

23



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

*Zey*

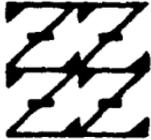
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
"ZARAGOZA"

" RELACION ENTRE PROPIEDADES REOLOGICAS Y  
ELECTRICAS EN FLUIDOS ELECTROREOLOGICOS "

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
CANDIDO DE LA LUZ ORTEGA

U N A M  
F E S  
Z A R A G O Z A



LO HUBIERA E N  
DE SUFICIENTE CALIDAD

MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES "SARAGOZA"

JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA

07/JU/25/95

SR. CANDIDO DE LA LUZ ORTEGA  
P R E S E N T E.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, le comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

PRESIDENTE: ING. ALEJANDRO ROGEL RAMIREZ  
VOCAL: M. I. LEONARDO REJON GARCIA  
SECRETARIO: ING. JOSE BENJAMIN RANGEL GRANADOS  
SUPLENTE: ING. ISMAEL BAUTISTA LOPEZ  
SUPLENTE: ING. ESTEBAN MINOR PEREZ

A T E N T A M E N T E  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

México, D.F., 3 de marzo de 1995

  
ING. JOSE BENJAMIN RANGEL GRANADOS  
JEFE DE LA CARRERA

IRM.

---

**DEDICATORIA.**

**A MIS PADRES**

**Ofelia Ortega Mozo.  
Crispín de la Luz Medina.**

**Por el apoyo que me han brindado en el transcurso de mi vida.**

---

## **AGRADECIMIENTOS.**

**Agradezco al asesor de mi tesis M.I. Leonardo Rejón García por el apoyo que me brindó durante el desarrollo de la misma.**

**Al M.C. Marco Antonio Ponce por sus valiosas ideas y observaciones durante el desarrollo de la tesis.**

**Al Dr. Victor M. Cataño por sus importantes ideas.**

**Al Dr. Roberto Olayo por aportar sus ideas desinteresadamente.**

**A los integrantes del Departamento de Materiales por su atención y ayuda en especial a Claudia Sánchez G, Victor M. Zamudio y Luz M. Leana.**

**Al Instituto de Investigaciones Eléctricas por su ayuda económica en la elaboración del presente trabajo.**

---

**Es mejor llegar a ser que haber nacido siendo.**

**Marco Fidel Suárez.**

## INDICE

	PÁGINA
Resumen	1
Introducción	2
<b>CAPITULO 1</b> <b>(Antecedentes de la electroreología).</b>	<b>6</b>
1.1.-Origen del problema.	6
1.2.-Antecedentes.	7
1.3.-Alcance del presente estudio.	14
1.4.-Aplicación de los FER's.	15
1.4.1.-Sistemas de amortiguamiento.	16
1.4.2.-Transmisiones de automóviles.	16
1.4.3.-Robótica y sistemas hidráulicos.	17
Bibliografía.	19
<b>CAPITULO 2</b> <b>(Reología de los Fluidos Electroreológicos).</b>	<b>21</b>
2.1.-El concepto de Fluido Electroreológico.	21
2.2.-Comportamiento viscoelástico de los FER's.	23
2.2.1.-Regiones reológicas.	23
2.2.1.1.-Pre-cedencia.	24
2.2.1.2.-Pos-cedencia.	24
2.2.1.3.-Cedencia.	25
2.2.2.-Tipos de deformación viscoelástica.	25
2.2.2.1.-Efecto de la variación del campo sobre el comportamiento reológico de los FER's.	26
2.2.3.-Propiedades viscoelásticas.	27
2.3.-Modelos reológicos del fenómeno electroreológico.	28
2.3.1.-Modelo de Bingham.	28
2.3.2.-Modelo de Zona Cortante.	32
2.3.3.-Comparación entre el modelo de Bingham y el de la Zona Cortante.	37

---

	<b>PAGINA</b>
2.3.4.-Modelo de la Gota.	38
2.4.-Diseño de un FER.	41
2.4.1.-Requerimientos mínimos de la fase sólida.	41
2.4.2.-Requerimientos mínimos de la fase líquida.	42
2.4.3.-Requerimientos del FER para alta factibilidad de uso.	43
Nomenclatura.	45
Bibliografía.	47
<b>CAPITULO 3</b>	
<b>(Características y propiedades de los FER's).</b>	<b>49</b>
3.1.-Estructuras observadas en FER's.	49
3.1.1.-Suspensiones diluidas.	50
3.1.2.-Suspensiones moderadamente concentradas.	51
3.1.3.-Suspensiones con una concentración intermedia.	51
3.1.4.-Cambios de la estructura ocasionado por el tipo de corriente aplicada.	52
3.2.-Cambios estructurales debido a flujo.	52
3.2.1.-Distorsión de las partículas alineadas.	52
3.3.-Tipos de materiales empleados en FER's.	53
3.3.1.-Materiales empleados en la fase líquida.	53
3.3.2.-Materiales empleados como fase sólida.	54
3.3.2.1.-Tamaño de partícula.	54
3.3.2.2.-Naturaleza química.	55
3.4.-Fenómeno de polarización.	55
3.5.-Mecanismos del fenómeno electroreológico.	58
3.5.1.-Teoría de la doble capa.	58
3.5.2.-Teoría del almacenamiento de agua.	60
3.5.3.-Polarización de la partícula.	62
3.5.3.1.-Polarización electrónica.	62
3.5.3.2.-Polarización atómica.	62
3.5.3.3.-Polarización nómada.	63
3.5.3.4.-Polarización rotacional.	63
3.5.3.5.-Polarización interfacial.	63
3.6.-Compuestos polares y no polares.	64
3.6.1.-Enlaces atómicos no polares.	64
3.6.2.-Enlace atómico polarizado.	65

---

---

	<b>PAGINA</b>
3.6.3.- Tanto por ciento de carácter iónico.	65
3.6.4.- Otras formas de medir la polaridad.	66
3.7.- Relación entre la constante dieléctrica y polaridad.	67
3.8.- Conductividad en materiales.	69
3.8.1.- Conducción iónica.	71
Nomenclatura.	72
Bibliografía.	73
<b>CAPITULO 4</b>	
(Materiales y técnicas de experimentación).	<b>75</b>
4.1.- Introducción.	75
4.2.- Materiales y preparación de FER's	78
4.2.1.- Preparación de FER's.	80
4.2.2.- Evaluación eléctrica de materiales.	81
4.3.- Métodos reológicos para la caracterización de FER's.	81
4.3.1.- Geometría de cono y plato.	81
4.3.2.- Geometría de cilindros concéntricos.	83
4.3.3.- Geometría de platos paralelos.	85
4.4.- Sistema empleado para la evaluación reológica de FER's.	88
4.5.- Técnicas de caracterización estructural de FER's.	90
4.6.- Arreglo utilizado para la caracterización estructural de los FER's.	91
Nomenclatura.	94
Bibliografía.	95
<b>CAPITULO 5</b>	
(Resultados e Interpretaciones).	<b>96</b>
5.1.- Análisis estructural de los FER's.	97
5.1.1.- Efecto de la concentración sobre el cambio estructural de los FER's.	98
5.1.2.- Efecto de la viscosidad de la fase líquida sobre el cambio estructural de los FER's.	104
5.1.3.- Efecto de la constante dieléctrica de la fase líquida sobre el cambio estructural de los FER's.	106
5.1.4.- Efecto de la intensidad del campo eléctrico sobre el cambio estructural de los FER's.	108

---

---

	<b>PAGINA</b>
<b>5.2.-Análisis reológico de los FER's.</b>	<b>115</b>
<b>5.2.1.-Efecto de la constante dieléctrica.</b>	<b>115</b>
5.2.1.1.-Influencia de la velocidad de corte sobre el esfuerzo de corte.	116
5.2.1.2.-Influencia de la velocidad de corte sobre la viscosidad.	118
5.2.1.3.-Influencia de la constante dieléctrica de la fase líquida en el incremento en la viscosidad del FER.	122
5.2.1.4.-Efecto del campo eléctrico sobre el incremento en la viscosidad de los FER's.	126
<b>5.2.2.-Efecto de la viscosidad.</b>	<b>129</b>
5.2.2.1.-Influencia de la velocidad de corte sobre el esfuerzo de corte.	129
5.2.2.2.-Influencia de la velocidad de corte sobre la viscosidad.	133
5.2.2.3.-Influencia de la viscosidad de la fase líquida sobre el incremento en la viscosidad de los FER's.	137
5.2.2.4.-Efecto del campo eléctrico sobre el incremento en la viscosidad de los FER's.	143
<b>Bibliografía.</b>	<b>148</b>
 <b>CAPITULO 6</b> <b>(Conclusiones y recomendaciones).</b>	 <b>149</b>
 <b>Anexo.</b>	 <b>153</b>

---

## RESUMEN.

Los fluidos electroreológicos (FER's) son sustancias que en presencia de un campo eléctrico sufren un cambio en su estructura la cual se refleja en un cambio reológico ya que incrementan su resistencia al flujo, éstas propiedades así como el tiempo de respuesta de estos fluidos ha hecho que la industria automotriz este muy interesada en este tipo de fluidos.

En este trabajo se estudia la influencia de la constante dieléctrica y la viscosidad de la fase líquida sobre la magnitud de la respuesta electroreológica (incremento en la viscosidad) y la estructura (arreglo espacial de la fase sólida) que forme la suspensión, analizando su comportamiento reológico bajo la influencia de un campo eléctrico.

Para lograr tal objetivo fue necesario desarrollar una etapa experimental en donde se seleccionaron un grupo de fases líquidas que tuvieran una constante dieléctrica diferente pero con una viscosidad parecida y otro en donde las fases líquidas tuvieran una viscosidad diferente y una constante dieléctrica parecida.

De nuestro análisis experimental determinamos que las propiedades de la fase líquida influyen directamente en el comportamiento estructural de los FER's y dichas estructuras determinan la magnitud de la respuesta electroreológica. Por otro lado, se encontró que el Dioctil Ftalato (DOP) y el Aceite de Silicón 1000 (AS-1000) son las fases líquidas que prometen tener buenas características para favorecer la respuesta electroreológica.

---

## INTRODUCCION.

Una de las tendencias modernas en el diseño y fabricación de equipos y dispositivos de ingeniería y de control, es el empleo de nuevos materiales y sistemas "inteligentes". Estos consisten en sistemas y/o materiales con capacidad adaptativa de algunas de sus propiedades, dependiendo de las modificaciones de algunas de las condiciones externas específicas. En otras palabras, materiales sensitivos al ambiente con capacidad de cambiar sus propiedades físicas. En este contexto son de interés los campos eléctricos en combinación con cierto tipo de fluidos que hacen posible unir las ventajas de una baja energía de entrada y una gran potencia de salida para el control de sistemas mecánicos. Por otra parte, es de gran importancia para la comunidad científica e industrial, conocer el comportamiento reológico de un material cuando se le aplica un campo eléctrico.

Uno de los sistemas inteligentes que ha tomado gran auge en los últimos años por la potencialidad en su aplicación a nivel industrial son los Fluidos Electrorreológicos (FER's).

Los FER's se definen como aquellas sustancias que en presencia de un campo eléctrico sufren un cambio en su estructura que a su vez se refleja en un incremento abrupto en su resistencia al flujo (viscosidad). Dependiendo de la intensidad del campo a la cual está sujeto, un FER (Fluido Electrorreológico) puede fluir como el agua, como la miel o llegar a solidificarse como una gelatina. Es importante señalar que los cambios con el campo son reversibles.

El fenómeno que se presenta en ciertos materiales el cual les permite cambiar sus propiedades de flujo (viscosidad) y de deformación cuando están bajo la influencia de un campo eléctrico se le llama Efecto Electrorreológico. Este fenómeno fue descubierto por Willis Winslow[1] a finales de la década de los 40's. Desde entonces el interés del mundo científico por estudiar este tipo de materiales se incrementó en la década de los 80's y en lo que va de ésta, ya que tienen gran potencial de aplicación en sistemas de amortiguamiento, transmisiones de automóviles, robótica, sistemas hidráulicos entre otros.

La propiedad de interés en los Fluidos Electrorreológicos (FER's) es su rápido Tiempo de Respuesta (TR), es decir, el tiempo necesario para presentar un cambio en su viscosidad al aplicar un campo eléctrico. Este tiempo es generalmente del orden de milisegundos (ms).

Una de las principales industrias interesadas en la utilización de los FER's es la automotriz, principalmente para el desarrollo de amortiguadores.

Con el objetivo de entender la influencia que tienen ciertas características de los componentes de un FER sobre la magnitud de la Respuesta Electrorreológica (RE), en este trabajo se analizará el efecto de la constante dieléctrica y viscosidad de la fase líquida, su relación con la estructura que forme la suspensión y su comportamiento reológico bajo la influencia de un campo eléctrico.

A continuación se explicará brevemente el contenido de este trabajo.

En el capítulo 1 se expondrán los objetivos de la tesis así como su alcance, se hará un resumen sobre el desarrollo de la electrorreología y por último, algunas aplicaciones de los FER's.

En el capítulo 2 se definirá lo que es un FER, el comportamiento viscoelástico de estos y los modelos reológicos planteados para explicar el comportamiento en flujo de los FER's.

En el capítulo 3 se mencionará el tipo de estructura microscópica que presentan los FER's al ser expuestos a un campo eléctrico, el fenómeno de polarización y su importancia en la aplicación del fenómeno electrorreológico así como los mecanismos planteados para explicar dicho fenómeno.

En el capítulo 4 se explicará el arreglo y el procedimiento empleado para hacer la evaluación reológica (viscosidad) de los FER's. Así como el arreglo y método utilizado para la determinación de las estructuras que se presentan en los FER's al estar bajo la influencia de un campo eléctrico.

En el capítulo 5 se analizan y discuten los resultados obtenidos de la parte experimental. Por último en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo.

## CAPITULO 1

### ANTECEDENTES DE LA ELECTROREOLOGIA.

#### 1.1.- ORIGEN DEL PROBLEMA.

Existe una gran expectativa por parte de la comunidad científica e industrial por los Fluidos Electrorreológicos (FER's) ya que pueden tener aplicaciones muy diversas e importantes en nuestra vida cotidiana.

Todos los fluidos denominados electrorreológicos involucra una dispersión de partículas en un aceite con características aislantes, en el cual el papel activo de la suspensión es dominado por la capacidad de polarización y dispersión de las partículas. El aceite tiene como función principal el de un aislante eléctrico de las mismas.

Se han realizado un sin número de publicaciones con el fin de comprender el mecanismo por el cual se dá el fenómeno electroreológico [1,2,3], el factor que determina el Tiempo de Respuesta (TR)[4,5], y la influencia de las características de la fase sólida[6], sobre la Respuesta Electroreológica (Incremento en viscosidad, RE). A pesar de los esfuerzos realizados anteriormente no se ha logrado un entendimiento completo del fenómeno, pero se insiste en la investigación en esta área ya que dicho fenómeno puede ser aprovechado en aplicaciones concretas y es de esperarse que tenga una explotación comercial. Bajo este contexto la comunidad científica se ha interesado en desarrollar un FER con una mayor RE, basandose principalmente en el empleo de partículas con mayor capacidad de polarización.

Con la finalidad de aportar algun conocimiento que ayude a entender mejor el fenómeno, en este trabajo se tratará de correlacionar características de la fase líquida como son la constante dieléctrica y la viscosidad con la magnitud de la RE, analizando el comportamiento reológico y el tipo de estructuras que forman las suspensiones bajo la acción de un campo eléctrico. Es importante mencionar que en este trabajo las propiedades de la fase sólida permanecen constantes.

## 1.2.- ANTECEDENTES.

La influencia del campo eléctrico en la deformación de suspensiones y las propiedades de flujo de materiales ha estado sujeta al interés de los científicos por muchos años.

El cambio reversible en la viscosidad aparente cuando un fluido esta sujeto a un campo eléctrico aplicado externamente fue reportado por primera vez por A. W. Duff en 1896[7]. Duff estudio el efecto del campo eléctrico aplicado a la glicerina, aceite de castor y parafina pesada, observando pequeñas variaciones en la viscosidad.

Muchos años después Willis Winslow[1] observó que suspensiones compuestas de partículas de sílica y aceites de baja viscosidad mostraban un cambio significativo en su viscosidad cuando se sometían a un campo eléctrico. Winslow hizo las siguientes observaciones de sus experimentos.

1.- En un campo eléctrico de una magnitud del orden de 3 kV/mm, las suspensiones muestran una tendencia a fibrilarse en donde las estructuras de las partículas están paralelas al campo.

2.- El fluido que se encuentra bajo la influencia del campo eléctrico tiene una viscosidad proporcional al cuadrado del campo. A bajos esfuerzos de corte, el sistema se comporta parecido a un sólido.

3.- A esfuerzos mayores que un esfuerzo inicial (esfuerzo de cedencia), la suspensión fluye como un fluido viscoso pero con una viscosidad mayor, otra vez proporcional al cuadrado del campo eléctrico.

Estos resultados de Winslow anticiparon tres principales temas de estudio de las propiedades macroscópicas de los FER's:

a) La deformación estructural de estos fluidos.

b) Esfuerzo inicial, o fuerza en el cual ocurren los cambios del fluido de sólido a líquido.

c) El comportamiento viscoso de los fluidos más allá del esfuerzo inicial.

Las investigaciones que se realizaron posteriormente a los estudios reportados por Winslow tuvieron la siguiente tendencia:

a) En 1949, el propio Winslow patentó el primer clutch y la primera válvula electroreológica[6].

b) De acuerdo a datos experimentales realizados por Mooney[6] en 1951, desarrolló un modelo para calcular la viscosidad de suspensiones concentradas, ya que con la ecuación de Einstein se tenían desviaciones pues está solo servía para suspensiones muy diluidas.

c) En 1967, D. L. Klass y T. W. Martinek[2] propusieron algunos mecanismos para explicar el comportamiento electroreológico, además, determinaron las propiedades eléctricas y reológicas de este tipo de fluidos.

d) El alineamiento de partículas esféricas que se producía en la presencia de campos eléctricos y velocidades de corte fueron estudiados por Mason en 1974[6].

e) En 1983, Stangroom sugiere una teoría para explicar el fenómeno electroreológico basada en el Almacenamiento de Agua y deja ver la

importancia de los FER's en aplicaciones específicas tales como: clutch y válvulas electrorreológicas[3].

Se ha estudiado insistentemente la naturaleza química de la fase sólida pues la mayoría de los FER's requieren un pequeño contenido de agua del orden de 5 a 10% para favorecer la RE, pero en aplicaciones en donde se generan temperaturas superiores a los 100°C, provocan que el agua contenida en la suspensión se evapore y disminuya la RE. Otro problema de los FER's es la sedimentación ya que produce una inestabilidad en el fluido. A continuación mencionaremos los intentos realizados por desarrollar una fase sólida que disminuya los problemas antes mencionados.

La fase sólida más común para los sistemas que contienen agua es la Sílica, estudiada por Winslow en 1949; después se utilizaron minerales de cerámica en 1970 por Lykov y Shulman; en 1972 Uejima empleó la celulosa; en 1976 se analizaron los óxidos de metales por Efimov y Shulman, y las resinas de intercambio iónico por Sugimoto en 1977[6].

Sin embargo debido a los problemas antes mencionados la investigación se ha dirigido hacia el desarrollo de suspensiones libres de agua. A continuación se mencionan algunos trabajos al respecto:

a) En 1980, Strangroom analizó las sales de litio de ácidos polimetacrilizados; en 1984 Deinega y Vinogradov estudiaron al alcohol pilivinílico, y en 1988 Jordan y Shaw estudiaron al poliestireno con cierto contenido de cloruro de litio[6].

b) En 1988, Adriani y Gast analizaron los problemas que tienen los FER's cuando se utilizan tamaños de partículas muy pequeños encontrando que existe una competencia entre el movimiento browniano y el campo eléctrico. Este mismo año, Block sugiere que el agua que contienen los FER's puede ser sustituida por otro líquido polar con mayor estabilidad térmica. Los líquidos que sugirió fueron: alcoholes, etilenglicol, dimetilamina y formamida[6].

c) En 1991, Kordonsky y Korobko realizaron estudios con cationes de celulosa en aceites y soluciones de polímeros[8], analizando los efectos de la estructura molecular del polímero, el tipo de catión y de fase sólida con el fin de obtener una mayor RE. Observaron un incremento en el efecto electrorreológico al utilizar como fase sólida un agente acoplante ( $H^{+1}$ ,  $Li^{+1}$ ,  $K^{+1}$ ,  $Al^{+3}$ , y  $Cr^{+2}$ ) unido a un polímero, estudiando diferentes tipos de sales en distintas fases líquidas.

d) En 1991, Treasurer y Filisko llevaron sus estudios al uso de polielectrolitos en líquidos no conductores[9], encontrando que a una temperatura del orden de  $100^{\circ}C$  existe una mayor actividad electrorreológica que a temperatura ambiente. Su análisis en este tipo de suspensiones los ha llevado a establecer una relación entre la actividad electrorreológica y la constante de disociación de la fase sólida. Con lo anterior robustecieron la hipótesis de que la actividad electrorreológica está asociada a la movilidad de cargas de las partículas.

En años recientes la investigación de los FER's se ha extendido un poco más pues se han hecho estudios en el que someten a los FER's a esfuerzos de corte oscilantes. Lo anterior, con el fin de analizar el tipo de comportamiento viscoelástico

dinámico (relajación) y la forma en que disipa la energía aplicada. A continuación mencionaremos algunas de las investigaciones que se realizan en este campo:

a) En 1991, Gamota y Filisko[10] estudiaron la respuesta que se producía en una suspensión de silicato-aluminio en aceites de parafina cuando se les aplicaba un esfuerzo de corte oscilante, encontrando que la respuesta dependía de la magnitud del campo eléctrico aplicado, de la amplitud de la velocidad de deformación y de la frecuencia. En este año varios investigadores, reportaron el comportamiento dinámico a altas frecuencias para la misma suspensión[11]; observando cambios en los FER's a diferentes frecuencias y relacionaron las propiedades viscosas del material con el ciclo de histeresis del mismo; analizaron las propiedades elásticas del material, encontrando también una dependencia de dicha propiedad con respecto a la magnitud del campo eléctrico, la frecuencia y la amplitud del esfuerzo de deformación.

b) En 1991, McLeish y Jordan[12] realizaron estudios sobre la respuesta viscoelástica de los FER's analizando el comportamiento del módulo elástico y viscoso. Reportaron que a altas concentraciones la magnitud del módulo viscoso se ve influenciado por las fibrilas que están unidas únicamente a uno de los electrodos en tanto que el módulo elástico está dominado por las fibrilas que atraviesan los electrodos.

