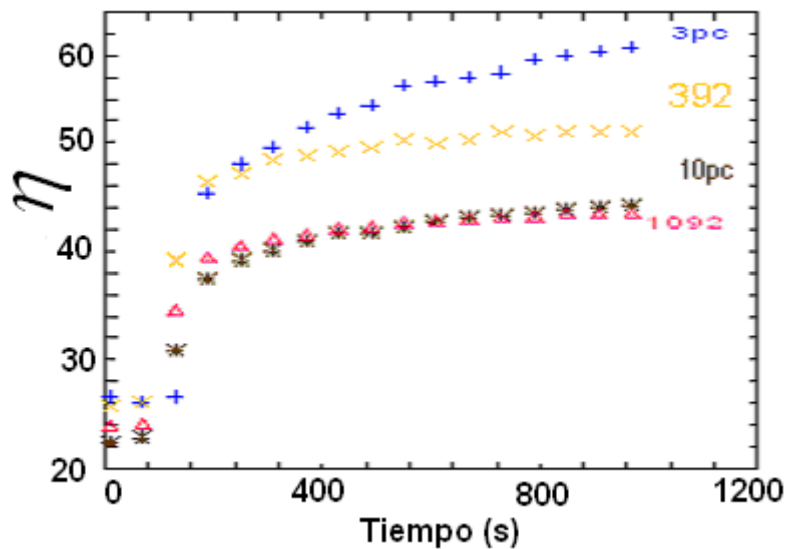
Esto lo hacemos para esta concentración de 0.01 en la grafica 3.11.3 donde se comparan los datos con y sin perturbación para 3 rpm y 10 rpm.

Grafica 3.11.2 con una concentración de 0.01 y los datos originales de 92.



En la grafica 3.11.2 al observarla cuidadosamente y al compararla con la anterior nos podemos dar cuenta que al incrementar de 80 G a 92 G el cambio en la viscosidad es mínimo.

Grafica 3.11.3 con una concentración de .01 con las velocidades de 3 y 10 rpm con campos de 80 y 92 G.

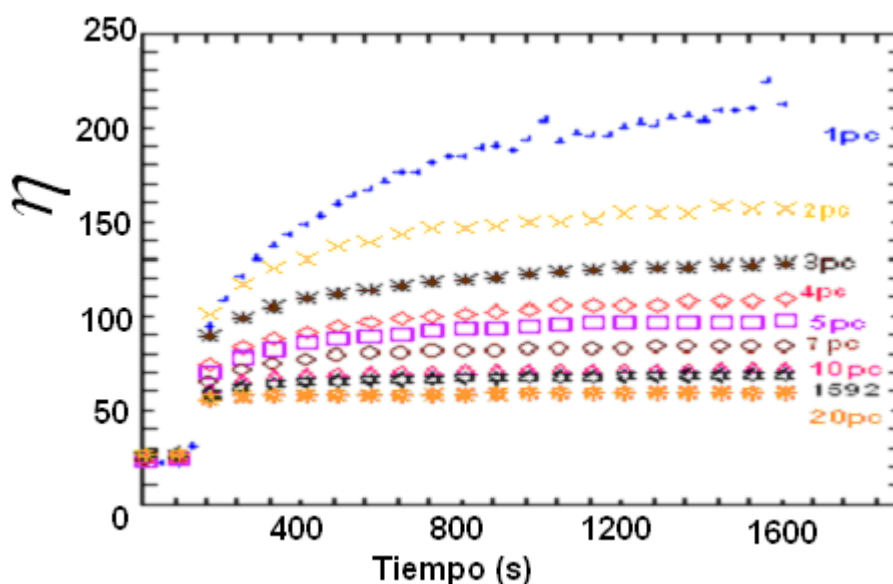


La grafica 3.11.3 nos muestra la comparación de las curvas de la concentración .01 de un fluido MR a velocidad de 3rpm con la de 10 rpm a un campo de 80 y 92 G y nos indica que a una menor velocidad la viscosidad tiende hacer mayor y que con 92 G es más consistente y uniforme.

De forma similar en las graficas 3.12.1 y 3.12.2 mostramos los resultados de las mediciones de la viscosidad para los casos con perturbación y sin perturbación para una concentración de 0.02. De igual forma en la grafica 3.12.3 se hace una comparación para dos valores de la rapidez de corte.

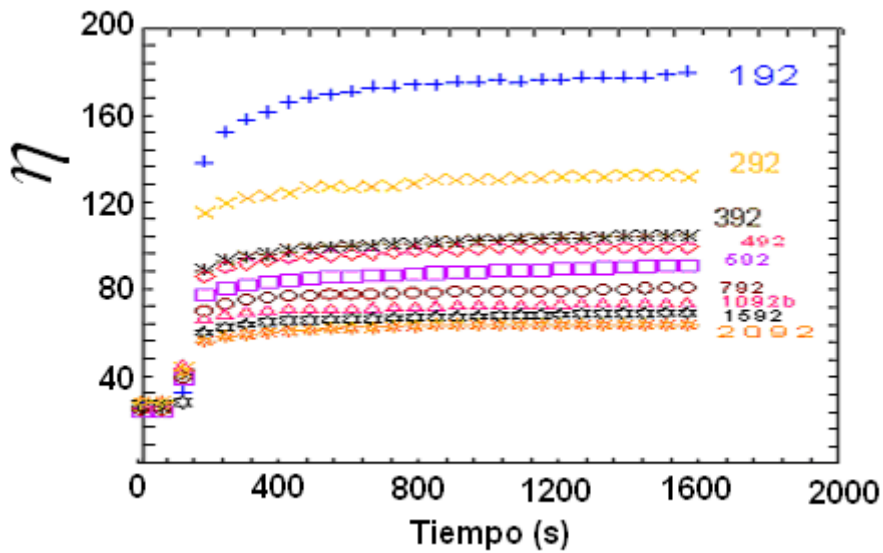
Los resultados para concentración de 0.03 son mostrados en las graficas 3.13.1, 3.13.2 y 3.13.3. Para la concentración de 0.05 los correspondientes resultados son mostrados en las graficas 3.14.1, 3.14.2 y 3.14.3