La industria automotriz esta interesada en los FER's por el potencial que representa su uso en dispositivos tales como clutch y amortiguadores. Por tal motivo en 1991, Harstack y el STAFF de investigación de la Ford Motor Company[13], realizaron un análisis de los requerimientos mínimos de los FER's para su

comercialización, posteriormente hicieron un estudio de factibilidad técnica de diversos fluidos en diferentes dispositivos y compararon sus resultados con los requerimientos en la práctica, mostrando que no era todavía posible su comercialización

Por otra parte, el tiempo de respuesta es un tema muy importante por lo significativo en las aplicaciones de los FER's. Por tal razón, en el Instituto de Investigaciones Eléctricas se está realizando una investigación[14] acerca del Tiempo de Respuesta (TR) como función de algunas características de los componentes de dicha suspensión.

Cuando un FER es colocado entre dos electrodos y se le aplica un campo eléctrico la viscosidad de la suspensión se incrementa. Las partículas al polarizarse forman cadenas (fibrilas) alineadas paralelamente al campo eléctrico aplicado. Estas estructuras que se forman debido a la polarización también modifican otras propiedades tales como: las eléctricas, termofísicas, acústicas y ópticas[4]. Existe un gran interés en determinar las propiedades ópticas de los FER's debido a que pueden ser de gran ayuda para la determinación del TR y algunas otras propiedades como las estructurales.

El TR se puede definir como "el intervalo de tiempo entre la aplicación del campo y la formación de la primera fibrila enlazada"[5]. Es necesario aclarar que la formación de las fibrilas es un proceso aleatorio y que también hay un intervalo amplio de TR (desde algunos milisegundos hasta varios segundos).

El TR del orden de algunos milisegundos es una de las características de mayor interés que presentan los FER's y por lo que la industria automotriz y la comunidad

científica continúan la investigación por llegar a la aplicación industrial de dichos fluidos. La rapidez de respuesta de estos fluidos nos permite tener un mejor control de dispositivos mecánicos en un corto intervalo de tiempo, comparado con otras alternativas.

En el diseño de los FER's no sólo interesa que la suspensión tenga la capacidad de incrementar bruscamente su viscosidad sino también la rapidez con que efectúe este incremento es un aval para un buen diseño, ya que es un indicio de que la fase sólida y la líquida son las adecuadas.

### 1.3.- ALCANCE DEL PRESENTE ESTUDIO.

Como se mencionó anteriormente existen muchos y muy diversos estudios sobre el fenómeno electrorreológico pero no ha quedado claro el efecto que tienen algunas características de algunos de sus componentes en la RE.

En este trabajo se analizará el efecto que puede tener una variación en la constante dieléctrica y la viscosidad de la fase líquida sobre la variación de la magnitud de la RE (incremento en la viscosidad) y en el comportamiento en flujo de la suspensión a diferentes magnitudes de campo eléctrico. Cabe aclarar que sólo se usará un tamaño específico ( $0.63 \mu\text{m}$ ) y una fracción volumen (0.09) de la fase sólida (sílica gel).

**Para lograr el objetivo será necesario determinar:**

- a) **Qué efecto tiene el campo eléctrico (0 a 1.25 kV/mm) sobre la viscosidad del FER así como la influencia de la velocidad de corte (0.1 a 26  $\text{seg}^{-1}$ ) sobre está.**
  
- b) **El efecto de la constante dieléctrica (2.42, 4.63 y 25.81) y la viscosidad (105, 333, 505 y 980  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) de la fase líquida sobre el comportamiento reológico y la magnitud de la respuesta electrorreológica (incremento en viscosidad).**
  
- c) **Qué efecto tiene el campo eléctrico, la viscosidad y la constante dieléctrica de la fase líquida sobre el cambio estructural de los FER's.**

Al terminar este trabajo tendremos información para poder comprender la relación que existe entre la constante dieléctrica y la viscosidad de la fase líquida con la RE de los FER's. Así como las limitaciones y ventajas que presenten los parámetros mencionados.

#### **1.4.- APLICACIONES DE LOS FER's.**

La amplia aplicación de los dispositivos electrorreológicos van desde una simple válvula hidráulica hasta un molde complejo para copiar máquinas. Dado que los FER's tienen un TR casi instantáneo, hace posible su uso en Sistemas de Control de Retroalimentación para la robótica y en aplicaciones automotrices los cuales mejoran

a los modelos existentes. A continuación haremos una breve descripción de las aplicaciones de los FER's.

Las áreas de aplicación de los FER's son:

- a) Sistemas anti-vibración.
- b) Transmisiones de automóviles.
- c) Robótica y sistemas hidráulicos.

#### 1.4.1.- SISTEMAS DE AMORTIGUAMIENTO.

Las aplicaciones potenciales de los FER's muestran en la industria automotriz una buena cantidad de ejemplos. Existen patentes y prototipos tales como: amortiguadores para automóviles y maquinas anti-vibración. Estos dispositivos constan de un acelerómetro que detecta el nivel de movimiento o de vibración, la señal que envía es convertida por medio de un circuito lógico el cual transmite una señal a una fuente de potencia, ésta aplicará un voltaje a los electrodos análogo a la señal recibida, de tal manera que el FER aumentará sus propiedades viscosas de acuerdo al nivel de vibración del terreno.

#### 1.4.2.- TRANSMISIONES DE AUTOMOVILES.

Los clutches electrorreológicos son aparatos activos en los sistemas de transmisión. Grandes áreas son necesarias para las enormes fuerzas de transmisión haciendo que el clutch esté muchas veces basado en un arreglo de platos intercalados,

frecuentemente en un arreglo de cilindros coaxiales. Esta configuración es generalmente preferida más que la de los platos planos de los clutches convencionales, ya que la separación de los componentes del fluido por la acción centrífuga puede ser controlada o afectar la redispersión, si las partículas dispersadas no pueden ser desplazadas de la abertura.

La forma básica de un clutch electroreológico consiste de dos discos que están dentro de una caja llena de FER, a uno de los discos se le puede aplicar voltaje y el otro está aterrizado de tal forma que cuando el automóvil esta en marcha se energizan los discos y entonces el clutch puede soportar grandes esfuerzos. La ventaja de estos clutch electroreológicos es que evitan la fricción entre los metales y tienen un rápido TR (del orden de milisegundos).

Una forma prometedora en la aplicación del clutch es colocar cuatro clutches en cada llanta del carro para controlar el torque transmitidos a estos.

#### 1.4.3.- ROBOTICA Y SISTEMAS HIDRAULICOS.

Los dispositivos hidráulicos y los de robótica operan bombeando FER a través de una red de válvulas electroreológicas antes de desplazar un pistón o pistones. La válvula electroreológica abarca el espacio entre los electrodos de tal manera que estos pueden ser configurados en distintas direcciones y formas para incrementar el área del

electrodo. El movimiento lineal del FER puede ser controlado ajustando su flujo ya sea por el uso de un sistema de cuatro válvulas Wheatstone o un sistema de dos válvulas que están fuera de balance en sus flujos debido a las diferencias en el área de cada pistón. Las válvulas Wheatstone usan un interruptor en el primer par de válvulas y la diferencia en la caída de presión a través de las últimas (dos válvulas) controlará el golpeteo que será medido por un controlador lineal de carga en movimiento.

El funcionamiento de cualquier válvula electrorreológica es sencillo, el FER es bombeado haciéndolo pasar por dos platos fijos a los cuales se les puede aplicar voltaje, produciendo una fricción entre el FER y los platos debido a los cambios de viscosidad en el FER, por lo que causará una caída de presión para una velocidad de flujo.

Las válvulas electrorreológicas son sencillas, baratas, compactas, no tienen partes móviles y se pueden construir de acuerdo a las necesidades de fuerza.

## BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Halsey Thomas C., "Electrorheological", Science, Vol. 258, 30 de octubre, 1992, pp. 761-766.
- 2.- Martinek Thomas [Y] Klass Donald L., "Electroviscous Fluids. I. Rheological Properties", Journal of Applied Physics, Vol. 38, No. 1, 1967, pp. 67-74.
- 3.- Stangroom J. E., "Electrorheological Fluids", Phy. Technol., Vol. 14, 1983, pp. 290-296.
- 4.- Nava R., Rejón L., Ponce. M. A., Zamudio V., Santos M., Rodríguez J., Viquez S. [Y] Castaño V. M., "Optical Properties of Electrorheological Fluids", Journal American Ceramic Society Proceedings, (1994, en impresión).
- 5.- Hill. J. [Y] Van Steenkiste., "Responce Times of Electrorheological Fluids", American Institute of Physics, Vol. 3, No. 70, 1 de agosto 1991, pp. 1207-1211.
- 6.- Jordan Therese C. [Y] Shaw Montgomery., "Electrorheology", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, Octubre 1989, pp. 849-878.
- 7.- Weiss Keith [Y] Carlson David, "Material Aspects of Electrorheological Systems", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 4, enero, 1993, pp 13-34.
- 8.- Kordonsky V. I., Korobko E. V. [Y] Lasereva T. G., "Electrorheological Polymer-based suspensions", Journal Rheology, Vol. 35, No. 7, octubre 1991, pp. 1427-1439.
- 9.- Treasurer U. Y., Filisko F. E. [Y] Radzilowski L. H., "Polyelectrolytes as Inclosions in Electrorheologically Active Material: Effect of Chemical Characteristics on ER Activity", Journal Rheology, Vol. 35, No. 6, agosto 1991, pp. 1051-1068.

- 10.- Gamota D. R. [Y] Filisko F.E., "Dynamic Mechanical Studies of Electrorheological Material: Moderate Frequencies", *Journal Rheology*, Vol. 35, No. 3, abril 1991, pp. 399-425.
11. Gamota D. R. [Y] Filisko F.E., "High Frequency Dynamic Mechanical Study on a Aluminosilicato Electrorheological Material", *Journal Rheology*, Vol. 35 No. 7, octubre 1991, pp. 1411-1425.
- 12.- McLeish T. C. B., Jordan T. [Y] Shaw M. T., "Viscoelastic Response of Electrorheological Fluids I. Frequency Dependence", *Journal Rheology*, Vol. 35, No. 3, abril 1991, pp. 427-448.
- 13.- Hartsock D. L., Novak R. F. [Y] Research Staff, Ford Motor Company, "ER Fluids Requirements for Automotive Devices", *Journal of Rheology*, Vol. 35, No 7, octubre 1991, pp. 1305-1325.
- 14.- Victor M. Zamudio Rodriguez, "Estudio de propiedades Dieléctricas y Ópticas en Fluidos Electrorreológicos". (Tesis de Licenciatura; San Luis Potosí: UASP, 1995).
- 15.- Block H. [Y] Kelly J. P., "Electro-rheology", *Journal of Physics*, 1988, pp. 1661-1677.

## CAPITULO 2

### REOLOGIA DE LOS FLUIDOS ELECTROREOLOGICOS.

En este capítulo daremos una definición más completa de los Fluidos Electrorreológicos (FER's), asimismo se explicará desde el punto de vista reológico el comportamiento en flujo de los FER's hasta ahora observado, planteando algunos modelos desarrollados para explicar dichos comportamientos.

#### 2.1.- EL CONCEPTO DE FLUIDO ELECTROREOLOGICO.

En 1947 W. M. Winslow [1] observó que cuando se aplicaba un campo eléctrico a suspensiones formadas por partículas suspendidas en un aceite mineral, la suspensión presentaba un incremento en su viscosidad. A este fenómeno se le conoce

como Efecto Electrorreológico (ER), el cual algunos investigadores lo llaman Efecto Winslow en honor a su descubridor. Por otra parte a dicha suspensión se le conoce como "Fluido Electrorreológico".

Los FER's generalmente son suspensiones formadas por partículas polarizables (fase sólida) suspendidas en un fluido dieléctrico (fase líquida), esta fase sólida tiene la característica de ser hidrofílica y la fase líquida es hidrofóbica[2].

Winslow atribuyó el incremento de la viscosidad en la suspensión a la formación de estructuras fibrilares a través del espacio entre los electrodos. Siendo la causa principal de la formación de las fibrilas la orientación de las partículas (En el capítulo III se mencionaran los mecanismos propuestos para explicar la RE). Los incrementos en las viscosidad de los FER's van de 2 hasta 100 veces en magnitud[3,4], dependiendo de la capacidad de polarizabilidad de las partículas y la intensidad del campo eléctrico aplicado.

Los cambios reológicos observados son sorprendentes, ya que la suspensión puede comportarse como un fluido viscoso o llegar a solidificarse cuando se aplican grandes campos eléctricos, llegando a recuperar la fluidez cuando se somete a altos esfuerzos. De forma general se ha podido determinar que los FER's bajo la influencia de un campo eléctrico reológicamente se comporta como un Plástico de Bingham[5,6,7] desviándose de este comportamiento a altas velocidades de corte[8].

## **2.2.- COMPORTAMIENTO VISCOELASTICO DE LOS FER's.**

Los estudios dinámicos que se han hecho para describir el comportamiento reológico de los FER's son diversos llegando a identificar tres zonas reológicas[7]: la región de la Pre-cedencia, Cedencia y la Post-cedencia. Aunque existen estudios[9] que han reportado sólo dos zonas reológicas. En esta sección hablaremos de las tres zonas antes mencionadas.

### **2.2.1.- REGIONES REOLOGICAS.**

El conocimiento de los diferentes comportamientos reológicos que presentan los FER's cuando se someten a esfuerzos nos dá una idea de lo que puede estar pasando a nivel estructural dentro del sistema. Con este fin y de acuerdo a [7] explicaremos en que consiste cada una de las regiones antes mencionadas. Sin embargo, antes de explicar las regiones reológicas es conveniente definir que es la amplitud de deformación (deformación) y frecuencia de deformación, ya que son conceptos que se estaran mencionando a través de este capítulo.

La amplitud de deformación se refiere al número de grados máximo con los que una geometría de un viscosímetro gira pero sin alcanzar los 360 grados, es decir, gira un número de grados indicados y regresa a su origen. La frecuencia de deformación es el número de oscilaciones que tiene una geometría de un viscosímetro a una amplitud de deformación específica.

### 2.2.1.1.- PRE-CEDENCIA.

Esta región puede ser caracterizada en mediciones de esfuerzo constante y en el estado estable, en donde el material está sometido a deformación de corte constante y a velocidad de corte cero, en mediciones dinámicas a muy bajas deformaciones, y en cortos tiempos por respuesta sinusoidal a una deformación sinusoidal, además, en esta región el material produce un ciclo de histeresis elíptico. Esta región puede ser evaluada experimentalmente con un reómetro de esfuerzo constante a esfuerzos debajo del esfuerzo de cedencia y en un instrumento de velocidad de deformación constante a muy bajas velocidades de corte en tiempos pequeños y a bajas amplitudes en instrumentos dinámicos. Esta región puede ser caracterizada por un modelo de corte dependiente del tiempo, un factor de pérdida y un tiempo característico constante o una distribución de tiempos de relajación. Bajo muy pequeñas deformaciones impuestas sinusoidalmente, es claro que el área dentro del ciclo de histeresis incrementa drásticamente y la pendiente del eje mayor de la elipse aumenta con incrementos del campo eléctrico.

### 2.2.1.2.- POST-CEDENCIA.

Esta región es caracterizada en estado estable por el corte continuo del material a una velocidad constante en respuesta a un esfuerzo constante, esto es la respuesta clásica de un líquido. Esto se puede realizar experimentalmente forzando a que el material fluya tal como en un viscosímetro de velocidad de corte constante.

El comportamiento en esta región se caracteriza por una viscosidad aparente, un factor de pérdida y un tiempo característico o una distribución de tiempos de relajación. Es en este modo que los materiales electrorreológicos son más comúnmente estudiados, esto es, como fluidos y es de hecho bien aceptado que la viscosidad crece con un incremento en el campo eléctrico.

### 2.2.1.3.- CEDENCIA.

Esta región es caracterizada en las regiones transitorias de pruebas de corte en estado estable cuando el material empieza a fluir o a deformarse permanentemente, o en mediciones de deformación ciclica en la cual la forma de la respuesta, o función de esfuerzo se desvía de la deformación. La región puede ser identificada por una deformación de cedencia o un esfuerzo de cedencia pero, la definición estricta de ésta se hace ambigua debido a la naturaleza reológica compleja de las regiones de pre y post-cedencia.

### 2.2.2.- TIPOS DE DEFORMACION VISCOELASTICA.

En cada una de las regiones reológicas antes mencionadas se presenta una respuesta típica en los FER's a una amplitud de esfuerzo constante. La respuesta del FER depende del campo eléctrico, amplitud del esfuerzo y la frecuencia. A continuación se explicará el comportamiento típico de la respuesta del esfuerzo observado en un FER[7].

---

### 2.2.2.1.- EFECTO DE LA VARIACION DEL CAMPO ELECTRICO SOBRE EL COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE LOS FER's.

En esta sección describiremos el comportamiento reológico cualitativo de un FER cuando se somete a una deformación sinusoidal.

La descripción corresponde a la variación de la función de respuesta del esfuerzo con respecto al campo, cuando la amplitud y la frecuencia de oscilación se mantienen constantes.

El esfuerzo aplicado tiene una función característica, la cual produce otra para la respuesta del esfuerzo del material sin campo eléctrico, en donde el material responde como viscoso (líquido). En este caso, la función de respuesta del material es una función sinusoidal con un defasamiento de  $90^\circ$  (con respecto a la función del esfuerzo aplicado).

A bajos campos eléctricos la amplitud de la deformación de la respuesta del esfuerzo se incrementará, el ángulo de fase será diferente a  $90^\circ$ , pero la función será esencialmente sinusoidal, aunque una cantidad significativa de agua y las condiciones de la oscilación pueden influir en el ángulo de fase. Este comportamiento es indicativo de que el material tiene una deformación viscoelástica lineal (el FER empieza a tener propiedades de un sólido), en el cual el ángulo de fase del esfuerzo depende de la magnitud del campo eléctrico.

Cuando hay un incremento considerable en el campo eléctrico, la función de respuesta del esfuerzo se desviará de la sinusoidal y se asumirá una función periódica semejante a una función seno con cresta recortadas en la parte superior, indicando la existencia de deformación viscoelástica no-lineal o plástico-viscoelástica (el FER tiene fuertes propiedades de un sólido).

En términos de la reología de estos materiales, este comportamiento es indicativo de que el campo eléctrico induce la transición de materiales de viscoso lineal a viscoelástico lineal y por último a un viscoelástico no lineal o viscoplástico. En otras palabras el campo eléctrico no sólo afecta a la viscosidad aparente como se menciona en la mayoría de las descripciones de las propiedades reológicas de los FER's si no que también altera los mecanismos reológicos por los cuales los FER's pueden ser modelados.

### 2.2.3- PROPIEDADES VISCOELASTICAS.

Para determinar el comportamiento dinámico de un FER se determinan algunos parámetros que a continuación definiremos:

Cuando se aplica una deformación sinusoidal a un material elástico (tendencia a ser sólido) resulta un esfuerzo el cual está en fase con la deformación, mientras que en un material viscoso (tendencia a ser líquido) produce un esfuerzo  $90^\circ$  fuera de fase.

Un material viscoelástico produce un esfuerzo con ambas fases, una está en fase y la otra fuera. Los materiales viscoelásticos son descritos por un modulo

dinámico complejo:

$$G^* = G' + iG'' \quad (2.1)$$

donde;

$G^*$  = Modulo complejo.

$G'$  = Modulo de Almacenamiento (en fase) o modulo elástico.

$G''$  = Modulo de pérdida (fuera de fase) o modulo viscoso.

## 2.3.- MODELOS REOLOGICOS DEL FENOMENO ELECTROREOLOGICO.

El establecer el comportamiento reológico de un FER a través de un modelo nos permite conocer el comportamiento de dichos materiales bajo condiciones de flujo que en forma experimental no podríamos determinar, además nos ayuda a establecer las condiciones y/o eficiencia para una aplicación específica. Por tales razones en esta sección describiremos los modelos reológicos hasta ahora desarrollados.

### 2.3.1.- MODELO DE BINGHAM.

Los fluidos que tienen un comportamiento reológico similar al de un Plástico de Bingham no muestran una alteración en su viscosidad con el tiempo, es decir, son fluidos en estado estacionario. Estos materiales se caracterizan por presentar:

- a) Un esfuerzo de cedencia ( $\tau_y$ ) que es el esfuerzo que tiene que ser excedido para que empiecen a fluir.
- b) Una viscosidad plástica ( $\mu_p$ ) que es la pendiente de la recta A (ver figura 2.1).

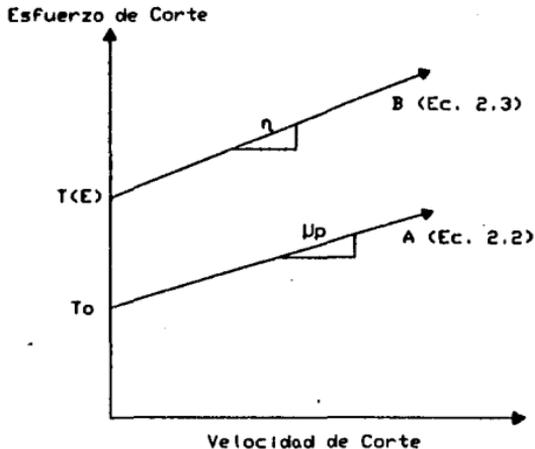


FIG. 2.1.-Curvas de esfuerzo de corte vs velocidad de corte del modelo de Plástico de Bingham y del comportamiento reológico de los FER's.

En el modelo Plástico de Bingham es necesario un esfuerzo inicial ( $\tau_0$ ) para que un material comience a fluir, posteriormente habrá una relación lineal entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte. La ecuación de un Plástico de Bingham se muestra en la ecuación 2.2[10].

$$\tau_v = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma \quad (2.2)$$

donde;

$\tau_v$  = Esfuerzo de Corte.

$\tau_0$  = Esfuerzo de Cedencia.

$\mu_p$  = Viscosidad plástica.

$\gamma$  = Velocidad de corte.

Se ha observado que un FER bajo la influencia de un campo eléctrico, reológicamente se comporta como un Plástico de Bingham, dado por la ecuación 2.3[5,6,7]. Para este caso la ecuación 2.2. se transforma en:

$$\tau_y = \tau(E) + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

donde;

$\tau_y$  = Esfuerzo de Corte.