Grafica 3.12.1 con una concentración de .02 a diferentes velocidades con un campo de 80 G



En la grafica 3.12.1 se observan las curvas de un fluido MR con una concentración de .02 donde a una velocidad de 3rpm se observa los valores mas altos de la viscosidad alcanzados con esta concentración donde no existe fluctuaciones.

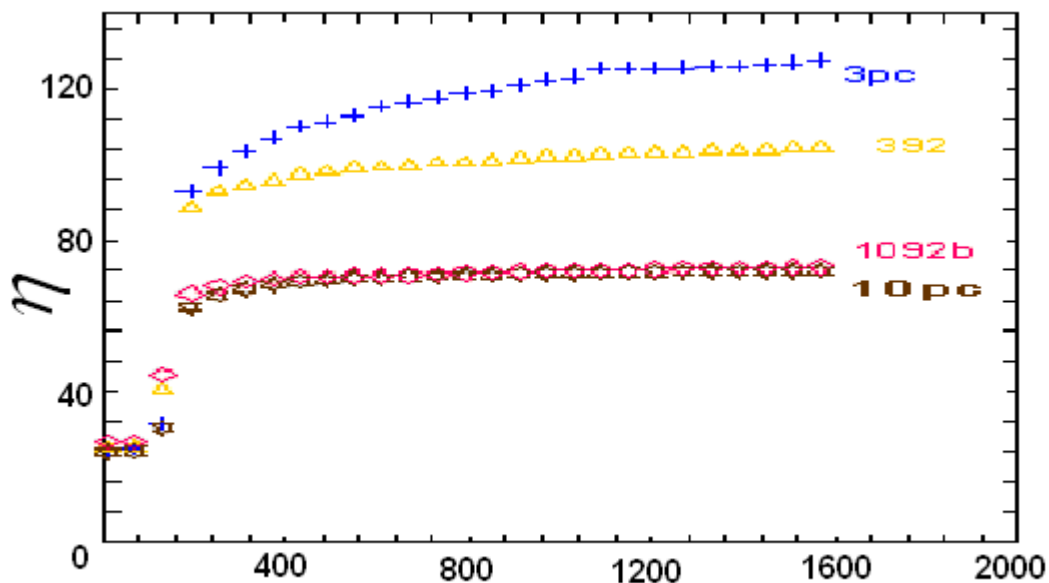
Grafica 3.12.2 grafica con la concentración .02 a diferentes velocidades con un campo de 92 G.



En la grafica 3.12.2 se observa el comportamiento del fluido MR con un campo de 92G donde se puede apreciar que la curva con una velocidad de 3 alcanza los valores mas altos de la viscosidad al igual que si se tiene un campo de 80 G.

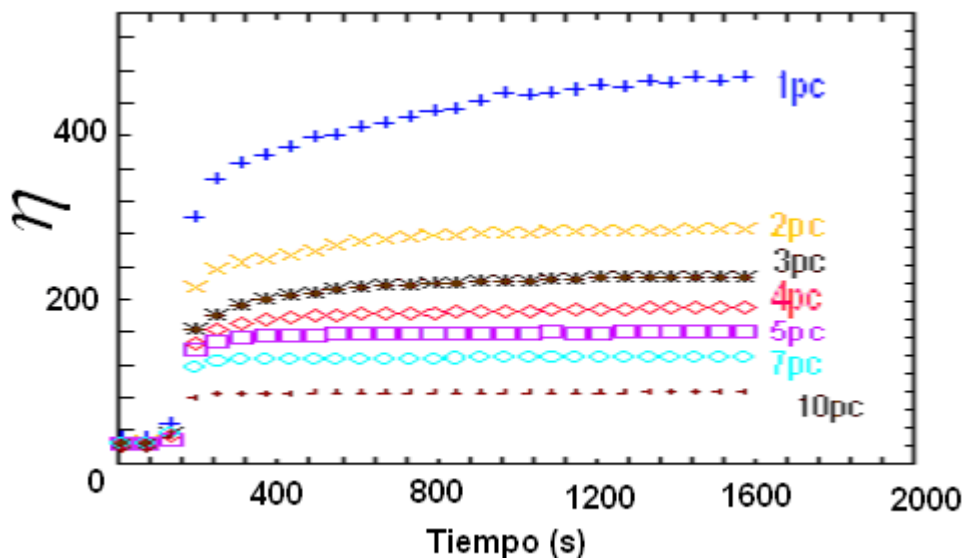


Grafica 3.12.3 con la concentración .02 con la velocidad de 3 y de 10 rpm.



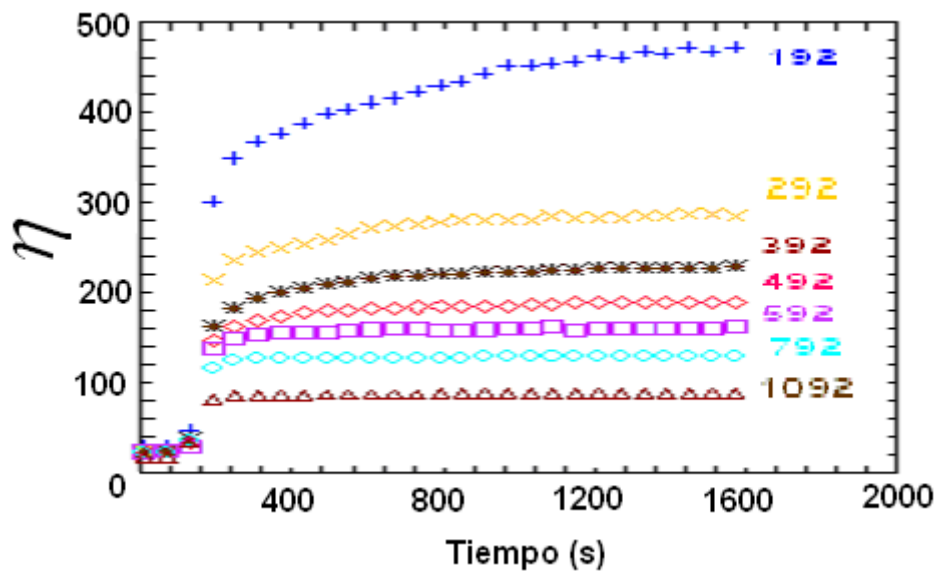
En la grafica 3.12.3 se observa el comportamiento de nuestro fluido MR con las velocidades de 3 y 10 rpm por lo que nuestras curvas siguen el mismo comportamiento sobresaliendo la curva con velocidad de 3 rpm.

Grafica 3.13.1 con la concentración de .03 a diferentes velocidades a un campo de 80 G.



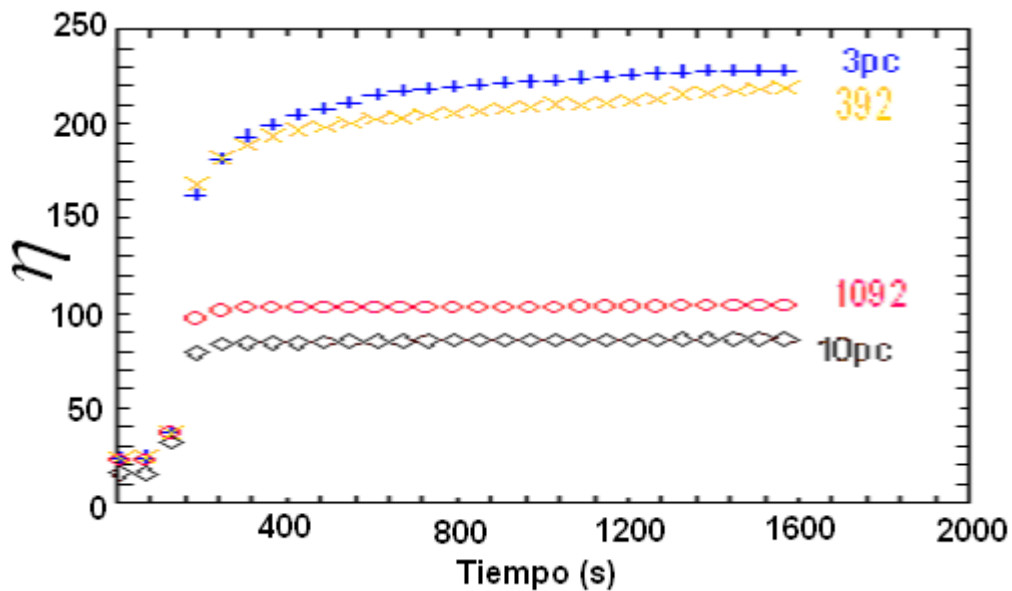
En la grafica 3.13.1 se observa el comportamiento de nuestro fluido a diferentes velocidades con un campo de 80 G. de una concentración de 0.3

Grafica 3.13.2 con la concentración de .03 a diferentes velocidades a un campo de 92 G.



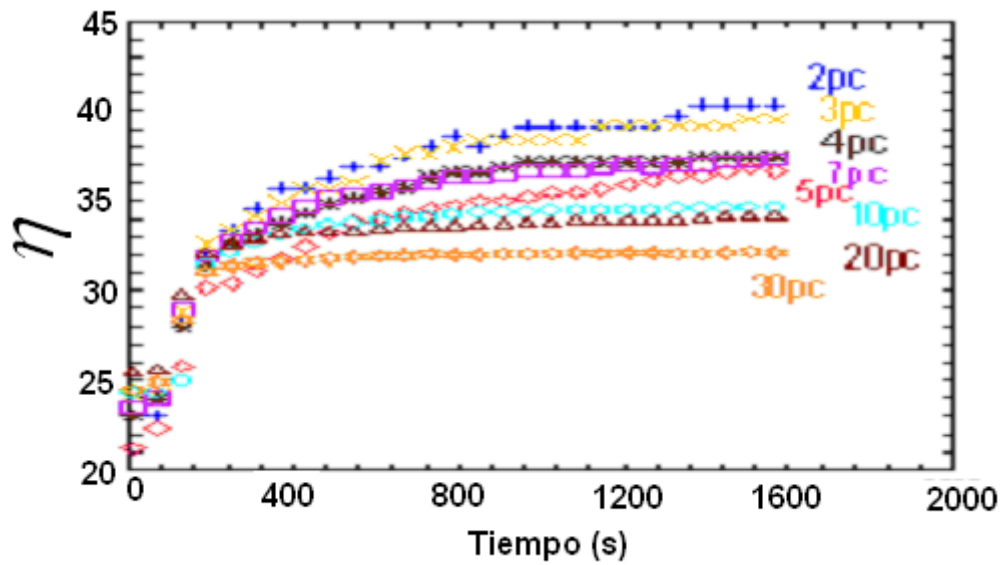
En la grafica 3.13.2 se observa el comportamiento de nuestro fluido MR a una concentración de .03 a diferentes velocidades.