$\tau(E)$  = Esfuerzo de Cedencia en función del campo eléctrico.

$\eta$  = Viscosidad aparente de la suspensión electricada.

Como se puede observar en la figura 2.1, la diferencia entre las ecuaciones 2.2 y 2.3 es que el esfuerzo de cedencia para un FER  $\tau(E)$ , varía de acuerdo con la intensidad del campo eléctrico aplicado a la suspensión mientras que para el modelo reológico de Plástico Bingham permanecerá constante.

El esfuerzo de cedencia de los FER's se ha analizado más profundamente y se ha llegado a observar dos tipos[9,11]. El primero de éstos es el esfuerzo de cedencia dinámico  $\tau_{(v,d)}$  comúnmente conocido como el esfuerzo de cedencia  $\tau(E)$  (ver figura 2.2). El cual se define como el punto donde ocurre la intercepción del esfuerzo de corte con la velocidad cero.

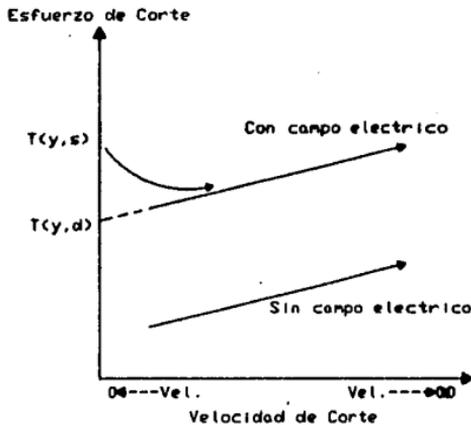


FIG. 2.2.-Curvas de esfuerzo de corte vs velocidad de corte del comportamiento reológico de los FER's a velocidades de corte bajas y altas.

El segundo esfuerzo es el **esfuerzo de cedencia estático**  $\tau_{(y,s)}$  el cual se define como el esfuerzo necesario para iniciar el flujo prescindiendo de si el modelo de Bingham describe precisamente el comportamiento del material. Aunque claro está, el FER presenta la viscosidad plástica en el régimen de la post-cedencia. El esfuerzo de cedencia estático se presenta a muy bajas velocidades de corte y el modelo de flujo de esta curva no es lineal[6,9,11]

Los científicos han reportado que el valor de cedencia estático es más alto que el dinámico[6,9,11]. Este fenómeno es conocido como "Defasamiento" y no está completamente claro. Se sabe que el esfuerzo de cedencia estático es una anomalía estructural o mecánica el cual es altamente dependiente del tamaño y la forma de la partícula, de la historia del flujo y del campo eléctrico.

### 2.3.2.- MODELO DE ZONA CORTANTE.

La ecuación de Bingham provee una correlación exitosa y predice la respuesta de corte continuo de las suspensiones. Sin embargo, tiene dos limitaciones[8]:

- 1.- Es incapaz de describir la persistencia (observada) de estructuras a bajas velocidades de corte.
- 2.- La ecuación de Bingham es una relación que es incapaz de predecir una respuesta dinámica en los FER's.

El procedimiento para cubrir estas limitaciones fue el desarrollar un modelo continuo basado en observaciones de las estructuras de la suspensión.

Kllingenber y Zukoski[8] observaron que al aplicar un campo eléctrico a la suspensión se formaban estructuras fibrilares seguidas de un rearreglo de estas con el tiempo. Cuando la velocidad de corte era menor que un valor crítico las fibrillas estaban intactas y cuando se excedía de dicha velocidad las fibrillas de la suspensión se rompían en un intervalo de velocidad.

A bajas velocidades de corte la fibrila rota se movía con el plato superior (electrodo en movimiento) pero era capturada posteriormente por la fibrila adherida al plato inferior (electrodo estático), de esta manera se mantenía formada la fibrila en los electrodos.

A velocidades moderadas la masa fibrilar se adhería al electrodo inferior pero con fibrillas menos uniformes y definidas. Una capa más delgada se adhería al electrodo superior de tal manera que se distinguía una región fluida entre los

electrodos. El corte ocurrido en esta zona creaba una velocidad cortante que no era uniforme a través de la abertura del electrodo. Mientras que el campo eléctrico originaba que se rompiera la estructura cerca del electrodo base (estático) surgiendo un mecanismo de electroforesis (movimiento de partículas hacia un electrodo).

En este mismo trabajo, Klingenberg y Zukoski observaron que a altas velocidades una masa de partículas quedaba estacionaria y las estructuras fibrilares de esta región se inclinaban en dirección al flujo. Este comportamiento les sugirió que la estructura era capaz de soportar un esfuerzo y que se comportaba como un sólido elástico. En la medida que la velocidad de corte se incrementaba la región sólida disminuía. Finalmente, indicaron que el rearrreglo de la región sólida en suspensiones con una fracción volumen disminuye cuando son electrificadas y sujetas a una deformación continua, dando origen a una compactación de partículas que posteriormente serán estructuras que estarán estáticas en la suspensión. Como resultado de esta compactación la región que soporta la deformación contiene pocas partículas. Klingenberg y Zukoski dicen que este tipo de comportamiento se presenta en las suspensiones que exhiben una RE.

A continuación se hará un breve resumen del análisis cualitativo del modelo de Zona Cortante propuesto por Klingenberg y Zukoski en 1989[8]. Ellos consideraron que la fuerza eléctrica dominará en la región sólida y la fuerza hidrodinámica dominará en la región líquida. El tamaño relativo de estas regiones es determinada al realizar el balance de fuerzas sobre las partículas cerca de la interfase (ver figura 2.3). En el espacio que comprende la región líquida, la velocidad de corte será más grande que la velocidad de corte aparente por un factor  $(L/\Delta)$ . La posición de la interfase sólida/líquida se determinará por un balance de fuerzas cortantes con las fuerzas de polarización que mantienen en esta región a las partículas en ese lugar.

---

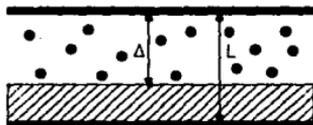


FIG. 2.3.-Representación esquemática de las regiones sólida (rayada) y líquida (esferas) de la suspensión cuando está entre los electrodos.

La fuerza eléctrica sobre las partículas estará dado por:

$$F_E = 12\pi \epsilon_0 \epsilon_c a^2 \beta^2 E_0^2 \quad (2.4)$$

donde;

$F_E$  = Fuerza eléctrica sobre las partículas.

$\epsilon_0$  = Permitividad del espacio libre.

$\epsilon_c$  = Constante dieléctrica de la fase líquida.

$a$  = Tamaño de partícula.

$\beta$  = Polarización relativa de las partículas.

$E_0$  = Magnitud del campo eléctrico aplicado.

y la fuerza viscosa sobre una partícula cerca de la interfase por:

$$F_H = 6\pi\eta_0 a^2 \gamma \left(\frac{L}{\Delta}\right) \quad (2.5)$$

donde;

$F_H$  = Fuerza viscosa sobre las partículas.

$\eta_0$  = Viscosidad de la suspensión a una velocidad de corte alta en ausencia de campo eléctrico.

$L$  = Espacio entre los electrodos.

$\Delta$  = Espacio de la fase líquida.

$\gamma$  = Velocidad de corte.

Klingenberg y Zukoski definieron el número  $M$ ,

$$M = \frac{\eta_0 \gamma \left(\frac{L}{\Delta}\right)}{2\epsilon_0 \epsilon_r \beta^2 E_0^2} = \frac{F_{zas Viscosas}}{F_{zas Electricas}} \quad (2.6)$$

donde;

$M$  = Relación de fuerzas viscosas y eléctricas.

que caracteriza la importancia relativa de las fuerzas eléctricas e hidrodinámicas. Cuando las regiones sólida y líquidas coexistan, las fuerzas eléctricas e hidrodinámicas deben balancearse y  $M$  es igual a cero. Por lo tanto, a un potencial de campo fijo y si la velocidad de corte se incrementa,  $(L/\Delta)$  debe disminuir para mantener a  $M$  igual a cero. Lo que implica que la región líquida se expandirá y la sólida disminuirá con incrementos de la velocidad de corte.

Cuando  $(L/\Delta)$  se aproxime a 1, la región sólida es degradada. En este límite, se asume que no hay efectos eléctricos en la región líquida y la expansión llega a ser newtoniana.

En el límite cuando  $(L/\Delta)$  se aproxima a  $(L/a)$ , la velocidad de corte aparente se aproxima a cero y la estructura sólida comienza a ocupar enteramente la abertura del electrodo. Bajo estas condiciones, el modelo podría desecharse dado que se habían asumido dos regiones distintas. Sin embargo, el modelo es capaz de predecir el esfuerzo de cedencia. A continuación mostramos la ecuación de cedencia del modelo de Zona Cortante[8]:

$$\tau_o = \left(\frac{4}{3}\right) a E_o^b \phi_o^r \quad (2.7)$$

donde;

- $b$  = Constante independiente del campo eléctrico (E) y la fracción volumen ( $\phi$ ).
- $r$  = Constante independiente del campo eléctrico (E) y la fracción volumen ( $\phi$ ).
- $\phi_o$  = Fracción volumen en el centro de la abertura del electrodo.

Antes de dar el modelo de Zona Cortante definiremos el Número de Mason[1,5,8]:

$$Mn = \frac{\eta_c \gamma}{2 \epsilon_o \epsilon_c \beta^2 E_o^2} \quad (2.8)$$

donde;

- $Mn$  = Número de Mason.
- $\eta_c$  = Viscosidad de la fase líquida.

El número de Mason es una medida de la importancia relativa de las fuerzas de corte viscosas y las de polarización que actúan sobre las partículas de la suspensión.

El modelo de Zona Cortante puede ser expresado en términos de viscosidad relativa ( $\eta/\eta_\infty$ ), como una función implícita del número de Mason  $Mn[B]$ .

$$\frac{\eta}{\eta_\infty} = 2 + \left( \frac{1}{B} \left[ \left( \frac{\eta}{\eta_\infty} + \frac{Mn}{g(\phi, E_e)} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right)^{\frac{-1}{n}} \quad (2.9)$$

donde;

$\eta$  = Viscosidad aparente de la suspensión electrificada.

$B$  = Constante de la suspensión.

$n$  = Constante de la suspensión.

$\phi$  = Fracción volumen de la suspensión.

$$g(\phi, E_e) = \phi^{(1.5+0.6)} \quad (2.9.1)$$

$g(\phi, E_e)$  = Factor función de la fracción volumen de la suspensión y del campo eléctrico aplicado.

### 2.3.3.- COMPARACION ENTRE EL MODELO DE BINGHAM Y EL DE LA ZONA CORTANTE.

El modelo de Bingham predice inferiormente el esfuerzo en la transición de velocidades (de corte) de bajas a altas debido a la incapacidad de predecir la persistencia de estructuras a bajas velocidades de corte. Sin embargo, a pesar de usar pocos parámetros, el modelo de Bingham provee un muy aceptable ajuste de datos.

La concordancia de los dos modelos de Bingham y el de Zona Cortante dentro de dos límites de velocidades sugieren que después de la ruptura de las estructuras polarizadas los restos de éstas sólo tienen un pequeño efecto en la respuesta reológica de la suspensión. Así que los detalles de la estructura de la suspensión tienen un pequeño impacto sobre las propiedades de flujo de deformación continua.

#### 2.3.4.- MODELO DE LA GOTA.

Este modelo fue propuesto por Halsey, Martin y Adolf en 1992[1,12], considera una gota condensada de partículas polares, en donde un flujo cortante tenderá a rotarla en una región y un campo eléctrico ejercerá un torque (que es un producto de la magnitud de la fuerza por la distancia perpendicular desde el centro de rotación hasta la línea de acción) restablecedor que lo lleve a una posición paralela al campo (ver figura 2.4). Del balance del torque hidrodinámico y eléctrico se obtendrá un ángulo característico entre el eje longitudinal de la gota y el campo eléctrico sin importar el tamaño de la gota.

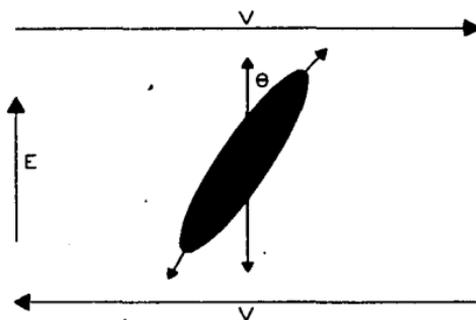


FIG. 2.4.-Una gota dieléctrica será rotada por un flujo cortante. Su ángulo de equilibrio ( $\theta$ ) será determinado por un balance de fuerzas entre el campo eléctrico y el torque hidrodinámico.

Este ángulo característico se incrementa con el tamaño de la gota porque llega a ser más difícil para ésta permanecer vertical con respecto al campo cuando se incrementa la velocidad de corte.

Si la gota es orientada en un ángulo demasiado grande con respecto al campo le resultara desventajoso formarse ya que su energía de polarización no es suficientemente grande.

Existe un tamaño de gota que minimiza la energía de polarización. Las gotas en un flujo cortante son constantemente cortadas una con respecto a otra, en el proceso

las gotas chocan y se aglomeran de manera continua. Se puede considerar que la colisión de dos gotas, ambas más pequeñas que un tamaño característico tenderá a establecer la formación de gotas de mayor tamaño, mientras que gotas de mayor tamaño tenderán a romperse en otras menores.

Las gotas formaran cadenas que se harán más pequeñas cuando la velocidad cortante se incremente ya que éstas tendrán menor área de superficie que una grande. Las fuerzas viscosas rotaran a muchas cadenas en un ángulo mayor al que las partículas se atraen y ocasionará que las cadenas se rompan. Estas cadenas relativamente cortas incrementaran drásticamente la viscosidad del fluido[12].

En el modelo de la gota el número de Mason determinará el ángulo de éstas con respecto al campo así como su tamaño característico. El ángulo con respecto al campo estará dado por[12]:

$$\theta = Mn \left(\frac{1}{3}\right) \quad (2.11)$$

donde;

$\theta$  = Angulo de la partícula con respecto al campo.

y la longitud de la gota por:

$$\frac{\Omega}{r_d} = Mn^{-1} \quad (2.12)$$

donde;

$\Omega$  = Longitud de las gotas.

$r_d$  = Radio de las partículas.

La viscosidad de la suspensión será una función de  $Mn$  y la viscosidad del solvente. La ecuación estará dada por[12]:

$$\eta = \phi_p \eta_c M n^{(-\frac{2}{3})} \quad (2.13)$$

donde;

$\phi_p$  = Fracción volumen de las partículas.

#### 2.4.- DISEÑO DE UN FER.

Los FER's necesitan cumplir con un mínimo de características para que tengan factibilidad de comercialización y para que cumpla con los requisitos que le demande el dispositivo donde se pretende usar. La fase sólida y líquida del FER deben de tener ciertas características para que contribuyan a la factibilidad de comercialización de la suspensión.

##### 2.4.1.- REQUERIMIENTOS MINIMOS DE LA FASE SOLIDA.

Los límites del tamaño de partícula no estas definidos con claridad. Ya que si se tienen partículas muy pequeñas surge el movimiento browniano (choques producidos por las moléculas del fluido y las partículas suspendidas ocasionados por movimientos térmicos del primero) el cual compite con las fuerzas eléctricas, pero si

---

se tienen partículas grandes responderán lentamente al campo eléctrico y tenderán a sedimentarse ya sea por los campos centrífugos o gravitacionales dando como conveniencia el empleo de fluidos (fase líquida) con altas viscosidades.

A continuación mencionaremos las características mínimas que se recomienda deben cumplir la fase sólida[5,13]:

- \*Debe ser hidrofílica.
- \*Porosa.
- \*Tamaño de partícula de 0.04 a 50  $\mu\text{m}$ .
- \*Densidad relativa de aproximadamente 1.4.

#### 2.4.2.- REQUERIMIENTOS MINIMOS DE LA FASE LIQUIDA.

La teoría de la actividad electrorreológica es precedida por un sistema bifásico en donde existe una diferencia sustancial entre la fase sólida y la líquida. En la práctica la fase líquida es casi siempre el componente de baja constante dieléctrica y generalmente es un aceite aislante. La baja conductividad de la fase líquida es deseable para reducir el consumo de voltaje.

A continuación mostramos las características mínimas que debe de cumplir la fase líquida[5,13]:

- \*Aislante.
- \*Baja constante dieléctrica.
- \*Conductividad baja.
- \*Densidad alta.
- \*Alto punto de ebullición.
- \*Bajo punto de congelación.
- \*Baja viscosidad.

Además la fase líquida debe ser químicamente estable al contacto con las partículas y campo eléctrico.

#### 2.4.3.- REQUERIMIENTOS DEL FER PARA ALTA FACTIBILIDAD DE USO.

Las características mínimas deseables en los FER's se muestran en la tabla 2.1. Los FER's deben garantizar la seguridad de su empleo teniendo un mínimo de toxicidad, debe ser estable, durable y asegurar una confiabilidad alta del dispositivo. El FER debe tener una abrasión baja, no ser corrosivo y ser compatible con materiales de sellado estándar. El FER debe tener propiedades constantes con poca tendencia a cambiar con el uso o almacenamiento[14].

TABLA 2.1. Requerimientos probables para que un FER opere comercialmente[6,9,11,14,15].

REQUISITOS	COMENTARIO
Reproducibilidad de propiedades.	Características constantes con poca tendencia a cambiar con el uso u almacenamiento.
Demanda de baja potencia eléctrica bajo condiciones de trabajo.	Densidad de corriente a bajo de $100\mu\text{Acm}^{-2}$ a $1\text{ kVmm}^{-1}$ y una disipación eléctrica de $1\text{ Wcm}^{-3}$ .
Tiempo de respuesta rápida.	Del orden de milisegundos.
Intervalo de temperatura de operación.	La industria automotriz requiere de $-40$ a $200^\circ\text{C}$ .
Baja viscosidad en campo cero.	Particularmente para amortiguadores , con una meta de $25\text{ mPa}\cdot\text{s}$ .
Potencia dieléctrica alta.	Requiera que soporte varios $\text{kVmm}^{-1}$ .
Ausencia de electroforesis.	Si se presenta destruiría la dispersión bajo campo.
Ausencia de sedimentación o coagulación.	Se necesita una densidad similar entre las fases, estabilidad estérica, la agitación del fluido puede ser necesaria mientras el aparato está activo.
No-abrasivo.	Podría causar que no fuera aceptable su uso.
Gran estabilidad.	Almacenado por varios años, necesita evitar la sedimentación o al menos tiene que redispersarlo por medio de la agitación.
Ecológico.	No tóxico y ser desechable fácilmente, sin riesgo de fuego.
Bajo costo.	Para competir con otras alternativas tecnológicas.
Esfuerzo de cedencia dinámico a $4.0\text{ kV mm}^{-1}$ .	Mayor a $3.0\text{ kPa}$ .

## NOMENCLATURA.

- $\epsilon_0$  = Permitividad del espacio libre.  
 $\epsilon_c$  = Constante dieléctrica de la fase líquida.  
 $\epsilon_p$  = Constante dieléctrica de las partículas.  
 $\beta$  = Polarización relativa de las partículas libres.  
 $E_0$  = Magnitud del campo eléctrico aplicado.  
 $\eta_{\infty}$  = Viscosidad de la suspensión a una velocidad de corte alta en ausencia de campo eléctrico.  
 $\eta_c$  = Viscosidad de la fase líquida.  
 $\eta$  = Viscosidad aparente de la suspensión electrificada.  
 $\gamma$  = Velocidad de corte.  
 $\tau(E) = \tau_0 = \tau_y$  = Esfuerzo de cedencia inducido por el campo eléctrico.  
 $\tau_{(y,d)}$  = Esfuerzo de cedencia dinámico.  
 $\tau_{(y,s)}$  = Esfuerzo de cedencia estático.  
 $L$  = Espacio entre los electrodos.  
 $\Delta$  = Espacio de la fase líquida.  
 $a$  = Tamaño de partícula.  
 $b$  = Constante independiente del campo eléctrico (E) y la fracción volumen ( $\phi$ ).  
 $r$  = Constante independiente del campo eléctrico (E) y la fracción volumen ( $\phi$ ).  
 $B$  = Constante de la suspensión.  
 $n$  = Constante de la suspensión.  
 $\phi_p$  = Fracción volumen de las partículas.  
 $\phi$  = Fracción volumen de la suspensión.  
 $\phi_0$  = Fracción volumen en el centro de la abertura del electrodo.  
 $F_E$  = Fuerza eléctrica sobre las partículas.

$F_H$  = Fuerza viscosa sobre las partículas.

$G^*$  = Modulo Complejo.

$G'$  = Modulo de Almacenamiento (en fase) o modulo elástico.

$G''$  = Modulo de Perdida (fuera de fase) o modulo viscoso.

$Mn$  = Número de Mason.

$M$  = Relación de fuerzas viscosas y eléctricas.

$\mu_p$  = Viscosidad plástica.

$\theta$  = Angulo de la partícula con respecto al campo.

$r_d$  = Radio de las partículas.

$\Omega$  = Longitud de las gotas.

$g(\phi, E_o)$  = Factor función de la fracción volumen de la suspensión y del campo eléctrico aplicado.

## BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Halsey Thomas C., "Electrorheological Fluids", Science, Vol. 258, 30 de octubre, 1992, pp. 161-766.
- 2.- Hill John C. [Y] Van Steekiste, "Responce Times of Electrorheological Fluids", American Institute of Physics, Vol. 3, No. 70, 1 de agosto, 1991, pp. 1207-1211.
- 3.- Endo Shigeki., Patente EP445594 (Bridgestone Co. 1990).
- 4.- Nobel T. M. Cipriano., Patente US5032308 (Dow Chemical Co. 1989).
- 5.- Jordan Therese C. [Y] Shaw Montgomery., "Electrorheology", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.24, No. 5, octubre, 1989, pp. 849-878.
- 6.- Blackwood K. M. [Y] Block H., "Semi-conducting Polymers in Electrorheology: A Modern Approach to Smart Fluids", TRIP, Vol. 1, No. 4, abril, 1993, pp. 98-105.
- 7.- Gamota D. R. [Y] Filisko F. E. "Dynamic Mechanical Studies of Electrorheological Material: Moderate frequencies", The Society of Rheology, Vol. 3, No. 5, abril, 1991, pp. 399-425.
- 8.- Klingenberg D. J. [Y] Zukoski C. F., "Studies on the Steady-shear Behavior of Electrorheological Suspensions", Langmuir, Vol. 6, No. 1, 1990, pp. 15-24.
- 9.- Weiss Keith. D. [Y] Carlson David J., "Material Aspects of Electrorheological Systems", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 4, enero, 1993, pp. 13-34.
- 10.- Hughes William F, Dinamica de Fluidos, (McGraw-Hill, EDO de México: 1970) pp. 232-233.
- 11.- Block H. [Y] Kelly J. P., "Electro-rheology", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 21, 1988, pp. 1661-1677.