Grafica 3.13.3 con la concentración de .03 con las velocidades de 3 y de 10 rpm.



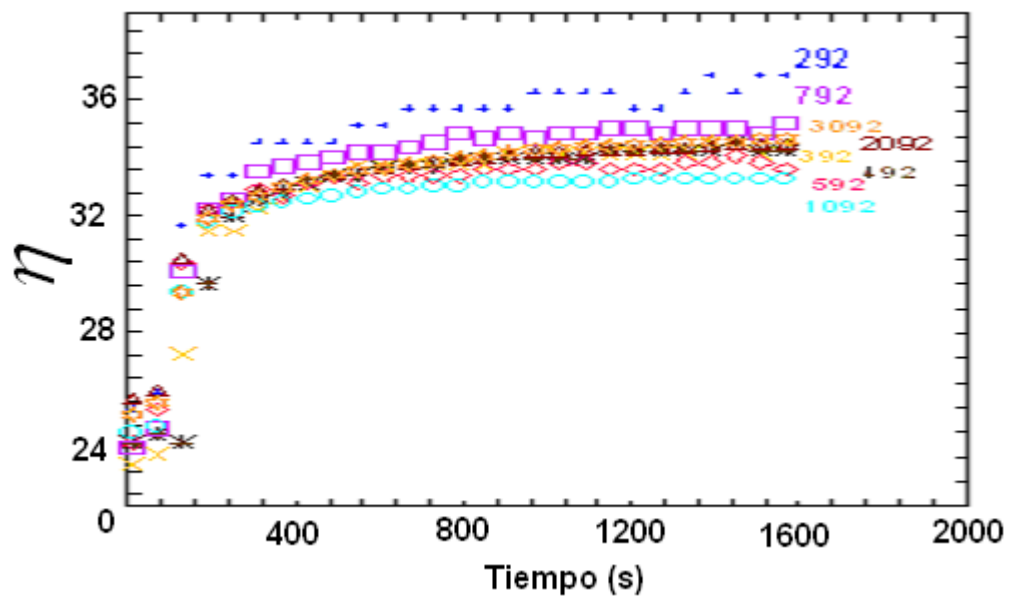
En la grafica se 3.13.3 se observa el comportamiento de nuestro fluido MR con las velocidades de 3 y 10 rpm por lo que nuestras curvas siguen el mismo comportamiento sobresaliendo la curva con velocidad de 3 rpm.

Grafica 3.14.1 grafica con la concentración de .05 a diferentes velocidades con un campo de 80 G.



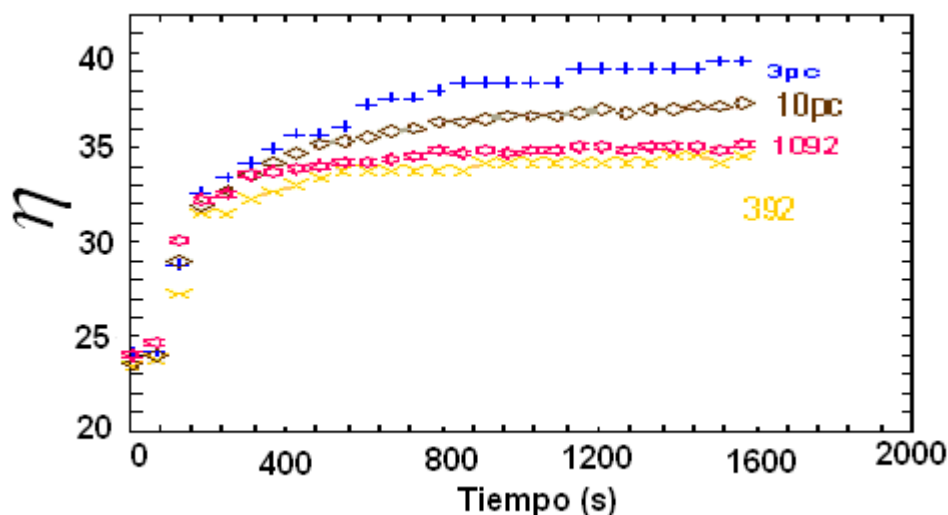
En la grafica 3.14.1 se observa el comportamiento de nuestro fluido a diferentes velocidades con un campo de 80 G. de una concentración de 0.05

Grafica 3.14.2 con una concentración de 0.05 a diferentes velocidades con un campo de 92 G.



En la grafica 3.14.2 se observa el comportamiento de nuestro fluido MR a una concentración de 0.05 a diferentes velocidades y a un campo de 92 G.

Grafica 3.14.3 con una concentración de .05 con las velocidades de 3 y de 10.



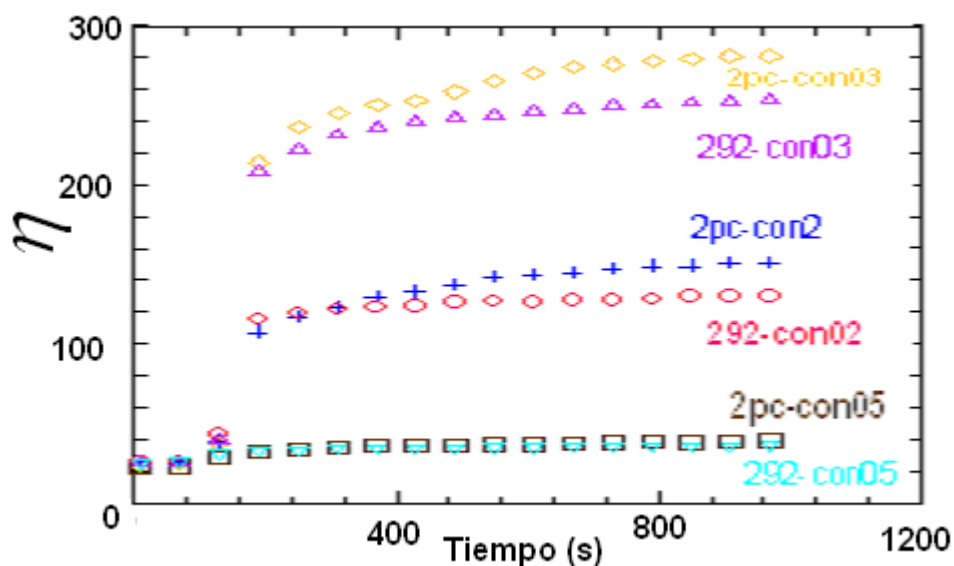
En la grafica se 3.14.3 se observa el comportamiento de nuestro fluido MR con las velocidades de 3 y 10 rpm por lo que nuestras curvas siguen el mismo comportamiento sobresaliendo la curva con velocidad de 3 rpm

En la gráfica 3.15.1 se comparan en una misma figura los casos con y sin perturbación para 3 concentraciones distintas. Observamos que a mayor concentración los cambios inducidos por la perturbación son mayores.

En la gráfica 3.15.2 se presentan se presentan explícitamente la función a una rapidez de corte de 2 rpm. Diferencia para las curvas mostradas en 13.15.1.

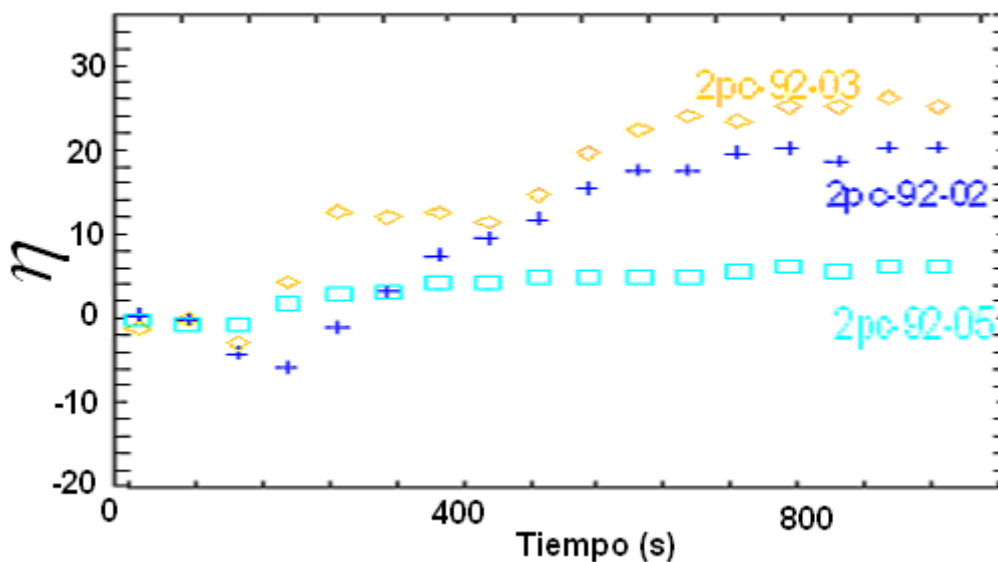
De forma similar se presentan el comportamiento para experimentos con una rapidez de corte de 7 rpm. Esto se hace en las graficas 3.16.1, 3.16.2 y 3.16.3. En general también se observa que para mayor concentración la función diferencia es mayor sin embargo también se observa que esta función diferencia disminuye con el tiempo.

Grafica 3.15.1 datos originales de todas las concentraciones a una velocidad de 2rpm



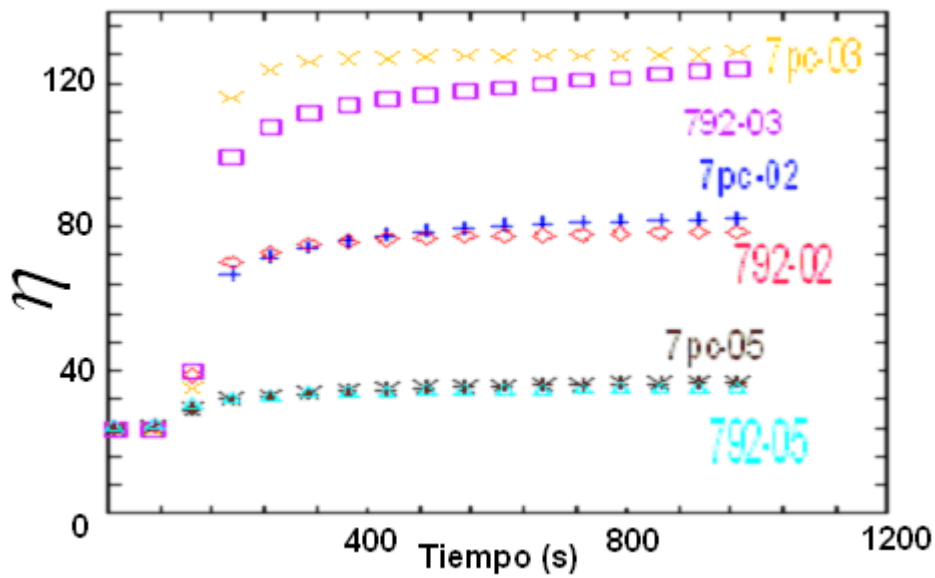
En la grafica se 3.15.1 se observa el comportamiento de las diferentes concentraciones de nuestro fluido MR con la velocidad de 2 rpm con los datos originales.