- 12.- Halsey Thomas C. [Y] Martin James E., "Electrorheological Fluids", *Scientific American*, octubre, 1993, pp. 42-48.
- 13.- Stangroom J. E., "Electrorheological Fluids", *The Institute of Physics: Physics Technology*, Vol. 14, 1983, pp. 290-296.
- 14.- Hartsock D. L., Novak R.F. [Y] Research Staff, Ford Motor Company., "ER fluid requirements for Automotive Devices", *The Society of Rheology*, Vol. 35, No. 7, octubre, 1991, pp. 1305-1325.
- 15.- Webb Nigel, "Electrorheological Fluids", *Chemistry in Britain*, abril, 1990 pp. 338-340.

## CAPITULO 3

### CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LOS FER.

En este capítulo se explicarán las estructuras microscópicas que se han observado en los Fluidos Electrorreológicos (FER's) y posteriormente se analizarán algunos de los mecanismos propuestos hasta ahora para explicar el fenómeno electrorreológico.

#### 3.1.- ESTRUCTURAS OBSERVADAS EN FER's.

Se han observado diversos tipos de estructuras en los fluidos electrorreológicos (FER's) las cuales dependen en gran parte de la fracción volumen de las partículas, por lo que a los FER's se les ha llegado a clasificar como suspensiones diluidas, moderadamente concentradas y con concentración intermedia. Sin embargo, no existe

un valor específico de concentración que nos pudiera indicar a que clasificación pertenece un Fluido Electroreológico (FER). Para mayor facilidad en el entendimiento emplearemos el termino de concentración para referirnos a la fracción volumen de las partículas contenidas en la suspensión.

### 3.1.1.- SUSPENSIONES DILUIDAS.

Cuando a un FER se le aplica un campo eléctrico las partículas suspendidas tienden a unirse formando cadenas alineadas en forma paralela al campo eléctrico empleado. A estas cadenas se les conoce como fibrilas. La longitud de tales fibrilas dependerá del tamaño de las partículas, la fuerza dipolar y la concentración de ellas en la suspensión.

En suspensiones diluidas las partículas forman fibrilas delgadas que tienen como característica notable el que su longitud llega a ser comparable a la abertura entre los electrodos[1]. En el FER se exhibirá una respuesta reológica de acuerdo con el crecimiento y número de las fibrilas.

Otra observación importante, es que al mismo tiempo que se forman las fibrilas, partículas individuales se mueven de un electrodo a otro ó a otra partícula adyacente. Esta vibración natural a lo largo de las líneas de fuerza del campo se le llama oscilación de las partículas[2]. Cuando la velocidad de corte rompe las fibrilas, la oscilación activa de las partículas colabora a la formación de nuevas fibrilas. A altas velocidad de corte sólo se observan oscilaciones de partículas.

### 3.1.2- SUSPENSIONES MODERADAMENTE CONCENTRADAS.

En suspensiones moderadamente concentradas la tendencia a formar delgadas fibrilas no es posible por el aglomeramiento de partículas. Se han hecho estudios[1] en donde se observa que una suspensión a bajas concentraciones muestra una alta tendencia a alinearse al campo aplicado y una baja tendencia a crecer (formación de delgadas fibrilas) y a concentraciones moderadas se presenta una alta tendencia de alineamiento con el campo aplicado y puede crecer lateralmente (formación de fibrilas gruesas).

### 3.1.3.- SUSPENSIONES CON UNA CONCENTRACION INTERMEDIA.

En concentraciones intermedias las fibrilas están frecuentemente más gruesas en los electrodos que en el centro de la abertura. La presencia de fibrilas es clara, aunque no siempre son lineales y frecuentemente presentan ramales, es decir, que hay fibrilas que salen de un electrodo y tienen como extremo final a otra fibrila por lo que éstas no alcanzan el otro extremo del electrodo. Sin embargo, se cree que esta fibrilación parcial contribuye al incremento de la viscosidad.

### **3.1.4.- CAMBIOS EN LA ESTRUCTURA OCASIONADO POR EL TIPO DE CORRIENTE APLICADA.**

Cuando un FER es expuesto a una excitación por corriente directa (c.d) el movimiento de partículas es medianamente lineal (con formación de fibrilas), sin embargo, una excitación producida por corriente alterna hace que las mayoría de las partículas oscilen (en los electrodos) a 60 Hz, lo cual parece disminuir la formación de fibrilas largas y dá lugar a que las partículas se adhieran a los electrodos. Este tipo de dispersión se presenta principalmente a concentraciones diluidas[3].

### **3.2.- CAMBIOS ESTRUCTURALES DEBIDO A FLUJO.**

A continuación explicaremos el efecto que se produce en la estructura del FER al aplicar una deformación.

#### **3.2.1.- DISTORSION DE LAS PARTICULAS ALINEADAS.**

Cuando se aplica una deformación a las fibrilas, frecuentemente ocurre una ruptura de éstas. La distorsión o ruptura de la estructura inducida por el campo eléctrico gastara cierta energía, la cual producirá un incremento en la viscosidad y del modulo complejo en la suspensión.

Jordan y Montgomery[4] analizaron tres diferentes FER's comerciales y definieron el proceso de fibrilación de estos. Llegando a ciertas conclusiones sobre el comportamiento estructural de los materiales cuando éstos se sometieron a una deformación. Las conclusiones fueron:

- a) La degradación de las fibrilas no es permanente, debido a que la suspensión mantiene su capacidad de fibrilarse en un campo eléctrico cuando se elimina la deformación.
  
- b) Existe un estado continuo entre la reformación y destrucción de las estructuras a una deformación continua y bajo la influencia de un campo eléctrico.

### **3.3.- TIPOS DE MATERIALES EMPLEADOS EN FER's.**

Ahora hablaremos un poco acerca del tipo de materiales comúnmente empleados en formulaciones de los FER's. Iniciaremos con la fase líquida y posteriormente con la fase sólida de los FER's.

#### **3.3.1.- MATERIALES EMPLEADOS EN LA FASE LIQUIDA.**

La fase líquida de los FER's tienen como papel principal el de ser un aislante (normalmente aceites) para la sólida. Así que un FER debe de tener una fase líquida

con buenas características aislantes. Los plastificantes cumplen bien ésta propiedad. Dado que en nuestro estudio emplearemos algunos de ellos, daremos una breve definición y explicación.

Un plastificante es una sustancia de baja o despreciable volatilidad, alto punto de ebullición, de muy variado peso molecular (los plastificantes esteres tienen un bajo peso molecular de entre 300 a 500  $\text{gmol}^{-1}$  y los poliesteres un peso superior a 8000), propiedades aislante variables (ver el punto 4.2) y es bastante compatible cuando se incorpora a otros polímeros (resinas). Esta compatibilidad da como resultado el mejoramiento de la procesabilidad, pero su papel principal es el de impartir al producto final flexibilidad, procesabilidad y resistencia al impacto[5]. Los plastificantes tienen diferentes clasificaciones las cuales no daremos ya que no es el objetivo de este trabajo.

### 3.3.2.- MATERIALES EMPLEADOS COMO FASE SOLIDA.

La fase sólida utilizada en los FER's debe de cumplir algunos requisitos tales como ser hidrofílica y porosa. A continuación se mencionaran algunos parámetros de la partícula que contribuyen a un aumento en la Respuesta Electroreológica (RE).

#### 3.3.2.1.- TAMAÑO DE PARTICULA.

Los tamaños de partícula van desde 0.04 a 50 micrometros. Sin embargo, un tamaño de partícula muy pequeño dá origen al movimiento browniano que tenderá a

competir con las fuerzas eléctricas que inducen la RE. Las partículas de gran tamaño (mayores a 50  $\mu\text{m}$ ) reponderan lentamente a un campo eléctrico, y estarán propensas a sedimentarse ya sea por campos gravitacionales o centrífugos[6].

### 3.3.2.2.- NATURALEZA QUIMICA.

El efecto de la naturaleza química de la fase sólida está íntimamente relacionada con el comportamiento de los aditivos tales como el agua. Dado que la mayoría de los FER's contienen agua, el papel de la partícula debe incluir la retención de agua y proveer los iones móviles necesarios. Los materiales empleados como fase sólida en sistemas activados con agua son la sílica, minerales de arcilla, resinas de intercambio iónico, etc. En años recientes se han utilizado polielectrolitos[7,8] ya que tienen la propiedad de una alta polarización y han mostrado una mejor RE (ver también capítulo 1 páginas 10-11).

### 3.4.- FENOMENO DE POLARIZACION.

Las moléculas presentan propiedades eléctricas, como una consecuencia de su estructura. Una molécula está constituida por núcleos atómicos cargados positivamente y por electrones cargados negativamente. Esto da origen a diversas propiedades como la polarización.

La polarización de una molécula aislada se produce de forma tal que los electrones experimentan un desplazamiento muy pequeño en contra de la dirección de las líneas de fuerzas eléctricas (cargadas negativamente) mientras que el núcleo atómico experimentará un desplazamiento en el sentido de las líneas de fuerza, los desplazamientos son ocasionados por la repulsión de cargas que se producen en la molécula. A este fenómeno se le llama polarización[9].

Este fenómeno está presente en diferentes direcciones de una molécula y por ello cuando el campo actúa sobre un conjunto numeroso de moléculas no orientadas, tal como se encuentran en estado líquido o gaseoso, se obtiene un valor de polarización (de todas las moléculas) medio que puede calcularse a partir de la constante dieléctrica medida experimentalmente.

Al analizar más detalladamente la polarización molecular, se distinguen tres diferentes tipos[10]: la polarización electrónica, atómica y orientacional.

a) La polarización electrónica se produce cuando el campo eléctrico causa un ligero desplazamiento de los electrones de cualquier átomo con respecto al núcleo positivo. El desplazamiento es débil porque el campo eléctrico aplicado externamente rara vez excede  $10^8 \text{ Vm}^{-1}$  mientras que el campo intra atómico entre el electrón y el núcleo es de  $10^{11} \text{ Vm}^{-1}$ .

b) La polarización atómica se produce cuando el campo eléctrico distorsiona el arreglo del núcleo atómico en una molécula. El movimiento del núcleo pesado es más lento que la de los electrones y también involucra cambios en los enlaces, los que contribuyen principalmente a la polarización atómica. La magnitud de esta polarización generalmente es más pequeña que la electrónica, frecuentemente es un décimo de está.

c) La polarización orientacional. Si las moléculas poseen momentos dipolares permanentes, existe una tendencia para que éstas se alineen al campo aplicado dando lugar a una polarización neta en esa dirección. La orientación de los dipolos moleculares pueden tener una contribución muy grande pero se desarrolla lentamente.

La orientación de los dipolos moleculares es un proceso relativamente lento si se compara con las transiciones electrónicas o vibraciones moleculares las cuales tienen frecuencias generalmente arriba de  $10^{12}$  Hz. Además, no consiste en un cambio uniforme de todas las moléculas, es un ajuste lento de su orientación promedio de las superficies. Se necesita tiempo suficiente en la aplicación de un campo eléctrico para que la orientación alcance el equilibrio de polarización máxima del material. Si se deja un tiempo amplio la aplicación de

un campo eléctrico, entonces se observaría una constante dieléctrica la cual se llamará constante dieléctrica estática. Por otro lado, si la polarización es medida inmediatamente después de que el campo es aplicado, implicará que no hay tiempo suficiente para que la orientación dipolar se presente, entonces se producirá una constante dieléctrica instantánea, esta será menor debido sólo a efectos deformacionales.

### **3.5.- MECANISMOS DEL FENOMENO ELECTROREOLOGICO.**

Las partículas presentes en los FER's tienen una permitividad (constante dieléctrica) diferente a la de la fase líquida, ocasionando que cuando el fluido este expuesto a un campo eléctrico uniforme, la fase sólida (partículas) llegue a polarizarse. A continuación se mencionaran algunos de los mecanismos propuestos para explicar el fenómeno electroreológico.

#### **3.5.1.- TEORIA DE LA DOBLE CAPA.**

En el trabajo reportado por D. L. Klass y T. W. Martinek[11] en 1967, atribuyen el fenómeno electroreológico a la polarización de la doble capa (una positiva y otra negativa) circundante de cada partícula (ver figura 3.1). Las interacciones electrostáticas resultantes de la distorsión de la doble capa requiere de la disipación de energía que se manifiesta en sí mismo como la Respuesta Electroreológica (RE).

Teoría de la doble capa

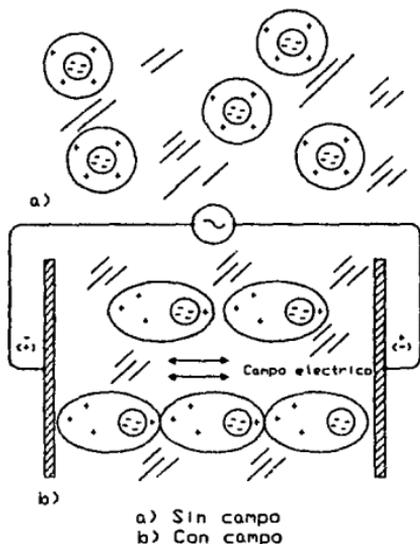


FIG. 3.1-Teoría de la doble capa propuesta por Klase y Martinek para explicar el fenómeno electroreológico.

Esta doble capa la definieron como la distribución asimétrica de carga causado por la influencia del campo externo. En general, la aplicación de un campo eléctrico causa el movimiento de la doble capa circundante de cada partícula en la dirección del electrodo opuesto a la carga debido a que los iones se mueven dentro de ésta.

El mecanismo de la doble capa es diferente al de las interacciones coulombicas típicas entre dipolos. En este caso, la distorsión de la doble capa en presencia de un campo eléctrico nos lleva a una redistribución en equilibrio dentro de ésta, resultando en una repulsión de carga y/o atracción.

De acuerdo a esta teoría, a altas frecuencias el movimiento de la masa de las partículas no tiene una posición preferida ya que no se espera que siga a tales campos, pero habrá una polarización en la superficie de la doble capa dada la movilidad de iones involucrados. El efecto electroreológico disminuye con el incremento de la frecuencia a un campo constante ya que el tiempo disponible para transportar la carga en una dirección por unidad de ciclo disminuye. Está claro que cuando la frecuencia se aproxima a cero, lo cual corresponde a un campo de corriente directa (c.d), existe más tiempo disponible para que la carga alcance un estado completamente polarizado.

### 3.5.2.- TEORIA DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA.

En 1983, Stengroom publicó su teoría del almacenamiento de agua[12]. En ella reportó que los requerimientos mínimos para un FER, incluye la presencia de una fase líquida hidrofóbica y una fase sólida hidrofílica, porosa y que tenga una cantidad apreciable de agua sobre ella. Este mecanismo asume que el ion atrapado dentro de los poros de las partículas incrementa su movilidad al disolverse en el agua (ver figura 3.2). Al aplicar el voltaje los iones cambian la dirección de la capa de agua en el sentido del electrodo cargado opuestamente.

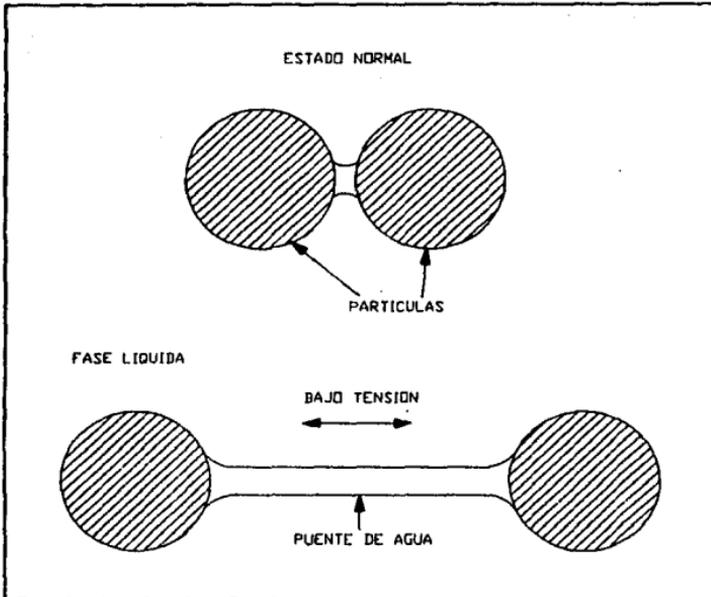


FIG. 3.2.-Teoría del almacenamiento de agua propuesta por Stangroom.

El traslape del agua entre las partículas llega a considerarse como un puente o pegamento que causa la RE. Al eliminar el campo eléctrico el agua y los iones regresan a los poros dentro de la partícula dando origen a la disipación del dipolo inducido. Aunque en la actualidad se ha eliminado la posibilidad de la presencia del agua en los FER's ya que existen sustancias anhidras como los aluminosilicatos[13].

### 3.5.3.- POLARIZACION DE LA PARTICULA.

Varios autores han propuesto un tercer mecanismo[13] para explicar el fenómeno electroreológico. Su propuesta es que hay cinco formas a través del cual la polarización de las partículas puede ocurrir en los FER's, éstas son: la polarización electrónica, la atómica, la nómada, la interfacial y la rotacional. A continuación se explicara cada una de estas.

#### 3.5.3.1.- POLARIZACION ELECTRONICA.

La polarización electrónica es la más común. Está surge de pequeñas distorsiones de la nube electronica del átomo. La polarización electrónica contribuye de una manera pequeña con respecto a la polarización global.

#### 3.5.3.2.- POLARIZACION ATOMICA.

Otro factor que contribuye a la constante dieléctrica de las partículas es el movimiento del núcleo de los átomos cuando están expuestos a un campo eléctrico. Este tipo de polarización, se le conoce como polarización atómica. Esta contribuye a la constante dieléctrica de las partículas inorgánicas más que a las orgánicas.

### 3.5.3.3.- POLARIZACION NOMADA.

Un tercer tipo de polarización en las partículas es la polarización nómada. La cual ocurre a través del movimiento de cargas generadas térmicamente en una partícula sobre varios espacios intersticiales. Este tipo de polarización puede involucrar movimiento de electrones (hiperelectrónicos) o protones (hiperprotónicos). Esta forma de polarización puede ser bastante grande comparada con la polarización electrónica u atómica.

### 3.5.3.4.- POLARIZACION ROTACIONAL.

La polarización rotacional, llamada polarización dipolar o polarización orientacional, es posible que se dé si la partícula tiene átomos con dipolos permanentes. Esta forma de orientación de partículas puede formar un papel importante en la polarización de macromoléculas.

### 3.5.3.5.- POLARIZACION INTERFACIAL.

Otra manera de polarización es la que ocurre por acumulación de cargas en las interfases entre las partículas. A este fenómeno se le llama polarización interfacial o polarización de Maxwell-Wagner.

Las cargas iónicas o electrónicas son libres y van de un lugar a otro de la partícula lo que crea enormes momentos dipolares. Estas cargas migran a través del volumen de la partícula o a lo largo de la superficie.

La polarización interfacial generalmente ocurre en sistemas no-homogéneos, donde varios materiales tienen diferentes conductividades y las cargas se mueven.

### **3.6.- COMPUESTOS POLARES Y NO POLARES.**

La polaridad de los compuestos depende del tipo de átomos y de la clase de enlace químico que formen estos. Por lo que a continuación analizaremos brevemente los enlaces atómicos con el fin de entender si un compuesto es polar o no polar.

#### **3.6.1.- ENLACES ATOMICOS NO POLARES.**

Los enlaces atómicos no polares comúnmente llamados apolares se presentan en particular en todas las moléculas formadas por dos átomos (por ejemplo la molécula de hidrógeno y los halógenos elementales) o grupo de átomos iguales (por ejemplo el etano). Pero también existen enlaces que se pueden considerar apolares como son los enlaces C-C asimétricos presentes en algunos hidrocarburos (por ejemplo el neopentano) mientras que un enlace C-H presenta una clara pero débil polaridad[14]. Este último caso es debido a la mayor capacidad del átomo de C de jalar a la órbita de los electrones de enlace hacia su núcleo.

### 3.6.2.- ENLACE ATOMICO POLARIZADO.

El enlace atómico polarizado se diferencia del apolar por el hecho de que las órbitas (posición que describe el movimiento de los electrones) de los electrones de enlace ocupan una posición asimétrica entre los núcleos atómicos a los que mantiene enlazados, estos núcleos ejercen una atracción electrostática diferente sobre los electrones como consecuencia de las diferencias de carga existentes entre las capas de valencia (número de electrones en la última capa del átomo). Por ejemplo en el cloruro de metilo, el carbono tiene una valencia de 4 y el cloro de 7, de modo que el par de electrones de enlace se desplazará hacia éste último, de tal manera que el cloro será el polo negativo y el carbono el positivo.

### 3.6.3.- TANTO PORCIENTO DE CARACTER IONICO.

Naturalmente existe una forma cuantitativa de medir el grado de polaridad de los diferentes tipos de enlace, relacionandolos con otras propiedades físicas. Esto puede lograrse por medio del tanto por ciento iónico, que expresa el desplazamiento del centro de gravedad de la carga del par electrónico de enlace desde la posición central simétrica que correspondería a un enlace apolar hasta el máximo desplazamiento posible en el caso de una disociación[15]. No se colocará la ecuación pues sólo se pretendió explicar que existen moléculas con grados de polaridad o apolaridad (según el punto de vista del lector).

### 3.6.4.- OTRAS FORMAS DE MEDIR LA POLARIDAD.

Una forma sencilla de cuantificar la polaridad de los compuestos fue propuesta por Luis Ramos[16]. El considera la estructura de una sola molécula, sus grupos polares y el número de átomos de carbono. En su reporte presentó algunos parámetros de polaridad de varios plastificantes.

El procedimiento anterior pareciera ser sencillo, pero cuando se trata de un polímero las cosas parecen complicarse. Sin embargo, se ha propuesto una forma cualitativa de medir la polaridad de los polímeros.

Una manera conveniente de pensar acerca del comportamiento dieléctrico de los polímeros es considerar sólo a las unidades repetidas y no a la cadena de la moléculas.

Cuando un momento dipolar permanente se presenta en una cadena se pueden distinguir dos situaciones[17]: una donde el esqueleto entero junto con sus grupos polares están fijos rígidamente en un ángulo conformacional y otro donde el esqueleto es flexible y sus grupos funcionales pueden rotar libremente.

Si el polímero se mantiene en una conformación fija, el momento resultante de una molécula completa dependerá mucho de si los segmentos individuales (grupos polares) se refuerzan o se compensan uno al otro. Por ejemplo la configuración del politetrafluoroetileno, el momento dipolar alto del grupo  $-CF_2-$  se alterna en la

estructura, es decir, están en posiciones opuestas del esqueleto, de tal forma que se balancea el momento dipolar. Por lo que la constante dieléctrica (en el punto 3.7 se dará una explicación de la constante dieléctrica) del polímero es baja.

En contraste, el momento dipolar del C-Cl en el cloruro de polivinilo es aditivo pues está en una configuración zigzag planar de tal manera que los grupos polares están en un solo sentido de la estructura. En este caso la constante dieléctrica de este polímero es alta.

### 3.7.- RELACION ENTRE LA CONSTANTE DIELECTRICA Y POLARIDAD.

Para poder entender la relación entre la constante dieléctrica y la polaridad de una sustancia explicaremos primero que es la constante dieléctrica y posteriormente que importancia tiene la polaridad en ésta.

El grado con el cual un material responde a un campo eléctrico puede ser fácilmente apreciado en el caso de un capacitor de platos paralelos. La capacitancia por unidad de área del electrodo es definido como la relación de la carga almacenada por unidad de área del electrodo por el voltaje aplicado (ver ecuación 3.1).

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3.1)$$

donde;

C = Capacitancia del material.

Q = Carga almacenada.

V = Voltaje.

Ahora consideremos un capacitor con el material de interés entre sus platos. El material responderá al campo eléctrico aplicado redistribuyendo las cargas de sus componente (electrones y protones), las cargas positivas serán atraídas por el electrodo negativo y las cargas negativas por el positivo. A éste efecto se le llama polarización del material.

Cada elemento de volumen del material polarizado se comporta electricamente como si fueran cargas (+q) y (-q) separados por una distancia w en dirección del campo, dando lugar a un momento dipolar:

$$\mu_d = q \cdot w \quad (3.2)$$

donde;

$\mu_d$  = Momento dipolar.

q = Carga.

w = Distancia entre los centros de la carga.

Las cargas antes mencionadas (polo positivo-polo negativo) producen otras (+P y -P) por unidad de área sobre la superficie adyacente a los electrodos. La presencia de esta polarización o cargas limite significa que se puede almacenar mayor carga sobre los electrodos del capacitor para el mismo voltaje aplicado y la capacitancia del

---

sistema se incrementa. La capacitancia  $\epsilon$  (ecuación 3.3) es la relación entre la capacitancia incrementada y la capacitancia en el vacío.

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} = \frac{Q+P}{Q} \quad (3.3)$$

donde;

$\epsilon$  = Capacitancia del sistema (Constante dieléctrica del material).

$C_0$  = Capacitancia en el vacío.

Esta relación característica es esencialmente independiente del voltaje aplicado y por consiguiente también del campo eléctrico como se ve en la ecuación 3.3, a esta misma ecuación se le conoce como la constante dieléctrica del material.

La constante dieléctrica varía de material a material dependiendo de la cantidad de polarización que pueda ocurrir en el mismo.

La constante dieléctrica de un material dependerá del número de cargas que se produzcan sobre la superficie del electrodo. Por lo que un material que sea altamente polarizable tendrá una constante dieléctrica grande, mientras que un material que sea poco polarizable tendrá una constante dieléctrica pequeña.

### 3.8.- CONDUCTIVIDAD EN MATERIALES.

Otro aspecto que hay que cuidar y de ser posible evitar es la conductividad en los FER's. Pero hay que recordar que la conductividad de materiales no es el objetivo del trabajo pero tiene importancia en los FER's.

---

Los compuestos orgánicos tienen una conductividad 18 veces más pequeña que los metales y el subgrupo polimérico está dentro de los de más baja conductividad a los compuestos aislantes mejor conocidos.

La conductividad eléctrica puede ocurrir a través del movimiento de electrones o iones. La ecuación básica de conducción es [18]:

$$\sigma = q \cdot g \cdot z \quad (3.4)$$

donde;

$\sigma$  = Conductividad.

$g$  = Concentración de la carga.

$z$  = Movilidad de la carga.

El último parámetro indica la facilidad con la que la especie cargada se mueve bajo la influencia de un campo eléctrico y está expresada en velocidad por unidad de campo ( $m^2v^{-1}s^{-1}$ ). Las contribuciones a la conductividad en un conductor electrónico se puede dar a través de electrones y huecos (un hueco es un electrón vacío llevando una carga positiva equivalente), y en un conductor iónico a través de pares de aniones y cationes. Las teorías de la conducción se dirigen a explicar como la concentración y la movilidad de desvío del conductor son determinados por la estructura molecular y cómo ésta depende de la temperatura y del campo aplicado.

En los materiales poliméricos es difícil que se observe alguna conducción electrónica (movilidad de electrones) ya que la calidad del aislamiento puede favorecerse al cuidar su preparación y pureza.

Existen tres formas importantes de llevar a cabo la conductividad en polímeros[19] estas son: la conducción iónica, electrónica y la composición heterogénea.

A continuación se hablará un poco acerca de la conducción iónica que es la que nos interesa por el tipo de materiales que se emplea en la formulación de los FER's.

### 3.8.1.- CONDUCCION IONICA.

La evidencia definitiva para la conducción iónica es la detección de productos de electrólisis formados en la descarga de iones que surgen de los electrodos. En los polímeros se da a niveles muy bajos que no es posible tales detecciones. El grado de impurezas iónicas puede ser ignorado en el contexto de otras propiedades pero puede tener un efecto significativo sobre la conductividad.

Existe una fuerte relación entre la constante dieléctrica y la conductividad. Debido a que en sistemas que contienen agua (la cual tiene la constante dieléctrica alta), incrementa grandemente la conductividad de los polímeros ocasionada por la disociación iónica del agua.

La presencia de agua en los FER's permite que la conducción iónica sea el mecanismo por el cual éstos presenten cierta conductividad.

## NOMENGLATURA

- $C$**  = Capacitancia del material.  
 **$Q$**  = Carga almacenada.  
 **$V$**  = Voltaje.  
 **$\mu_d$**  = Momento dipolar.  
 **$q$**  = Carga.  
 **$w$**  = Distancia entre los centros de la carga.  
 **$\epsilon$**  = Capacitancia del sistema.  
 **$C_o$**  = Capacitancia en el vacío.  
 **$\sigma$**  = Conductividad.  
 **$g$**  = Concentración de la carga.  
 **$z$**  = Movilidad de la carga.

## BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Gast Alice. P. [Y] Zukoski Charles F., "Electrorheological Fluids as Colloidal Suspensions", *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 30, 1989, pp. 153-202.
- 2.- Shulman Z. P. [Y] Matsepuro A. D., "Structural Changes in Electrorheological Fluids", *Proceedings of the Second International Conference on ER Fluids, USA*, agosto 7-9, 1989, pp. 207-213.
- 3.- Hill John C. [Y] Van Steenkiste Thomas H., "Response Times of Electrorheological Fluids", *Journal of Applied Physics*, Vol. 70, No. 3, 1 agosto, 1991, pp. 1207-1211.
- 4.- Jordan Therese C. [Y] Shaw Montgomery T., "Structures in Electrorheological Fluids", *Proceedings of the Second International Conference on ER Fluids, USA*, agosto 7-9, 1989, pp. 231-251.
- 5.- Titow W. V., PVC Plastics Properties, Processing and Applications., (Elsevier Science Publishers LTD, New York: 1990) p. 177-178.
- 6.- Jordan Therese C [Y] Shaw Montgomery., "Electrorheology", *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, Vol. 24, No. 5, octubre, 1989, pp. 849-878.
- 7.- Treasurer U. Y., Filisko F. E. [Y] Radzilowski L. H., "Polyelectrolytes as Inclusions in Electrorheologically Active Materials: Effect of Chemical Characteristics on ER Activity", *The Society of Rheology*, Vol. 35, No. 7, agosto, 1991, pp. 1051-1068.
- 8.- Kordonsky V. I., Korobko E. V. [Y] Lasareva T. G., "Electrorheological Polymer-based Suspensions", *The Society of Rheology*, Vol. 35, No. 7, octubre, 1991, pp. 1427-1439.
- 9.- Klages Federico., Tratado de Química Orgánica. Tomo II Química Orgánica General y Teórica. (Reverté S.A., Barcelona, España: 1969) pp. 85-87.

- 10.- Blythe A. R., Electrical Properties of Polymers, (Cambridge University Press, Gran Bretaña: 1979) pp. 18-19.
- 11.- Klass Donald. L. [Y] Martinek Thomas. W., "Electroviscous Fluids. I. Rheological Properties", *Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 1, enero, 1967, pp. 67-74.
- 12.- Stangroom J. L., "Electrorheological Fluids", *The Institute of Physics: Physics Technology*, Vol. 14, 1983, pp. 290-298.
- 13.- Weiss Keith D., Carlson J. David. [Y] Coulter John P., "Material Aspects of Electrorheological Systems", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, enero, 1993, pp. 13-34.
- 14.- Klages Federico., op. cit., p. 122
- 15.- Klages Federico., op. cit., p. 125
- 16.- Ramos-Devalle Luis [Y] Gilbert Marianne, "PVC/Plasticizer Compatibility: Evaluation and Its Relation to Processing", *Journal of Vinyl Technology*, Vol. 4, diciembre, 1990, pp. 222-225.
- 17.- Blythe A. R. op. cit. pp. 33-35.
- 18.- Blythe A. R. op. cit. pp. 90-92.
- 19.- Blythe A. R. op. cit. pp. 92-124.

## CAPITULO 4

### MATERIALES Y TECNICAS DE EXPERIMENTACION.

#### 4.1.- INTRODUCCION.

En esta sección describiremos cómo se prepararon y evaluaron los Fluidos Electrorreológicos (FER's) así como las técnicas empleadas para realizar la evaluación reológica (viscosidad, esfuerzo y velocidad de corte) y estructural de cada formulación. Se mencionará la técnica empleada para hacer la evaluación eléctrica (constante dieléctrica) a las fases líquidas de los FER's.

La evaluación reológica de los FER's es de gran importancia dado que muestra cómo la viscosidad de la suspensión crece con el campo eléctrico y cómo varía ésta con la velocidad de deformación. Esto permite simular las condiciones reales a las

cuales se enfrentaría el Fluido Electrorreológico (FER) y establecer si el fluido es el adecuado para un uso determinado. La evaluación estructural tiene relevancia debido a que se puede conocer como se modifica la estructura con la variación en las características de la fase líquida de los FER's bajo la acción de un campo eléctrico, permitiendo tal vez establecer una relación directa con el comportamiento reológico, ya que la formación de estructuras fibrilares debido a la polarización de las partículas son las causantes de la Respuesta Electrorreológica (RE).

A continuación se describirán los materiales empleados y sus características así como la metodología de evaluación empleada.

#### **4.2.- MATERIALES Y PREPARACION DE FER's.**

Los FER's están compuestos por una fase líquida y una sólida, en donde la fase líquida tiene como principal función el de aislante de la sólida. En este trabajo empleamos diversos tipos de fases líquidas para preparar las suspensiones, principalmente variando su constante dieléctrica y viscosidad.

A continuación se presentaran las formulas químicas de las fases líquidas que se utilizaron para preparar las suspensiones (ver la figura 4.0).

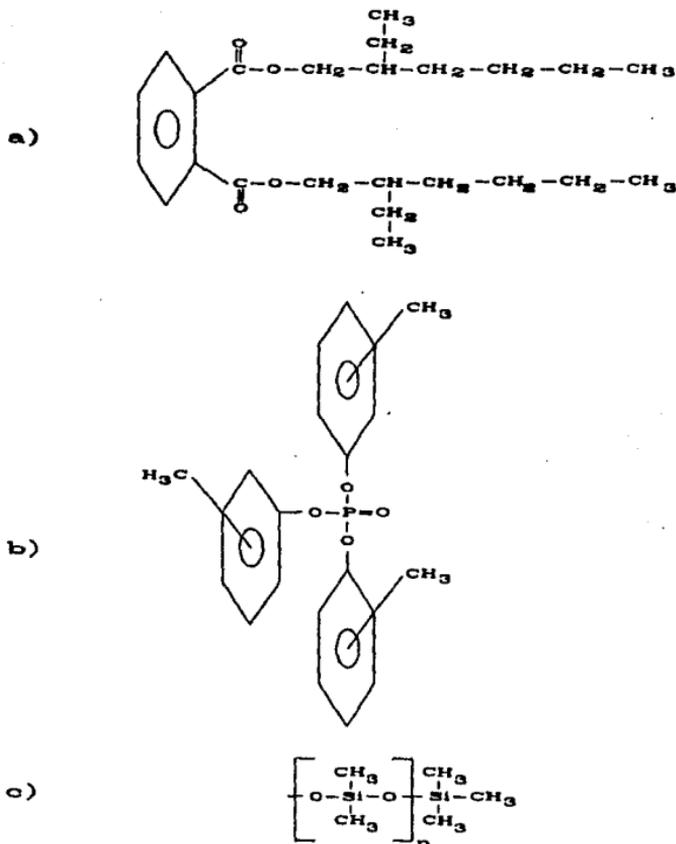


FIG. 4.0.- Fases líquidas utilizadas en la parte experimental. a) Dioctil Faleto (DOP), b) Tricresil Fosfato (TCF) y c) Aceite de Silicón (AS-#).

La parte experimental se dividió en dos etapas. En la primera parte (I) se eligieron aquellos fluidos que tuvieran una constante dieléctrica diferente y una viscosidad aproximadamente igual. Las características de éstos se muestran en la tabla 4.1.

**TABLA 4.1.- Propiedades físicas de la fase líquida con viscosidad aproximadamente iguales y constante dieléctrica diferente.**

Fase Líquida.	Constante dieléctrica.	Viscosidad. (mPa*s)	Gravedad específica. (25 °C)	Temperatura de inflamación. (°C)
Aceite silicón 100	2.42	105	0.964	326
Diocil Ftalato	4.63	70	0.980-0.984	190
Tricresil Fosfato	25.81	70	1.158-1.178	242

En la segunda etapa experimental (II) se emplearon como fase líquida diferentes fluidos que tuvieran una constante dieléctrica semejante y una viscosidad diferente, como se muestra en la tabla 4.2.

**TABLA 4.2.- Propiedades físicas de las fases líquidas con constante dieléctrica semejante y viscosidad diferente.**

<b>Fase líquida.</b>	<b>Constante dieléctrica.</b>	<b>Viscosidad. (mPa*s)</b>	<b>Gravedad específica. (25°C)</b>	<b>Temperatura de inflamación. (°C)</b>
<b>Aceite silicón 100</b>	<b>2.767</b>	<b>105</b>	<b>0.964</b>	<b>326</b>
<b>Aceite silicón* 350</b>	<b>2.752</b>	<b>333</b>	<b>0.968</b>	<b>326</b>
<b>Aceite silicón 500</b>	<b>2.809</b>	<b>505</b>	<b>0.969</b>	<b>326</b>
<b>Aceite silicón 1000</b>	<b>2.791</b>	<b>980</b>	<b>0.970</b>	<b>326</b>

Los aceites de silicón que se utilizaron fueron los de la compañía Spectrum, Dow Corning\*, el DOP de PRIMEX y el Tricresil fosfato de AKZO CHEMIE.

Para nuestros estudios utilizamos como fase sólida partículas de Sílica Gel de la compañía Merck. En la tabla 4.3 se muestran algunas características de esta sílica.

TABLA 4.3.- Propiedades físicas de la fase sólida.

Parte Experimental	Partícula	Tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ )	Constante dieléctrica	Contenido de agua (% peso)
I	Sílica Gel	Menor a 63	7.62	5
II	Sílica Gel	Menor a 63	9.14	7

La constante dieléctrica de la fase sólida fue determinada suponiendo una relación lineal entre ésta y el porcentaje de contenido de agua de la sílica. Los datos para realizar la interpolación fueron tomados de Alice y Zukoski[1].

La diferencia en el contenido de agua de la sílica se debe a que se usaron distintos lotes. El porcentaje del contenido de agua en la sílica se determinó mediante un análisis termogravimétrico (TGA)[2].

#### 4.2.1.- PREPARACION DE FER's.

Las suspensiones fueron preparadas a una concentración del 20% en peso (0.09 fracción volumen) de sílica. Previo a la determinación de la viscosidad de la suspensión ésta se agitó muy bien, con el fin de evitar la formación de aglomerados. Posteriormente se desgasificaba para evitar la presencia de aire con el fin de que las mediciones fueran lo más precisas posibles.

#### **4.2.2.- EVALUACION ELECTRICA DE MATERIALES.**

La evaluación eléctrica de las fases líquidas (constante dieléctrica) se realizaron de acuerdo a L. Rejón y colaboradores[2]. Las condiciones de prueba fueron:

- a) Temperatura ambiente 23.5°C.
- b) 1 kV y 60 Hz.

#### **4.3.- METODOS REOLOGICOS PARA LA CARACTERIZACION DE FER's.**

Existen diversas geometrías para medir la viscosidad en suspensiones, las comunes son:

- a) Cono y Plato.
- b) Cilindros concéntricos.
- c) Platos paralelos.

A continuación describiremos las características de estos viscosímetros con el fin de ayudar a explicar como seleccionamos el viscosímetro para las pruebas.

##### **4.3.1- GEOMETRIA DE CONO Y PLATO.**

La geometría más común es la de cono y plato. En este arreglo, la muestra llena el espacio (abertura) entre la superficie angulada de la parte móvil (cono) y la base del plato.

En esta geometría al variar el radio del cono es posible afectar significativamente el esfuerzo de corte aplicado a la muestra de tal forma que el esfuerzo se incrementará con la disminución del radio. Esto se espera teóricamente dado que el esfuerzo se define como la fuerza por unidad de área (si disminuye el radio, disminuye el área). Por otra parte, la velocidad de corte se ve afectada por el ángulo del cono, más que por el radio del mismo. Por consiguiente, la velocidad se incrementa con la disminución del ángulo del cono. Esto se explica dado que un adelgazamiento de la capa de la muestra experimentará un efecto cortante mayor.

La geometría de cono y plato tiene varias ventajas significativas.

- a) La velocidad cortante a través de la muestra es uniforme, lo cual significa que los datos observados representan a la muestra entera.
- b) Usando ángulos de cono muy pequeños es posible alcanzar velocidades del orden de  $40,000 \text{ seg}^{-1}$  con un esfuerzo controlado.
- c) Requiere sólo pequeñas cantidades de muestra y es fácil de llenar y limpiar.
- d) La baja cantidad de masa en esta geometría y las cantidades pequeñas de muestra permiten un equilibrio rápido de la temperatura.

**La geometría de cono y plato tiene algunas desventajas:**

**a) El dispositivo es susceptible de errores si no se llena apropiadamente, dado que el ángulo del cono y el de la abertura son pequeños. Existe la posibilidad de tener errores al establecer la abertura inicial.**

**b) Particularmente en ángulos pequeños el cono y plato pueden ser obstruidos por partículas de muestra. Una buena regla es que la altura del cono debe ser de 5 a 10 veces más grande que el tamaño de cualquier partícula en la muestra.**

**c) Los fluidos de baja viscosidad y los materiales altamente viscosos, pueden ser arrojados de la geometría a altas velocidades de corte.**

**d) A velocidades de corte altas, los fluidos viscoelásticos tienden a elevarse sobre la parte móvil variando la abertura y forzando al material a salir por la misma.**

#### **4.3.2.- GEOMETRIA DE CILINDROS CONCENTRICOS.**

El viscosímetro de cilindros concéntricos (Couette) está compuesto por un cilindro interno el cual gira y uno externo que permanece fijo. El fluido se coloca en el espacio entre los dos cilindros. Este tipo de geometría permite una buena determinación de la viscosidad cuando la abertura entre los cilindros es pequeña.

**A continuación mencionaremos las ventajas de esta geometría:**

- a) La geometría de cilindros concéntricos dobles está diseñada para manejar fluidos de viscosidad baja tales como sangre y otros fluidos biológicos, así como suspensiones y dispersiones.**
  
- b) El diseño permite áreas de superficie grandes que incrementan la sensibilidad de las mediciones.**
  
- c) El mayor volumen de la muestra asociado para llenar y operar el equipo hace que sea menos crítico su uso.**

**Desventajas de la geometría de cilindros concéntricos:**

- a) No provee una velocidad cortante uniforme a través de la abertura.**
  
- b) La mayor masa de esta geometría produce en una inercia alta y un equilibrio de temperatura muy lento, por lo que requiere un sistema de calentamiento para evaluaciones arriba de la temperatura ambiente.**

#### 4.3.3.- GEOMETRIA DE PLATOS PARALELOS.

En la geometría de platos paralelos, la muestra ocupa el espacio entre dos superficies paralelas, la del plato superior (movible) y el plato base (estático) o viceversa.