Grafica 3.15.2 datos normalizados de todas las concentraciones a una velocidad de 2rpm.



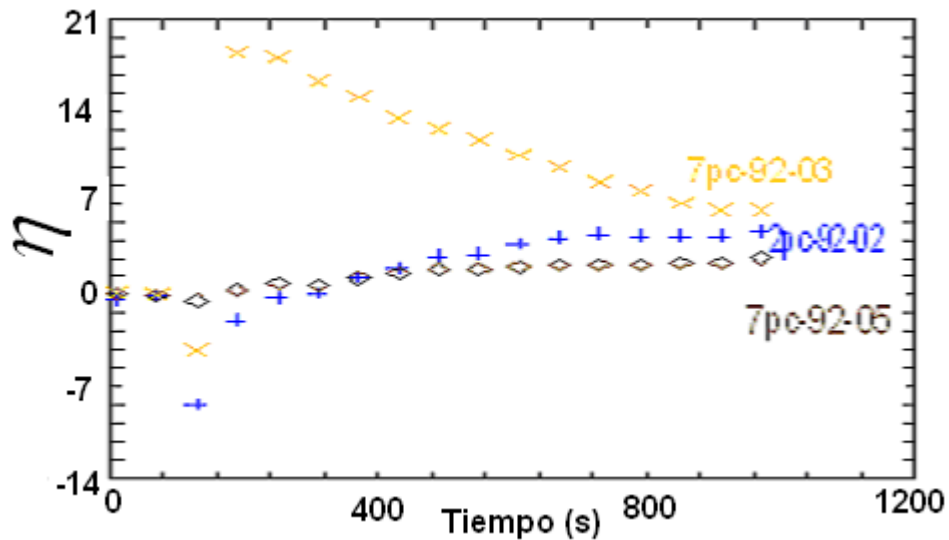
En la grafica se 3.15.2 se observa el comportamiento de las diferentes concentraciones de nuestro fluido MR con la velocidad de 2 rpm con los datos normalizados.

Grafica 3.16.1 datos originales de todas las concentraciones a una velocidad de 7 rpm.



En la grafica se 3.16.1 se observa el comportamiento de las diferentes concentraciones de nuestro fluido MR con la velocidad de 7 rpm con los datos originales.

Grafica 3.16.2 datos normalizados de todas las concentraciones a una velocidad de 7 rpm.



En la grafica se 3.16.2 se observa el comportamiento de las diferentes concentraciones de nuestro fluido MR con la velocidad de 7 rpm con los datos normalizados.

---

## CONCLUSIONES.

Hemos realizado mediciones de viscosidad bajo diferentes condiciones de campos aplicados, concentración de partículas y rapidez de corte en una muestra sometida a campos cruzados, uno de los cuales es dependiente del tiempo y su intensidad es baja de tal forma que puede considerarse como perturbación. Se estudian cuatro series de experimentos:

En la primera el fluido MR está constituido por partículas de magnetita y aceite de silicona. Las concentraciones que se estudian son: 0.03, 0.05, 0.07 y 0.10. Se observa la diferencia del comportamiento del fluido MR cuando está sometido únicamente a un campo primario 80 Gauss (G) en las curvas de referencia que va desde los 7.4 cP hasta los 138.1 cP. Al aplicar el campo perturbativo los valores tienden a aumentar desde los 8.1 cP hasta los 346 cP. Cabe resaltar que al apagar el campo secundario la viscosidad no disminuye, sino que se mantienen constantes. Así pues la viscosidad más alta en esta serie fue la que se obtuvo de la concentración 0.10 con la curva 4sp24hz, que en promedio se mantiene en 421 cP en los últimos 300 seg. También se analizó el comportamiento de la viscosidad usando diferentes frecuencias en el campo secundario, 1, 4 y 10 hertz, con una amplitud de 12 G, se comprobó que los cambios eran muy pequeños por lo que se decidió manejar una frecuencia de 4 Hz con una amplitud de 12 G.

Tabla 6.- concentrado de resultados de la serie 1 (fuente: Propia)

	0.03				0.05				0.07				0.1			
CURVA	180	300	300	300	180	300	300	300	180	300	300	300	180	300	300	300
ref.	7.9	11.6	12.5	12.6	7.4	16.7	20.98	22.1	8.7	52.1	78.64	96.4	15.9	82	123	138.1
92G	8.6	12.5	14.6	14.3	7.4	16.34	44.71	43.5	8.33	60	191.9	185	19.62	128	401	349.2
p24hz	8.7	12.1	17.3	19.4	7	16.74	38.71	55.7	8.4	62.4	233.4	272	18.42	95.8	346	409.7
sp24hz	8.2	14.4	17.4	18.6	7.1	41.03	50.09	61.4	8.96	243	285	297	19.02	340	417	421
92b	0	0	0	0	7.2	46.93	61.47	52.4	8.6	157	210.7	190	17.34	285	417	349.4

La segunda serie de experimentos se realizo con una muestra con las siguientes características: un fluido MR formado de partículas de magnetita y aceite de transmisiones para autos, con concentraciones de 0.05, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06. Las muestras primero se someten a una exposición de campo magnético primario de 80 gauss en un periodo de tiempo de 180 seg. Luego se someten por 420 seg. a ambos campos, el primario y el secundario este ultimo con frecuencia de 4 Hertz y una amplitud de 12 gauss. Finalmente el sistema se expone solamente al campo primario, esto durante los últimos 420 seg.