La geometría de platos paralelos tiene varias ventajas:

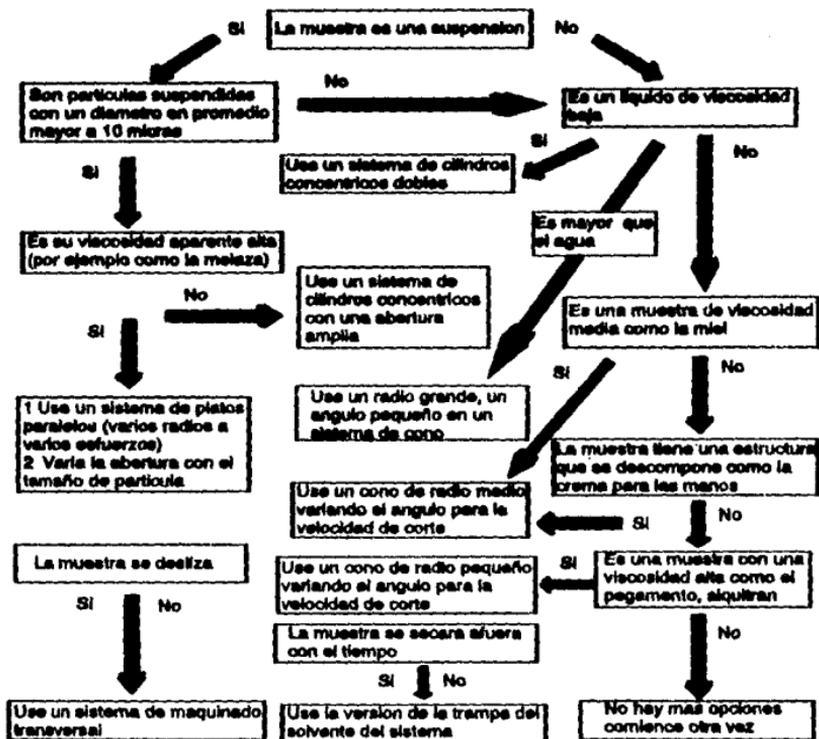
- a) Dado que la separación para un tamaño de plato puede variarse, el plato paralelo está mejor adaptado para evaluar materiales con partículas (considerando una separación).
- b) Se pueden evaluar líquidos altamente viscosos.

Las desventajas de la geometría de los platos paralelos son:

- a) La velocidad de corte a través del espacio no es uniforme.
- b) Existe la posibilidad de fractura en algunos materiales bajo condiciones de velocidades de corte altas.

TA Instruments propone un diagrama de flujo[4] para seleccionar una geometría inicial en la evaluación de nuevos materiales, aunque menciona que el diagrama no es absoluto, puede servir como una buena guía. El diagrama se muestra en la figura 4.1.

**FIGURA 4.1.- Diagrama de flujo para seleccionar una geometría de un viscosímetro.**



Tomando en cuenta el diagrama de flujo de la figura 4.1 pero sobre todo el equipo con que contaba el Instituto se optó por trabajar con un viscosímetro de platos paralelos. Para el cálculo de las propiedades reológicas (velocidad y esfuerzo de corte) se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Byron Bird[5] para una geometría de placas paralelas.

La ecuación para la velocidad de corte es:

$$\gamma = \frac{2\pi \cdot R \cdot N}{60 \cdot H} \quad (4.1)$$

donde;

R= Radio del plato.

N= Revoluciones por minuto.

H= Separación entre platos.

La ecuación del esfuerzo de corte es:

$$\tau = \frac{M}{2\pi R^3} \quad (4.2)$$

donde;

M= Torque.

Como se puede observar en la ecuaciones anteriores el esfuerzo está inversamente relacionado al radio del plato móvil, la velocidad de corte se relaciona con la separación de los platos, incrementándose con la disminución en la separación.

#### **4.4.- SISTEMA EMPLEADO PARA LA EVALUACION REOLOGICA DE FER's.**

El sistema empleado para realizar la evaluación reológica (viscosidad) fue un sistema de platos paralelos. Se utilizó un viscosímetro Brookfield modelo RVT al cual se le modificaron las agujas.

Se diseñó un vaso de vidrio para evaluar la viscosidad de los FER's. Este vaso tiene en su base un plato (disco) por donde se conectó el polo negativo de la corriente directa. El vaso se colocó en una base de plástico para poder manipular mejor el alineamiento de los platos y al mismo tiempo aislarlo. La aguja modificada del viscosímetro se conectó al polo positivo (ver figura 4.2). El voltaje necesario aplicado al sistema procedía de la fuente de poder HV DC Power Supply Hipotronic.

Antes de iniciar las evaluaciones se alinean (empalman) los electrodos. Se agrega la suspensión previamente agitada y desgasificada. Se vuelve a colocar el sistema de la misma forma como se hizo el alineamiento de los electrodos y se separan a una altura deseada (3 mm). Se inicia el movimiento de la aguja superior a la velocidad más baja, se deja estabilizar por 5 minutos y se registra la primera lectura. Las lecturas siguientes a velocidades mayores se registran cada 2 minutos. Una vez tomadas todas las lecturas a las diferentes velocidades se regresa a la velocidad inicial (más baja) y se aplica el nuevo voltaje, se deja estabilizar 5 minutos y se registra la nueva lectura. Las lecturas posteriores se toman cada 2 minutos. El proceso se repite hasta alcanzar los kV/mm deseados.

### ARREGLO EXPERIMENTAL

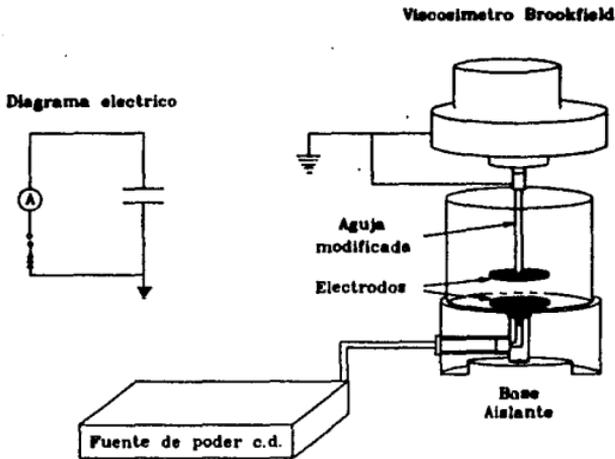


FIG. 4.2.-Arreglo experimental para realizar la evaluación reológica de los FER's.

#### 4.5.- TECNICAS DE CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DE FER's.

En los FER's se involucran propiedades reológicas, eléctricas, químicas y ópticas siendo importante determinarlos con el fin de tener un mayor entendimiento del fenómeno electroreológico. En esta sección mencionaremos como se determinará el efecto del campo eléctrico y las características de los componentes de los FER's sobre el arreglo espacial de las partículas cuando están sometidas a un campo eléctrico. Se ha observado que existen diversas estructuras de acuerdo al tipo de campo eléctrico aplicado, ya sea de corriente directa (c.d) o corriente alterna (c.a)[1,6].

En este trabajo se estudiará el tipo de estructura que favorece la fase líquida del FER cuando se le aplica a éste un campo eléctrico (c.d), esperando que las estructuras microscópicas que se formen sirvan de apoyo para la comprensión del comportamiento electroreológico.

Con este objetivo se utilizará un arreglo óptico similar al ya utilizado exitosamente para determinar el Tiempo de Respuesta (TR)[6]. En este sistema se utiliza un microscopio, una cámara de video, un monitor, un sistema capaz de registrar imágenes a alta velocidad, una videograbadora y una fuente de poder, de tal forma que al aplicar un campo eléctrico a la suspensión se graben los cambios que ocurren. Así que haremos las modificaciones necesarias a este sistema para poder videograbar y después fotografiar las estructuras que se formen en los FER's.

#### **4.5.- TECNICAS DE CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DE FER's.**

En los FER's se involucran propiedades reológicas, eléctricas, químicas y ópticas siendo importante determinarlos con el fin de tener un mayor entendimiento del fenómeno electroreológico. En esta sección mencionaremos como se determinará el efecto del campo eléctrico y las características de los componentes de los FER's sobre el arreglo espacial de las partículas cuando están sometidas a un campo eléctrico. Se ha observado que existen diversas estructuras de acuerdo al tipo de campo eléctrico aplicado, ya sea de corriente directa (c.d) o corriente alterna (c.a)[1,6].

En este trabajo se estudiará el tipo de estructura que favorece la fase líquida del FER cuando se le aplica a éste un campo eléctrico (c.d), esperando que las estructuras microscópicas que se formen sirvan de apoyo para la comprensión del comportamiento electroreológico.

Con este objetivo se utilizará un arreglo óptico similar al ya utilizado exitosamente para determinar el Tiempo de Respuesta (TR)[6]. En este sistema se utiliza un microscopio, una cámara de video, un monitor, un sistema capaz de registrar imágenes a alta velocidad, una videograbadora y una fuente de poder, de tal forma que al aplicar un campo eléctrico a la suspensión se graben los cambios que ocurren. Así que haremos las modificaciones necesarias a este sistema para poder videograbar y después fotografiar las estructuras que se formen en los FER's.

#### **4.6.- ARREGLO UTILIZADO PARA LA CARACTERIZACION ESTRUCTURAL DE LOS FER's.**

Para analizar la estructura generada por el campo eléctrico aplicado a los FER's se diseñó el siguiente sistema.

Se prepararon laminas de cobre de un espesor de entre 0.15 a 0.45 mm y de 25 por 7 mm de largo, las cuales se utilizaron como electrodos. Estos fueron unidos a una base de vidrio con una separación de aproximadamente 1 mm. Los electrodos se conectaron a la fuente de poder HV DC Hipotronic, con la cual se aplicaba el voltaje requerido. La cantidad de suspensión colocada a lo largo de la abertura era aproximadamente 500  $\mu$ lt.

El sistema empleado para videografiar las estructuras de los FER's fue el siguiente:

La celda se colocó en un microscopio Nikon. Por este se observaban las suspensiones con aumentos de entre 50 a 60 veces por medio del sistema de transmisión. El microscopio Nikon tiene una cámara de video que a su vez está conectado a un monitor, en el cual podemos observar los cambios presentados en la estructura del FER (ver la figura 4.3).

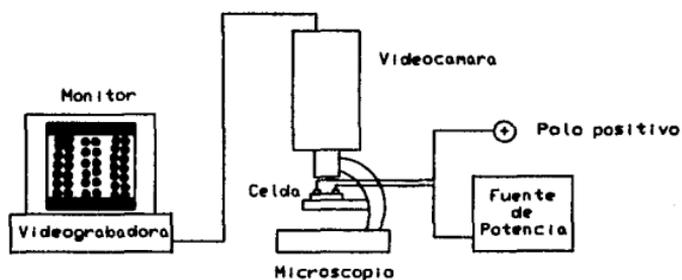


FIG. 4.3.-Arreglo experimental para observar el comportamiento estructural de los FER's.

El procedimiento para grabar la parte experimental I (fases líquidas con diferentes constantes dieléctrica) y II (fases líquidas con diferentes viscosidades) fue el siguiente:

Se agita bien la suspensión, se desgasifica y se coloca la cantidad antes indicada del fluido en la celda. Se enfoca a ésta con los aumentos especificados y se aplica un voltaje específico (250, 500, 1000, 1500 volts). El tiempo de grabación a las suspensiones es de 1 minuto sin campo eléctrico, 2 minutos con campo y 1 minuto después de eliminar bruscamente el campo eléctrico a la muestra.

## NOMENCLATURA.

$\tau$  = Esfuerzo de corte.

$\gamma$  = Velocidad de corte.

M = Torque.

R = Radio del plato.

H = Separación entre platos.

N = Revoluciones por minuto (RPM).

## BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Gast Alice [Y] Zukoski Charles, "Electrorheological Fluids as Colloidal Suspensions", Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 30, 1989, pp. 153-202.
- 2.- Du Pont Company, Instruction Manual 951 Thermogravimetric Analyzer (TGA), noviembre, 1977.
- 3.- Rejón G. Leonardo, Ponce V. Marco. A., Nava L. Rocío, De la Luz O. Cándido, (Instituto de Investigaciones Eléctricas-México) [Y] Castaño V.M. (Instituto de Física/UNAM-México), "Electrorheological Fluids. I. Rheological Properties", 2<sup>do</sup> Simposio Ibero-americano de Polímeros, Gramado-Brasil, Vol. 1, 1994, pp. 380-382.
- 4.- TA Instruments (Rheometers), Inc., Inglaterra, 1993.
- 5.- Byron Bird R., Armstrong Robert C. [Y] Hassager Ole, Dynamics of Polymeric Liquids Fluid Mechanics Vol. I. (John Wiley & Sons, USA: 1977) pp. 176-177.
- 6.- Hill John C. [Y] Van Steekiste, "Responce Times of Electrorheological Fluids", American Institute of Physics, Vol. 3, No. 70, 1 de agosto, 1991, pp. 1207-1211.

## CAPITULO 5

### ANALISIS DE RESULTADOS.

En esta sección analizaremos los resultados obtenidos en la parte experimental tratando de mostrar el efecto que tienen variables tales como la constante dieléctrica y viscosidad de la fase líquida e intensidad del campo eléctrico sobre el comportamiento reológico, estructural y magnitud del efecto electroreológico de las suspensiones preparadas.

Para facilitar el análisis emplearemos la siguiente nomenclatura para las suspensiones y sus componentes. Para referirnos a los aceites de silicón utilizaremos la abreviatura AS-#, siendo # el número característico de los silicones indicando su viscosidad en centistokes (cst), el Tricresil Fosfato se abreviara como TCF y el Dioctil Ftalato como DOP.

Para referirse a las figuras se empleará la siguiente nomenclatura:

**Número de figura (fase líquida del FER analizado, concentración en peso de la fase sólida, voltaje aplicado al FER por mm).**

Por otra parte, sólo se emplearán aquellas fotografías que sean representativas del fenómeno que se describa, con el fin de evitar confusiones con el manejo de mucha información.

La fase sólida empleada para preparar FER's tiene un tamaño menor a 63 micras, con un porcentaje en peso de humedad del 5% y 7% para los FER's que tienen una fase líquida con una constante dieléctrica diferente y una viscosidad variable respectivamente. A continuación se hará el análisis estructural de los FER's y posteriormente el reológico.

## **5.1 .- ANALISIS ESTRUCTURAL DE LOS FER's.**

En esta sección se analizará el efecto que tiene la concentración de la fase sólida, intensidad del campo eléctrico, viscosidad y constante dieléctrica de la fase líquida sobre la distribución espacial (estructura) de la fase sólida en una suspensión electroreológica.

### 5.1.1.- EFECTO DE LA CONCENTRACION SOBRE EL CAMBIO ESTRUCTURAL DE LOS FER's.

Con la finalidad de poder determinar el efecto que tiene la concentración de la fase sólida sobre la distribución espacial de la misma, se tomaron fotografías a diferentes suspensiones variando la intensidad del campo eléctrico.

Todos los aceites de silicón a una concentración del 5% en peso de sílica gel presentaron una estructura fibrilar, la cual se define mejor a un voltaje de 500 volts/mm (ver figura 1 (AS-100,5%,500)). Tales estructuras fibrilares han sido observadas en los aceites de silicón con partículas de sílica [capítulo 3, referencia 1] y en suspensiones diluidas por Gast y Zukoski [capítulo 3, referencia 1]. Sin embargo, a voltajes mayores o iguales a 1000 volts/mm la fase líquida comienza a tener actividad (ver figura 2 (AS-100,5%,1000)) produciendo un oscurecimiento en la parte superior de la figura, lo que da lugar a una posible modificación al arreglo espacial de la fase sólida. Es importante señalar que las fibrilas observadas en este caso son muy gruesas, presentándose en forma de ramificaciones.

FIGURA 1 (AS-100,5%,500)



FIGURA 2 (AS-100,5%,1000)



La suspensión basada en TCF presentó una estructura diferente al de los sillicones ver la figura 3 (TCF,5%,250). Este comportamiento puede estar influenciado por la constante dieléctrica del TCF siendo ésta del orden de 10 veces mayor que la de los aceites de sillicón. El efecto de esta variable se analizara posteriormente.

FIGURA 3 (TCF,5%,250)



Cuando los FER's tienen una concentración mayor o igual al 10% en peso de sílica gel no se observa la formación de estructuras fibrilares a voltajes del orden de 500 volts/mm (ver figura 4 (AS-100,10%,500)) pero a voltajes del orden de 1000 a 1500 volt/mm se empiezan formar estructuras semejantes a las fibrilares como se observa en la parte inferior de figura 5 (AS-100,10%,1000).

FIGURA 4 (AS-100,10%,500)



FIGURA 5 (AS-100,10%,1000)



Es importante mencionar que el AS-1000 a un voltaje de 250 volts/mm presenta ligeramente estructuras fibrilares a una concentración del 10% (ver figura 6 (AS-1000,10%,250)). En este caso probablemente la viscosidad del fluido favorezca la dispersión de las partículas. El efecto de la viscosidad de la fase líquida se discutirá más adelante.



FIGURA 6 (AS-1000,10%,250)

Cuando la concentración de las partículas es del orden del 20% en peso no se observan estructuras fibrilares como se muestra en la figuras 7 (DOP,20%,250) y 8 (DOP,20%,1250), 9 (TCF,20%,125) y 10 (TCF,20%,1250), y 11 (AS-100,20%,500) y 12 (AS-100,20%,0).

FIGURA 7 (DOP,20%,250)

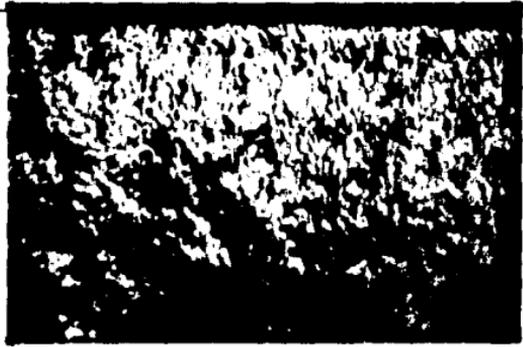


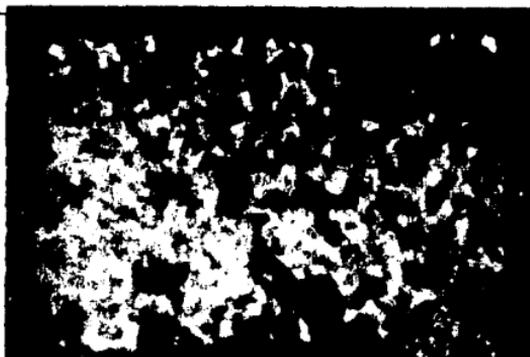
FIGURA 8 (DOP,20%,1250)



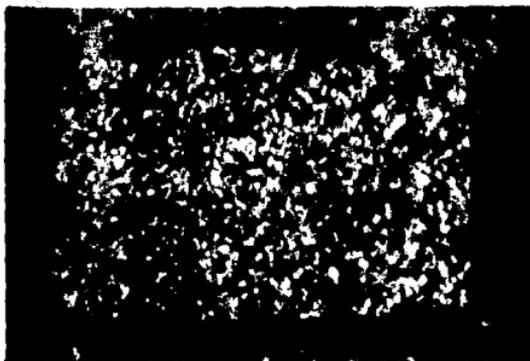
FIGURA 9 (TCF,20%,125)



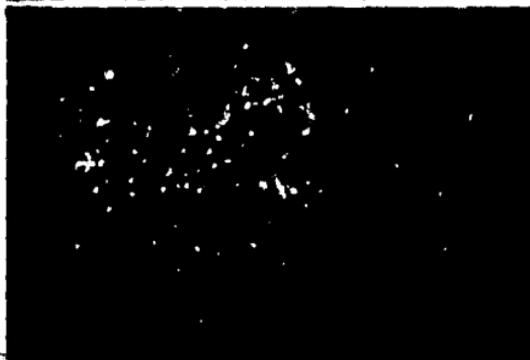
**FIGURA 10 (TCF,20%,1250)**



**FIGURA 11 (AS-100,20%,500)**



**FIGURA 12 (AS-100,20%,0)**



Sin embargo, cuando se compara la figura 12 (AS-100,20%,0) con la 11 (AS-100,20%,500) se observa que un incremento en el voltaje da lugar a que el número de los espacios en blanco y/o huecos aumenten. Esto posiblemente sea originado por la formación de aglomerados que ocasionarían una interacción de partículas muy fuerte, ya que éstas no tendrían el espacio suficiente para desplazarse entre los electrodos. Esto implicaría que la teoría de almacenamiento de agua propuesta por Stangroom (ver capítulo 3, referencia 12), en nuestras observaciones desempeñaría un papel importante, ya que el puente de hidrógeno no permitiría demasiada movilidad a las partículas ocasionando que éstas no puedan alinearse con el campo eléctrico y con ello aumentaría la compactación de los aglomerados en la medida en que el campo eléctrico se aumenta.

Es necesario mencionar que el DOP (figuras 7 (DOP,5%,250) y 8 (DOP,20%,1250)) y el TCF (figuras 9 (TCF,20%,125) y 10 (TCF,20%,1250)) presentan intensa actividad a esta concentración.

### **5.1.2.- EFECTO DE LA VISCOSIDAD DE LA FASE LIQUIDA SOBRE EL CAMBIO ESTRUCTURAL DE LOS FER'S.**

Tomando en cuenta que la viscosidad de la fase líquida juega un papel importante en la fuerza hidrodinámica de las suspensiones electroreológicas, en esta sección analizaremos la influencia que puede tener dicha viscosidad sobre el arreglo espacial de las partículas a diferentes voltajes.

Al comparar las estructuras fibrilares presentadas por los diferentes silicones (ver figuras 1 (AS-100,5%,500), 13 (AS-350,5%,500), 14 (AS-500,5%,500) y 15 (AS-1000,5%,500), podemos decir que a mayor viscosidad de la fase líquida se observa una mayor definición de las estructuras fibrilares posiblemente debido a una mejor dispersión de la fase sólida dando como resultado una menor sedimentación y posible aglomeración. El AS-350 presenta una discrepancia con el AS-100 en cuanto a la formación y definición de las estructuras, ya que éste último presenta una mejor definición de la estructura, probablemente esto se deba a que el AS-350 contenga algunas impurezas ya que es fabricado por una compañía diferente al de los otros silicones. Estas impurezas (polares) pudieran incrementar la actividad del fluido (parte superior en oscuro) ver figura 13 (AS-350,5%,500), dando como resultado global una apreciación no muy clara de la estructura formada.

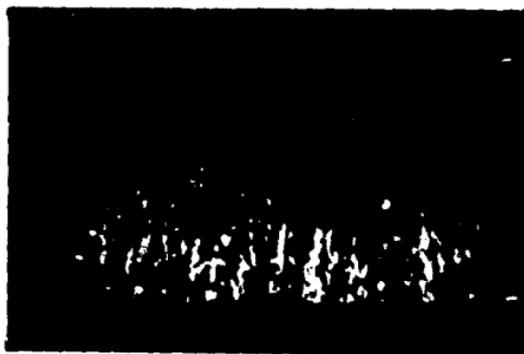


FIGURA 13 (AS-350,5%,500)

FIGURA 14 (AS-500,5%,500)



FIGURAS 15 (AS-1000,5%,500)



### 5.1.3.- EFECTO DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DE LA FASE LIQUIDA SOBRE EL CAMBIO ESTRUCTURAL DE LOS FER's.

En esta sección se discutirá si la fase líquida de los FER's juega un papel adicional al de ser aislante de la fase sólida, por tal razón se analiza la influencia de la constante dieléctrica sobre el arreglo espacial de las partículas.

Antes de iniciar el análisis mencionaremos que en las fotografías del AS-100 la parte oscura que se observa no es originada por la actividad de la fase líquida sino por un mal enfoque de la muestra.

El arreglo espacial de la fase sólida en los FER's se ve influenciada totalmente por la constante dieléctrica de la fase líquida como se puede apreciar en las figuras 16 (AS-100, 5%, 1000) y 17 (TCF, 5%, 1250). De ellas deducimos que la fase líquida tiene una gran contribución en el comportamiento estructural de las suspensiones electroreológicas, esto puede apreciarse en el sistema basado en el AS-100 (constante dieléctrica 2.42) en donde se observa una estructura fibrilar y en el TCF (constante dieléctrica 25.81) se presenta una estructura triangular

Es necesario aclarar que en el DOP sólo se observó el comportamiento estructural a una concentración del 20% en donde no se formó ninguna estructura.

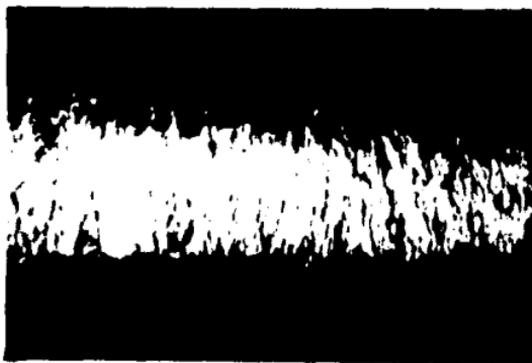


FIGURA 16 (AS-100, 5%, 1000)

FIGURA 17 (TCF,5%,1250)



Posiblemente la presencia de una mayor transferencia de carga por parte de la fase líquida (TCF) sobre las superficies de las partículas favorezca la acumulación de éstas hacia uno de los electrodos donde hay un mayor grosor (de partículas) como se observa en la figura 17 (TCF,5%,1250). A este fenómeno se le conoce como electroforesis [capítulo 1, referencia 6].

#### 5.1.4.- EFECTO DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO ELECTRICO SOBRE EL CAMBIO ESTRUCTURAL DE LOS FER'S.

Dado que la intensidad del campo eléctrico juega un papel importante en la respuesta electroreológica, se analiza el posible efecto sobre la formación de estructuras en suspensiones de aceite de silicón-sílica gel, DOP-sílica gel y TCF-sílica gel.

Cuando se aplica a los FER's (constituidos con aceites de silicón) un voltaje del orden de 250 volts/mm, estos presentan una estructura fibrilar poco definida (figuras 18 (AS-100,5%,250), 19 (AS-350,5%,250), 20 (AS-500,5%,250) y 21 (AS-1000,5%,250)) y de mayor grosor que a un voltaje mayor (500 volts/mm) ver las figuras 1 (AS-100,5%,500), 14 (AS-500,5%,500) y 15 (AS-1000,5%,500). Las estructuras fibrilares observadas en los aceites de silicón a 500 volts/mm son más definidas y con algunas ramificaciones. Este comportamiento posiblemente se deba a que las partículas no están lo suficientemente polarizadas para que puedan alinearse paralelamente al campo. Al aumentar la intensidad de éste existe una mayor interacción partícula-partícula lo que da lugar a un mayor efecto electroreológico, sin embargo, se observa actividad por parte del fluido y las partículas posiblemente tiendan a aglomerarse hacia uno de los electrodos, preferentemente el negativo (parte oscura de las figuras), ver figuras 2 (AS-100,5%,1000), 22 (AS-500,5%,1500) y 23 (AS-1000,5%,1000), observándose mejor definición estructural en los dos últimos casos.

FIGURA 18 (AS-100,5%,250)

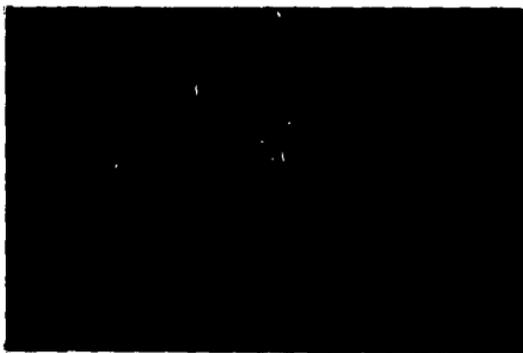


FIGURA 19 (AS-350,5%,250)



FIGURA 20 (AS-500,5%,250)



FIGURA 21 (AS-1000,5%,250)

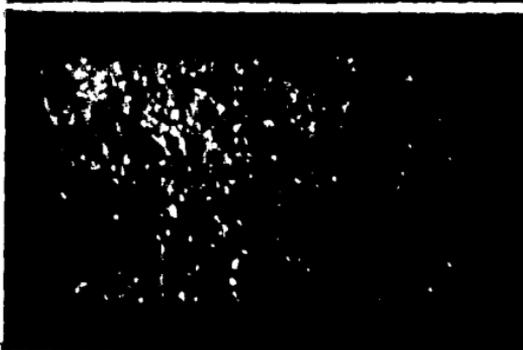


FIGURA 22 (AS-500,5%,1500)

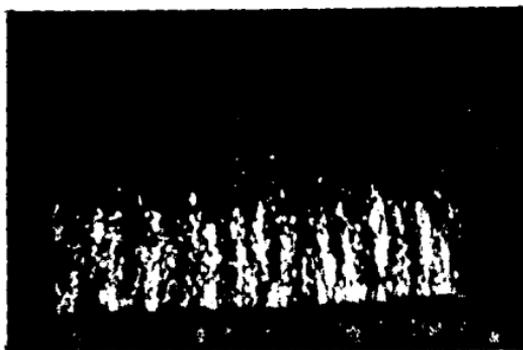


FIGURA 23 (AS-1000,5%,1500)



Es necesario remarcar que la suspensión compuesta con el AS-1000 a un voltaje de 1000 volts/mm la fase líquida no presenta actividad y la estructura fibrilar es muy clara (ver la figura 24 (AS-1000,10%,1000)), sin embargo, los otros aceites de silicón no tienen una estructura fibrilar definida, además, las fases líquidas sí

presentan actividad (figuras 5 (AS-100,10%,1000), 25 (AS-350,10%,1500) y 26 (AS-500,10%,500). Esto último confirma la importancia que tiene la viscosidad de la fase líquida sobre el arreglo estructural/espacial de la fase sólida, la cual a su vez se reflejará en el comportamiento reológico de las suspensiones, ya que la propiedades de flujo y estructurales están íntimamente ligadas, tomando en cuenta las bases del origen del efecto electroreológico observado por primera vez por Winslow [capítulo 1, referencia 1].

FIGURA 24 (AS-1000,10%,1000)

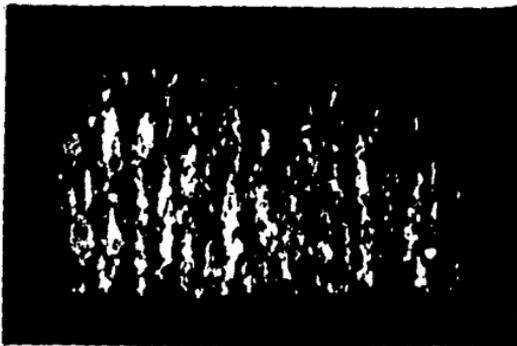


FIGURA 25 (AS-350,10%,1500)

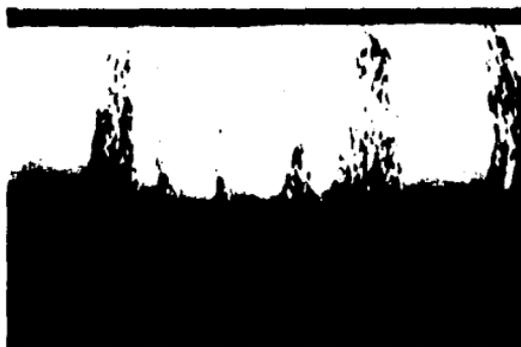


FIGURA 26 (AS-500,10%,500)



Por otra parte, en las suspensiones basadas en fases líquidas con una constante dieléctrica variable, en este caso el TCF, presenta una estructura triangular posiblemente por el efecto de apantallamiento (ver punto 5.2.1.2)[capítulo 1, referencia 1] y la fase líquida presenta actividad (parte oscura de la figura, electrodo positivo) a 250 volts/mm, tales fenómenos aumentan su intensidad a 500 volts/mm (ver figuras 3 (TCF,5%,250) y 27 (TCF,5%,500)). Al incrementar el voltaje a 1250 volts/mm se observa una mayor definición estructural debido a un aumento del efecto de apantallamiento (ver figura 17 (TCF,5%,1250)) y la fase líquida tiene intensa actividad (parte oscura de la figura).

FIGURA 27 (TCF,5%,500)



Es interesante mencionar que el TCF a un voltaje de 2000 volts/mm tenía tal actividad que llegaba a romper la estructura formada.

## 5.2.- ANALISIS REOLOGICO DE LOS FER's.

El análisis del comportamiento reológico de los FER's se dividirá en dos partes, en la primera se analizará el efecto de la constante dieléctrica de la fase líquida y en la segunda el efecto de la viscosidad de la misma fase.

Se prepararon FER's con una concentración del 20% en peso de sílica gel, variando la constante dieléctrica (AS-100, DOP y TCF) y viscosidad de la fase líquida (AS-100, AS-350, AS-500 y AS-1000).

La nomenclatura a emplear será la misma que la en la sección anterior, es decir, para referirse a los FER's que tienen como fase líquida aceites de silicón se abreviará como AS-#, siendo # el número característico de los silicones indicando su viscosidad en centistokes (cst), el Tricresil Fosfato como TCF y para el Dioctil Ftalato como DOP.

### 5.2.1- EFECTO DE LA CONSTANTE DIELECTRICA.

Con la finalidad de determinar la influencia de la constante dieléctrica de la fase líquida de los FER's sobre la respuesta electroreológica (RE) y comportamiento en flujo de estos, se evaluaron tres diferentes suspensiones a un intervalo de velocidades de corte de 0.1 a 26  $\text{seg}^{-1}$  y campos eléctricos de 0 a 1.25 kV/mm.

### 5.2.1.1.- INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE CORTE SOBRE EL ESFUERZO DE CORTE.

Las figuras 28-30 muestran el comportamiento del esfuerzo de corte como una función de la velocidad de corte de diferentes suspensiones electroreológicas en una escala logarítmica.

En este caso las constantes dieléctricas de las fases líquidas son diferentes (2.42, 4.63 y 25.81) y la viscosidad es aproximadamente constante.

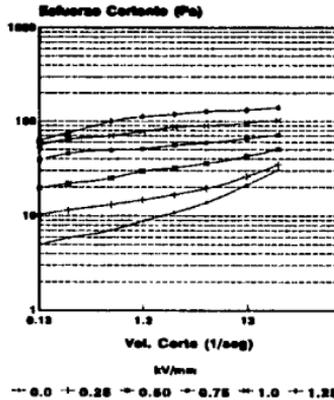


FIG. 28.-Esfuerzo de corte vs velocidad de corte para el AS-100 + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

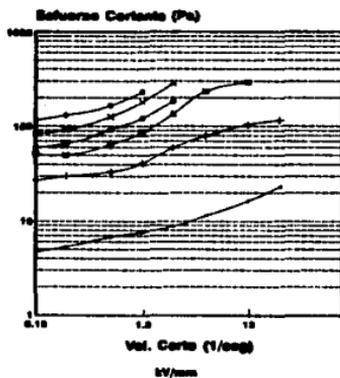


FIG. 29.-Esfuerzo de corte vs velocidad de corte para el DOP + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

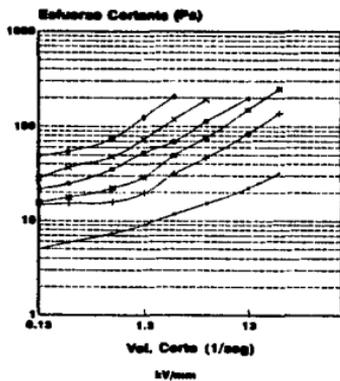


FIG. 30.-Esfuerzo de corte vs velocidad de corte para el TCF + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

De las figuras podemos observar que estas suspensiones presentan un esfuerzo de cedencia, es decir, que necesitan un esfuerzo inicial para empezar a fluir y en la medida que la intensidad del campo eléctrico se incrementa, el esfuerzo de cedencia también aumenta. Esto es debido a que la intensidad del campo eléctrico favorece la formación de fibrillas las cuales aumentan la resistencia al flujo. Una vez pasado este esfuerzo se presenta una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte (ver figura 28), lo cual nos indica que una fase líquida con una constante dieléctrica baja (2.42) presenta un comportamiento reológico del tipo Plástico de Bingham [capítulo 2, referencia 10]. El modelo de Bingham es el que mejor describe el comportamiento reológico de los FER's reportado por diferentes autores [capítulo 2, referencia 5, 6 y 7]. Sin embargo, en la medida en que se incrementa la constante dieléctrica de la fase líquida de la suspensión, se observa una desviación de dicho comportamiento (ver figura 29 y 30).

Cuando se comparan las figura 28-30 se observa en el FER que tiene una fase líquida con una constante dieléctrica mayor (TCF) sufre un incremento abrupto del esfuerzo a altas velocidades de corte. Este comportamiento posiblemente se deba al cambio en el arreglo estructural en la suspensión mostrado en las figuras 3 y 17 de la sección 5.1.

#### 5.2.1.2.- INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE CORTE SOBRE LA VISCOSIDAD.

Se puede observar en las figuras 31-33 (ver datos en anexo páginas 1-3 respectivamente) el comportamiento en flujo de los sistemas AS-100, DOP y TCF. En

---

estas se observa que los FER's tienen un comportamiento reológico no-newtoniano parecido al de un material Pseudo-plástico [capítulo 2, referencia 10], ya que a bajas velocidades la viscosidad es grande y disminuye drásticamente en la medida que la velocidad de corte se incrementa. Se ha observado que un incremento en la intensidad del campo eléctrico causa un aumento de la viscosidad del FER, principalmente a bajas velocidades de corte [capítulo 2, referencia 5, 6 y 7].

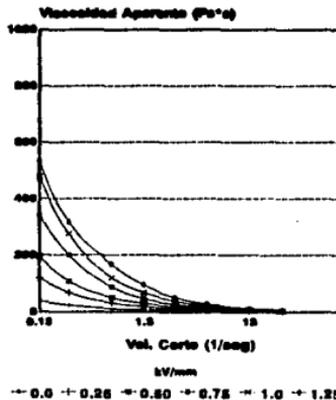
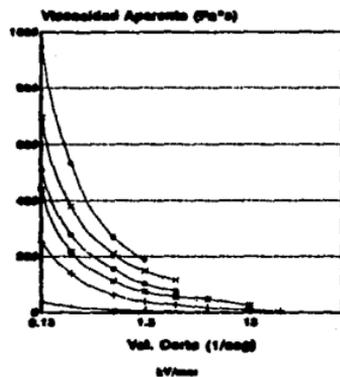
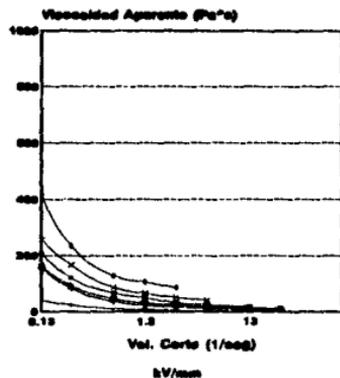


FIG. 31.-Viscosidad aparente vs velocidad de corte para el AS-100 + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.



— 0.0 — 0.25 — 0.50 — 0.75 — 1.0 — 1.25  
 FIG. 32.-Viscosidad aparente vs velocidad de corte para el DOP + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.



— 0.0 — 0.25 — 0.50 — 0.75 — 1.0 — 1.25  
 FIG. 33.-Viscosidad aparente vs velocidad de corte para el TCF + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

Por otra parte es claro que el FER que tiene una fase líquida con una constante dieléctrica intermedia (4.63) presenta la mayor viscosidad (figura 32) en tanto que el que tiene la constante dieléctrica alta (25.81) tiene la menor viscosidad (figura 33).

En el caso del DOP podría haber mayor interacción partícula-partícula por lo que la estructura formada estaría compuesta por columnas (fibrilas muy gruesas) ramificadas las cuales darán como resultado una mayor resistencia al flujo.

Por otra parte cuando la permitividad es muy grande caso del TCF, la disminución de la viscosidad posiblemente se deba a que en la suspensión se produce un efecto de apantallamiento [capítulo 1, referencia 1]. Probablemente lo que está ocurriendo es que el número de cargas en la superficie de la partícula producida por el campo eléctrico se ven disminuidas por las cargas inducidas en la fase líquida, originando una disminución en la interacción partícula-partícula. Esto dará como resultado una disminución en la resistencia al flujo y por consiguiente una respuesta electroreológica menor.

Es necesario mencionar en este caso el análisis realizado por Klingenber y Zukoski [capítulo 2, referencia 8] para explicar el comportamiento de nuestras suspensiones basadas en el AS-100, ya que ellos analizaron el comportamiento reológico de partículas de sílica (con un diámetro promedio de 57 micras) en un aceite de maíz. Klingenber y Zukoski muestran que las partículas al aplicarles un campo eléctrico forman fibrilas, pero al estar a una velocidad de corte superior a  $1.5 \text{ seg}^{-1}$  las

partículas tendían a adherirse (aglomerarse) al electrodo estático y en el móvil formaban una pequeña capa delgada de las mismas. Esta deformación de la estructura da lugar a una disminución de la viscosidad de la suspensión con el incremento en la velocidad de corte.

Al hacer el ajuste de datos de la viscosidad aparente vs velocidad de corte para los FER's aquí mencionados se encontró que los resultados se ajustan con una muy buena precisión a una función del tipo ley de la potencia (ver anexo páginas 1-3).

#### **5.2.1.3.- INFLUENCIA DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DE LA FASE LIQUIDA EN EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD DEL FER.**

Al hacer este análisis se decidió utilizar los incrementos en viscosidad de los FER's dado que resulta más interesante observar como se comportan éstos con respecto a la constante dieléctrica de la fase líquida. Los resultados se muestran en las figuras 34-37.

En ausencia de campo eléctrico las suspensiones presentan un comportamiento no-newtoniano del tipo Pseudo-plástico. Cuando el campo eléctrico se incrementa se observa un máximo (figuras 35-37), el cual se hace evidente a 1.25 kV/mm.

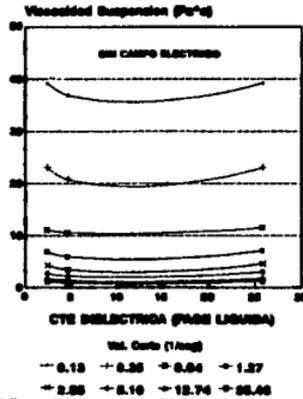


FIG. 34.-Viscosidad (suspensión) vs constante dieléctrica de la fase líquida a diferentes velocidades de corte.

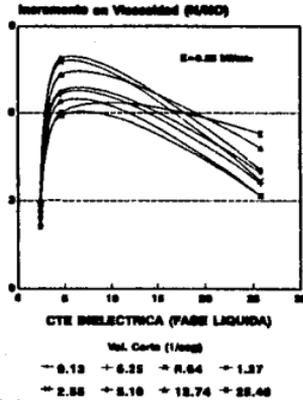


FIG. 35.-Incremento en viscosidad vs constante dieléctrica de la fase líquida a diferentes velocidades de corte.

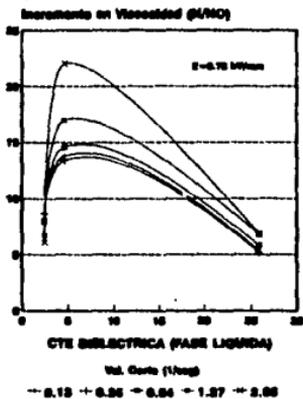


FIG. 36.-Incremento en viscosidad vs constante dieléctrica de la fase líquida a diferentes velocidades de corte.

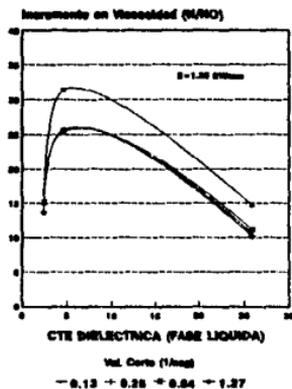


FIG. 37.-Incremento en viscosidad vs constante dieléctrica de la fase líquida a diferentes velocidades de corte.

En este caso el DOP presenta un mayor incremento en la viscosidad que el AS-100 y el TCF, lo que nos indica que una fase líquida con una constante dieléctrica moderada favorece una mayor interacción partícula-partícula y da lugar a la posibilidad de que exista un punto óptimo (siguiendo la tendencia de las curvas de la figura 37) en el que se obtenga un incremento en la viscosidad mayor.

En la figuras 36 y 37 se observa que el FER constituido por una fase líquida de baja constante dieléctrica (AS-100) muestra los mayores incrementos en viscosidad a bajas velocidades (independientemente del campo eléctrico) y a medida que se incrementa ésta disminuyen dichos incrementos. Esto es debido a que las bajas velocidades la estructura no parece ser alterada significativamente, sin embargo cuando la velocidad de corte crece las estructuras se van destruyendo.

En las figuras 35-37 se observa que los FER's que están constituidos por una fase líquida con una constante dieléctrica moderada (DOP) y alta (TCF) presentan la tendencia en donde a mayores velocidades de corte tienen los mayores incrementos en viscosidad del FER. Tal comportamiento probablemente sea causado por dos fenómenos diferentes: en el DOP es probable que sea originado por una cambio estructural ya que se observo (experimentalmente al realizar la evaluación) que en la medida en que se aumenta el campo eléctrico la suspensión presenta un fenómeno de gelación [capítulo 2, referencia 15], es decir, que la suspensión se solidifica a medida que se incrementa el campo eléctrico, por lo que será necesario realizar con sumo cuidado experimentos posteriores. En la suspensión que contiene al TCF

probablemente ocurra un fenómeno electroviscoso [capítulo 1, referencia 6], es decir, que la fase líquida al estar en presencia de un campo eléctrico grande sufre un incremento en su viscosidad por lo que contribuirá a la viscosidad del sistema (TCF-sfíca). Para estudios posteriores habrá que tener en cuenta esta posibilidad o también es probable que de acuerdo a la estructura formada por este sistema a altas velocidades de corte y campos eléctricos crecerá el aglomerado de partículas en uno de los electrodos, dando lugar a una fase rica en partículas y otra en fluido, es decir, se presente el fenómeno de electroforesis.