Al analizar las curvas mostradas de viscosidad como función del tiempo, observamos que las mediciones de viscosidad para la curva de la muestra con concentración de 0.06, tiene los mayores valores de viscosidad. Tiene un valor de viscosidad promedio de 308 cP cuando está expuesta a ambos campos. Al apagar el campo secundario aumenta la viscosidad hasta alcanzar un valor promedio de 406 cP en los últimos 420 seg. Por lo que podemos concluir que con una misma velocidad, a mayor concentración se forman enlaces más rígidos, que nos permiten obtener mayores cambios en la



---

viscosidad. Esto significa que la perturbación induce mayores cambios en la viscosidad a mayores concentraciones que a concentraciones menores.

**Tabla 7.- concentrado de resultados de la serie 2 (fuente: Propia)**

Concentración	180seg	420seg.	420seg.
0.005	6.4	10.26	11.43
0.01	7.47	14.84	19.06
0.02	6.93	32.47	46.06
0.03	7.43	94.75	130.32
0.04	8.39	133.84	184.41
0.05	7.89	404.63	332.85
0.06	7.69	308.07	406.09

En la serie tres hemos usado partículas de otro material donde las características son determinadas por el tipo de partícula que se utiliza, esto nos permitió responder a nuestra interrogante ¿Que pasaría si utilizáramos otro elemento como fase dispersa? Se utilizaron partículas de hidroxilo de fierro con aceite de transmisión para autos para conformar el fluido MR y se manejaron intensidades de campo magnético de 64 G., 72 G., 80 G., 88 G., y 96 G.

También se realizaron variaciones en la velocidad de corte de 1, 2 y 5 rpm. Se observa que la viscosidad efectiva no sufre cambios notables al variar la intensidad del campo magnético o rapidez de corte Por lo que se concluye que las partículas de este material no son un buen elemento para la elaboración de fluidos MR, ya que las curvas casi se traslapan una con otra a pesar de que la intensidad de campo es diferente. La viscosidad se mantiene

---

en un promedio de 25 cP, a una velocidad de 1 rpm. Mientras que a 2rpm su promedio es de 21 cP. Si aumentamos la velocidad a 5 rpm, la viscosidad se mantiene en un promedio de 18.6 cP; lo que representa un decremento significativo en la viscosidad, por lo que para nuestros objetivos este material no es adecuado.

La serie cuatro preparada con aceite de silicona con concentraciones de 0.01, 0.02, 0.03 y 0.05 donde se usaron las velocidades de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20 rpm. Al comparar los resultados de la viscosidad a una velocidad de 3rpm con la de 10 rpm de cada una de las concentraciones para indicar la variación que existe en la viscosidad al incrementar la velocidad. Observamos que el aumento de la velocidad no aumenta la viscosidad, por el contrario la viscosidad tiende a decrecer. Por último, comparamos datos normalizados, esto, es divididos entre el valor medio de la varianza en ausencia del campo de los datos obtenidos con las curvas de 80 G y 92 G. Se puede concluir claramente que nuestra mejor concentración es la de 0.03, ya que alcanza los niveles más altos de viscosidad y tiene un comportamiento mas estable a una velocidad de 3rpm, esto nos indica que no existen demasiadas fluctuaciones y que nuestro fluido MR tiene un comportamiento casi uniforme esto se puede comprobar en las gráfica 3.13.1 donde se alcanza una viscosidad de 440 cP en promedio y para la velocidad de 7rpm es de 120 cP. En promedio según la grafica 3.16.1.

Tabla 8.- concentrado de resultados de la serie 4 (fuente: Propia)

velocidades	con01		con02		con03		con05	
	pc	92	pc	92	pc	92	pc	92
1	0	0	8	6.49	15.57	15.6	0	0
2	0	0	5.92	5.15	11	10.09	1.62	1.37
3	2.09	1.9	4.78	4.1	9.024	8.6	1.53	1.34
4	2.03	1.85	4.09	3.99	7.97	7.74	1.52	1.37
5	1.98	1.79	3.08	3.65	6.9	6.06	1.56	1.34
7	1.94	1.81	3.38	3.22	5.59	5.25	1.5	1.4
10	1.88	1.79	2.91	2.7	5.73	4.7	1.4	1.33
15	1.65	1.66	2.55	2.45	0	0	0	0
20	1.48	1.55	2.2	2.26	0	0	1.32	1.31

De los análisis previos se concluye que, un campo oscilatorio transversal de baja intensidad tiene un efecto medible sobre la viscosidad en un fluido magneto-reológico, que está sometido también a un campo estático. Se producen ciertas características en las estructuras de los agregados, ya que experimentan una agregación lateral ocasionada por el campo secundario. Esto que permite obtener una mayor viscosidad, debido a que las partículas experimentan una reestructuración, alcanzando estados de menor energía, que proporciona enlaces más estables y da como resultado un fluido MR con mayores cambios de viscosidad y que se puede controlar con solo administrarle un campo perturbativo secundario en dirección transversal al campo primario.

Así pues con este trabajo hemos contribuido a proponer un método para lograr mayores cambios en la viscosidad de un fluido magneto-reológico.

---

Esto abre la posibilidad de usarlos para la construcción de novedosos dispositivos mecánicos que puedan sustituir los utilizados actualmente en la industria e ingeniería.

Día a día estamos en constante evolución, por lo que, se tiene que seguir adelante con estos estudios para lograr perfeccionar las características y propiedades de los fluidos MR, buscando la combinación que permita una mayor estabilidad y duración de los enlaces de las partículas de los fluidos MR, que den no solo seguridad en su comportamiento sino eficiencia y eficacia para trabajar con prototipos dirigidos a la supresión de las vibraciones de forma rápida y menos costosas de diversos mecanismos usados en la industria e ingeniería. De esta manera contribuir al desarrollo de nuestra sociedad, ya que el compromiso que se tiene como profesionista es emplear la ciencia y el conocimiento adquirido en las aulas para un bien común. En un futuro próximo esto será reflejado en aplicaciones multidisciplinarias, perfeccionadas en diferentes equipos con enfoques proyectados a hacer la vida más segura y con mayor confort para los seres humanos que exigen productos con mayores resultados y un valor agregado.

## GLOSARIO.

**Campo magnético.** Es una zona en la cual se experimenta una fuerza de atracción o repulsión de las moléculas que interactúan con él.

**Liposoluble.** Es un sólido coloidal con aceite como medio de dispersión.

**Hidrofílico.** Es un sólido coloidal con agua como medio de dispersión

**Esfuerzo de cizalla.** Cuando se aplica un esfuerzo cortante a un sólido, su efecto es producir un cierto desplazamiento a este sólido. Se define el esfuerzo unitario de cizalladura como la razón de este desplazamiento a la dimensión transversal (Fuerza/superficie).

**Deformación.** Angulo de cambio de la forma de un sólido (strain)

**Cizalla.** En un líquido si se aplica una fuerza en la parte superior (ver Fig. 1) se encuentra que el líquido que está en contacto con la superficie móvil tiene la misma velocidad que esta superficie, mientras que el líquido adyacente a la pared fija permanece en reposo.

**Concentración.** Como la cantidad de partículas que serán agregadas según las características que se deseen obtener.

**Aglomerado.** Partículas unidas débilmente por adhesión mecánica o por la interacción molecular (fuerzas de Van Der Waals).

**Agregado.** Partículas unidas en su superficie por enlaces atómicos.

**Caracterización.** Determinación de las propiedades peculiares del producto final, de modo que se distinga claramente, mediante pruebas realizadas a la muestra de estudio para comprobar si cuenta con las propiedades requeridas.

**Molino de bolas.** Pulverizador que consiste en un cilindro giratorio horizontal y que contiene una carga de bolas de acero de diferentes diámetros

---

## REFERENCIAS.

- [1] Antonio V. Baldera, Problemas de flujo de un fluido, Ed Limusa.
- [2] Robert I. Mott, Mecánica de fluidos aplicada, Ed Prentice-Hall, 4ª. Edición, (1994). [http://construaprende.com/lab/10/prac10\\_1.html](http://construaprende.com/lab/10/prac10_1.html)
- [3] Hugo de Notta, Introducción a la Reología, Sociedad de Argentina de Tecnólogos en Recubrimientos de Ucar Emulsión Systems.
- [4] P.P. Phule and J.M. Ginder, MRS Bulletin, August, 19, 1998
- [5] Y.Qi, L. Zhand and W. Wen, J.Phys.D: Appl. Phys. 36, L10, (2003)
- [6] Y Zhen, M.F. Golnaraghi, G.R. Heppler, J. Intel. Mat. Syst. 15, 27, (2004).
- [7] W.M. Winslow, J. Appl. Phys. 20, 1137 (1949).
- [8] J. Rawbinow, "Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device", US Patent 22575360 (1951) "Highspeed Magnetic Fluid Clutch", US Patent 2622713 (1952), "Radial Flux Magnetic Fluid Clutch" US Patent 2629471 (1953)
- [9] R.E: Rosensweig, Ferrohydrodynamics, Cambridge University Press, New York, 1985.
- [10] P.P. Phule y J.M. Ginder, MRS Bulletin 19 (1998)
- [11] J.E. Weber, A. R. Goni, D.J. Pusiol y C. Thomsen, Phys. Rev, E 66 (2002)021407.
- [12] P. Jund. S.G. Kim, D. Tomamek y J. Hetherington, Phys. Rev. Lett. 74 (1997) 614.
- [13] W. Went and K. Lu, Appl. Phys Left, 2147(1995)
- [14] A.Inonue, Y. Ide, S. Maniwa, H. Yamada, and H. Oda, MRS Bulletin August, 43 (1998).
- [15] W. Went, D. W. Zheng, and K. N. Tu, Phys. Rev. E57, 4516(1998).

---

[16] C.C. Koch y R.H. Hershberger, "Powder Metal Technologies and Applications", volumen 7, pp. 53-63, 7279, (1998).

[17] Pérez Osorio, Miguel Ángel. Tesis de Licenciatura "Síntesis, crecimiento, estudio estructural y térmico de microcristales de magnetita", Facultad de Ciencias Químicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Puebla. (2004)

[18] <http://www.uned.es/cristamine/fichas/magnetite/magnetite.htm>.

[19] Virginia Flores, "Refinamiento de tamaño de partículas metálicas por molienda en húmedo", tesis, UAEH, pp. 18,19. (2003).

[20] Randall M. German. "Powder Metallurgy Science", Capítulo III, pp. 84-87, Segunda Edición, editorial MPIF (1994).

[21] P.R.Soni, "Mechanical Alloying fundamentals and applications", Cambridge International. Pp 19-23.

[22] C.C. Koch y R.H. Hershberger, "Powder Metal Technologies and Applications", volumen 7, pp. 53-63, 72-79, (1998).

[23] Alain-claude Roudot, "Reología y Análisis de la textura de los alimentos", Capítulo 5, 59-67, editorial ACRIBIA, S.A.