#### 5.2.1.4.- EFECTO DEL CAMPO ELECTRICO SOBRE EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD DE LOS FER's.

Al hacer este análisis se decidió utilizar los incrementos en viscosidad dado que resulta más interesante ver el número de veces que se incrementa la viscosidad de los FER's como una función del campo eléctrico. Las figuras que se presentan en esta sección están en una escala lineal.

En las figuras 38-40 (ver datos en anexo páginas 4-6 respectivamente) se observa que a una velocidad de corte constante la respuesta electroreológica crece con el campo eléctrico. Cuanto mayor sea el campo eléctrico el momento dipolar de las partículas es mayor así como la fuerza de interacción entre ellas [capítulo 3, referencia 18].

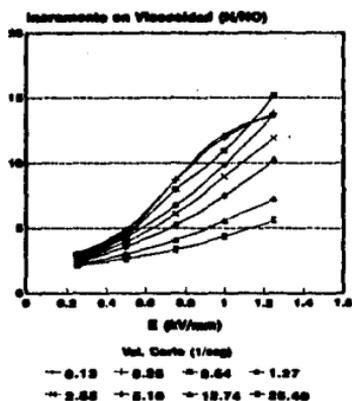


FIG. 38.-Incremento en viscosidad vs campo eléctrico para el AS-100 + SILICA (20%) a diferentes velocidades de corte.

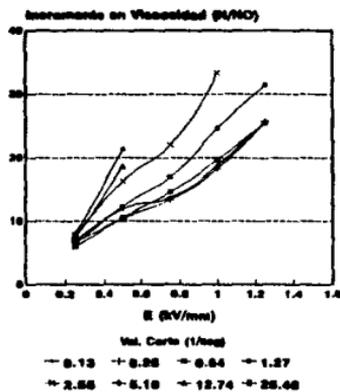


FIG. 39.-Incremento en viscosidad vs campo eléctrico para el DOP + SILICA (20%) a diferentes velocidades de corte.

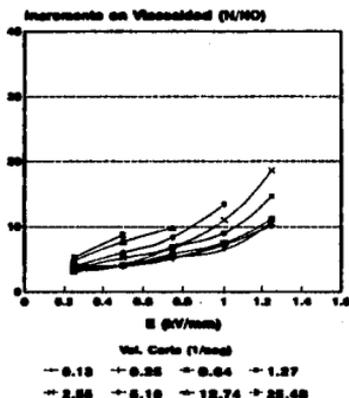


FIG. 40.-Incremento en viscosidad vs campo eléctrico para el TCF + SILICA (20%) a diferentes velocidades de corte.

En la figuras 39 y 40 se observa que el DOP y el TCF presentan una tendencia en donde los mayores incrementos en viscosidad se presentan a velocidades de corte y campos altos. Esto es debido posiblemente a que el DOP presenta cambio estructurales y el TCF un fenómeno electroviscoso (ver punto 5.2.1.3).

En la figura 39 se observa que la suspensión basada en el DOP presenta incrementos en viscosidad del orden de 35 veces, esto corresponde a un FER que tiene una constante dieléctrica moderada (4.63).

Al hacer el ajuste de los datos de incrementos de viscosidad vs campo eléctrico se encontró que el AS-100 se ajustaba con buena precisión a una función lineal (ver

anexo página 4), en cambio el DOP y el TCF se ajustan a una función exponencial (ver anexo páginas 5-6 respectivamente). Hay que recordar que estas fases líquidas tienen una constante dieléctrica moderada (4.63) y alta (25.81).

Con el fin de mostrar si los sistemas DOP-Sílica y TCF-Sílica se ajustan como la mayoría de los FER's, a una relación lineal entre incremento de la viscosidad ( $N/NO$ ) y el campo eléctrico al cuadrado ( $E^2$ ) [capítulo 1, referencia 6], se decidió hacer el ajuste de datos. De la regresión realizada se encontró que estos sistemas se ajustan a una relación lineal, al igual que el AS-100-Sílica (ver anexo páginas 7-9).

#### 5.2.2.- EFECTO DE LA VISCOSIDAD.

Con la finalidad de determinar la influencia de la viscosidad de la fase líquida de los FER's sobre la Respuesta Electrorreológica (RE) y el comportamiento en flujo de éstos, se evaluaron cuatro diferentes suspensiones a un intervalo de velocidades de corte de 0.1 a 26  $\text{seg}^{-1}$  y campos de 0 a 1.25 kV/mm. En este caso las viscosidades de la fase líquida son 105, 333, 505 y 980  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  y sus constantes dieléctricas son parecidas.

##### 5.2.2.1.- INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE CORTE SOBRE EL ESFUERZO DE CORTE.

En las figuras 41-44 se muestra el logaritmo del esfuerzo de corte como una función de la velocidad de corte de las diferentes suspensiones electrorreológicas.

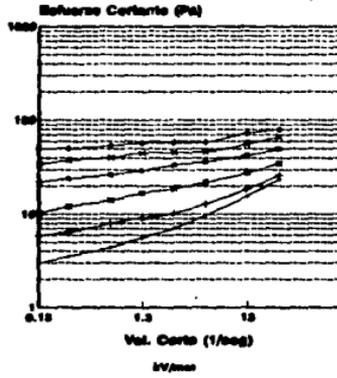


FIG 41.-Esfuerzo de corte vs velocidad de corte para el AS-100 + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

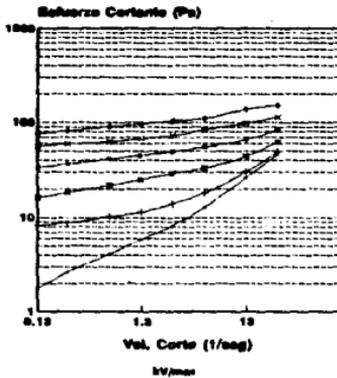


FIG. 42.-Esfuerzo de corte vs velocidad de corte para el AS-350 + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

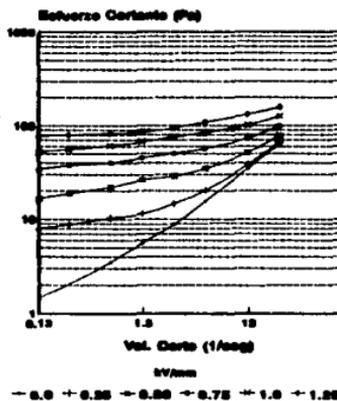


FIG. 43.-Esfuerzo de corte vs velocidad de corte para el AS-500 + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

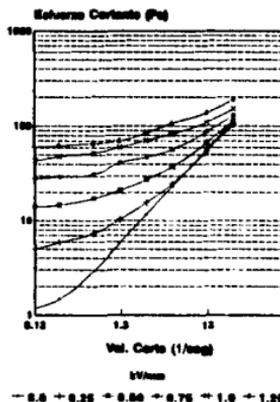


FIG. 44.-Esfuerzo de corte vs velocidad de corte para el AS-1000 + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

En las figuras 41-44 se observa que los FER's presentan un esfuerzo de cedencia, es decir, un esfuerzo mínimo para iniciar su flujo y en la medida en que se incrementa la intensidad del campo eléctrico el esfuerzo de cedencia también se incrementa. Como se ha dicho la formación de una estructura fibrilar es la causa de la existencia de un esfuerzo de cedencia, dando lugar a un comportamiento reológico del tipo Plástico de Bingham [capítulo 2, referencia 5, 6 y 7]. Este comportamiento se observa claramente en las figuras 41 y 42, sin embargo, en la 43 y 44 se aprecia la formación de una meseta la cual se hace más evidente en la medida en que se incrementa la viscosidad de la fase líquida (ver figuras 44). Estas curvas de flujo podrían representar el desarrollo de un esfuerzo de cedencia [capítulo 2, referencia 8] en un intervalo de velocidades de corte de entre 0.13 y 0.64  $\text{seg}^{-1}$ .

Por otra parte, se puede apreciar que el esfuerzo de corte tiende hacia un valor el cual se hace independientemente del campo eléctrico y la viscosidad de la fase líquida, aunque a mayores viscosidades se hace más evidente. Esto probablemente se deba a que viscosidades menores a 1000 cst exista un estructuramiento de las partículas causado por una posible aglomerado de ésta.

A partir de lo explicado anteriormente podemos decir que el modelo de Bingham podría ser empleado para modelar el comportamiento reológico de los FER's a diferentes viscosidades de la fase líquida. Aunque este modelo no puede predecir el esfuerzo de los FER's en la transición de bajas a altas velocidades de corte donde se presenta un cambio de la pendiente de la curva esfuerzo de corte vs velocidad de corte [capítulo 3, referencia 8].

---

### 5.2.2.2.- INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE CORTE SOBRE LA VISCOSIDAD.

Con el fin de determinar el comportamiento en flujo de los FER's, los resultados de la evaluación de viscosidad se representan como una función de la velocidad de corte (figuras 45-48) en una escala semilogarítmica.

Al observar las figuras 45-48 (ver datos en anexo páginas 10-13 respectivamente) se deduce que los FER's muestran un comportamiento reológico Pseudo-plástico en todo el intervalo de velocidades evaluado, ya que su viscosidad decrece cuando aumenta la velocidad de corte (capítulo 2, referencia 10).

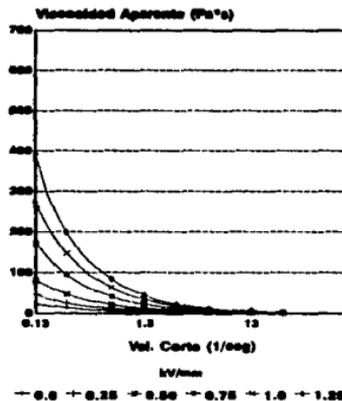


FIG. 45.-Viscosidad aparente vs velocidad de corte para el AS-100 + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

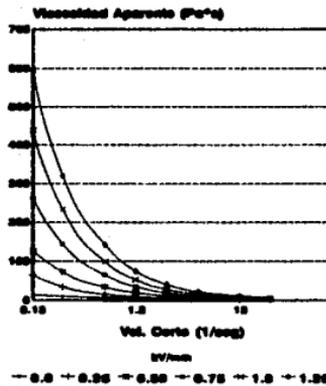


FIG. 46.-Viscosidad aparente vs velocidad de corte para el AS-350 + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

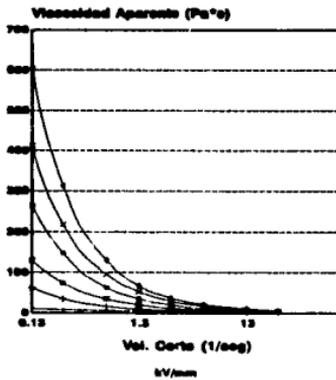


FIG. 47.-Viscosidad aparente vs velocidad de corte para el AS-500 + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

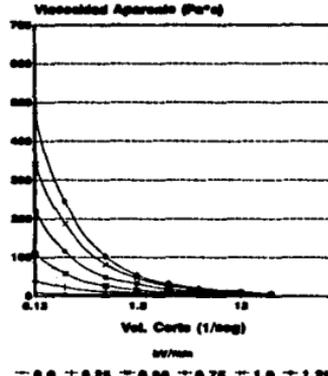


FIG. 48.-Viscosidad aparente vs velocidad de corte para el AS-1000 + SILICA (20%) a diferentes campos eléctricos.

Este comportamiento es más claro en la medida en que se incrementa el campo eléctrico ya que las estructuras fibrilares producidas por éste ocasionan un aumento de la viscosidad y cuando las velocidades corte son altas rompen las estructuras fibrilares por lo que la viscosidad de la suspensión decae hasta casi alcanzar el valor de viscosidad en ausencia de un campo eléctrico.

Al analizar la figuras 45-48, se observa que el AS-350 (figura 46) y AS-500 (figura 47) tienen una viscosidad mayor a bajas velocidades ( $0.13 \text{ seg}^{-1}$ ) y a altos campos (1.25 kV/mm) que los sistemas AS-100 (figura 45) y AS-1000 (figura 48).

Por otra parte, el sistema basado en el AS-100 (menor viscosidad) presenta la menor viscosidad. Si consideramos que el efecto electroreológico depende de una fuerza de interacción debido a la polarización, está se ve afectada por la movilidad de las partículas en el medio de baja viscosidad.

En el caso del AS-350 y AS-500 probablemente presenten la mayor respuesta electroreológica debido a que la densidad de la partícula y la fase líquida sean semejantes, principalmente en el AS-500. Con lo cual se reduce la movilidad de las partículas y la fuerza de interacción es mayor.

Por lo antes mencionado podemos decir que la respuesta electroreológica se ve favorecida en sistemas que tienen una fase líquida con una moderada viscosidad (333 y 505 mPa\*s).

En este campo será interesante determinar el número de Mason (Mn) para las estructuras ya que es una relación entre la fuerza hidrodinámica y las de polarización.

Al hacer el ajuste de datos de la viscosidad aparente vs velocidad de corte para los FER's aquí mencionados se encontró que se ajustan con buena precisión a una función del tipo ley de la potencia (ver anexo páginas 10-13).

### 5.2.2.3.- INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD DE LA FASE LIQUIDA SOBRE EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD DE LOS FER'S.

Con el fin de entender el efecto de la viscosidad de la fase líquida sobre la viscosidad de los FER's se construyeron las curvas de flujo correspondientes, estando éstas en una escala lineal.

En la figura 49, se observa que el FER que presenta mayor viscosidad sin campo eléctrico es el AS-100 (105 mPa\*s), le sigue el AS-350 (333 mPa\*s), AS-500 (505 mPa\*s) y por último el AS-1000 (980 mPa\*s), este comportamiento se observa hasta una velocidad de  $1.27 \text{ seg}^{-1}$ , a velocidades mayores se invierte dicho comportamiento. Esto no se esperaba ya que el AS-1000 tiene mayor resistencia al flujo por su mayor viscosidad, de tal manera que el FER que lo contiene debería tener una mayor viscosidad (sin campo). Por tal motivo fue necesario verificar los datos de viscosidad de los FER's vs velocidad de corte (figura 50) en donde se observa de nuevo dicho comportamiento (sin campo).

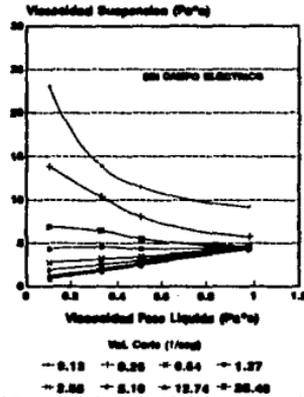


FIG. 49.-Viscosidad (suspensión) vs viscosidad de la fase líquida a diferentes velocidades de corte.

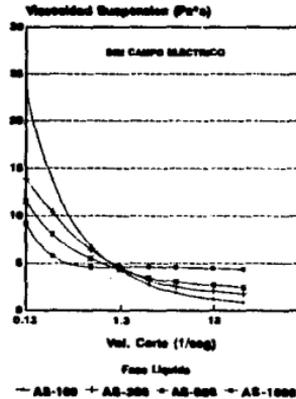


FIG. 50.-Viscosidad (suspensión) vs velocidad de corte para diferentes fases líquidas.

En un principio se pensó que esta disminución en la viscosidad podría ser debido a la formación de estructuras del tipo aglomerados ocasionadas por mala dispersión de las partículas.

Con la finalidad de poder corroborar nuestra hipótesis y dar una explicación a tal comportamiento, se evaluaron los sistemas en un viscosímetro Brookfield RVT empleando una geometría estándar, los resultados mostrados en la figura 51 no pudieron dar una respuesta clara. Pensando en la posibilidad de un error de medición se sugirió emplear un viscosímetro de mayor confiabilidad siendo éste un Brookfield digital con accesorios de cilindros concéntricos. Los resultados obtenidos no se muestran debido a que el tamaño de la geometría no permitió construir las curvas de flujo a varias velocidades de corte.

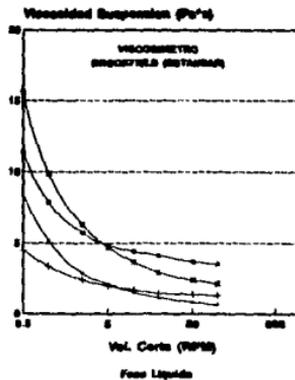


FIG. 51.-Viscosidad (suspensión) vs velocidad de corte para fases líquidas diferentes y sin campo eléctrico.

Si realmente existiera la posibilidad de la presencia de aglomerados de partículas en la fase líquida de menor viscosidad, el módulo elástico del sistema (AS-100-silica) debería ser grande. Para obtener este comportamiento fue necesario realizar evaluaciones en un viscosímetro (reómetro) con capacidad para mediciones dinámicas. El viscosímetro empleado fue un Bohlin facilitado por la UAM-Iztapalapa. Los resultados nos muestran que a bajas frecuencias (hasta 2 Hz) el FER (ver anexo gráfica 1 y 2) con la fase líquida de menor viscosidad (AS-100) presenta el mayor módulo elástico  $G'$  (tendencia a comportarse como un sólido). Por otra parte, el FER que tenía una fase líquida de mayor viscosidad (AS-1000) muestra un módulo viscoso ( $G''$ ) mayor (tendencia a comportarse como un líquido).

Cabe mencionar que si un FER tiene un módulo elástico grande no significa que el módulo viscoso deba ser pequeño, debido a que uno de los módulos es el dominante [capítulo 5, referencia 1]. Como se observa en la gráfica 1 del anexo, el FER basado en el AS-100 tiene un  $G'$  de aproximadamente 80 Pa a 20 Hz, mientras que su  $G''$  a la misma frecuencia es de aproximadamente 120 Pa (ver anexo, gráfica 2). En tanto que el FER compuesto por el AS-1000 presenta un  $G'$  de 50 Pa a 20 Hz (ver anexo, gráfica 1) y tiene un  $G''$  de aproximadamente 300 Pa a la misma frecuencia (ver anexo, gráfica 2). Por lo que su  $G''$  es 6 veces mayor que su  $G'$ .

Retomando lo mencionado respecto a los datos de las figuras 49-51, y el análisis de los datos obtenidos del reómetro, consideramos que en cierto grado nuestra hipótesis estaba aclarada, al menos por la tendencia mostrada, es decir, las suspensiones que tengan una fase líquida de baja viscosidad tal como el AS-100 y un tamaño de partícula grande tienen mayor posibilidad de presentar una aglomeración de dichas partículas y por ende la posible sedimentación de ésta con el tiempo. Estos aglomerados se van destruyendo en la medida que la velocidad de corte se incrementa hasta llegar a dispersar totalmente las partículas. Pero será necesario hacer más experimentos para explicar completamente dicho fenómeno. Se considera que al llegar a una velocidad crítica en donde los aglomerados son destruidos, el factor dominante del comportamiento de la suspensión será el peso molecular del fluido base el cual está íntimamente relacionado a su viscosidad.

En las figuras 52-54 se observa que los mayores incrementos en la viscosidad de los FER's se presentan en las fases líquidas con mayor viscosidad (AS-350, AS-500 y AS-1000), tales incrementos se hacen evidentes a bajas velocidades de corte (hasta  $1.27 \text{ seg}^{-1}$ ) y a altos campo eléctricos ( $1.25 \text{ kV/mm}$ ). En dichas figuras se puede observar una tendencia en la que a mayor viscosidad de la fase líquida y a altas velocidades de corte independientemente del campo eléctrico el incremento en viscosidad disminuirá drásticamente. Las figuras 53 y 54 muestran que el último gran incremento en la viscosidad (para el caso del AS-1000) ocurre a la velocidad de  $0.64 \text{ seg}^{-1}$ .

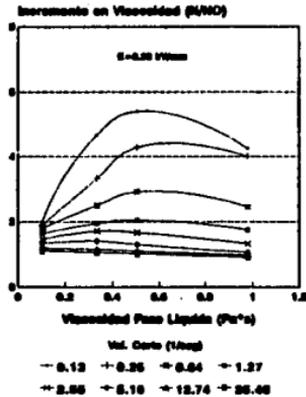


FIG. 52.-Incremento en viscosidad vs viscosidad de la fase líquida a diferentes velocidades de corte.

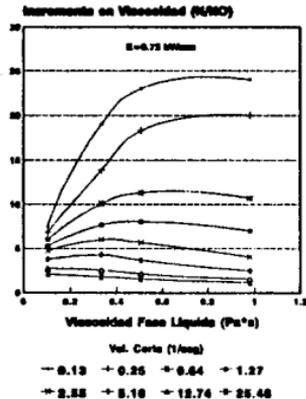


FIG. 53.-Incremento en viscosidad vs viscosidad de la fase líquida a diferentes velocidades de corte.

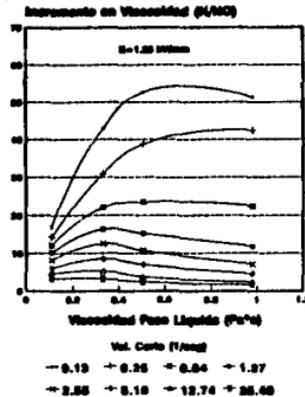


FIG. 54.-Incremento en viscosidad vs viscosidad de la fase líquida a diferentes velocidades de corte.

Es importante señalar que aquellas fases líquidas en donde la dispersión de la fase sólida sea mejor presentará un mejor arreglo espacial de ésta con el campo eléctrico y por lo tanto un comportamiento reológico favorable desde el punto de vista tecnológico.

#### 5.2.2.4.- EFECTO DEL CAMPO ELECTRICO SOBRE EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD DE LOS FER's.

Con el fin de analizar como se ven afectados los incrementos en viscosidad de los FER's como una función del campo eléctrico, se graficaron los datos en una escala lineal.

Al comparar las figuras 55-58 (ver datos en anexo páginas 14-17 respectivamente) se observa que los mayores incrementos en viscosidad de los FER's se ven favorecidos por las fases líquidas con una viscosidad grande en presencia de elevados campos eléctricos (1.25 kV/mm) y a bajas velocidades de corte (0.13  $\text{seg}^{-1}$ ).

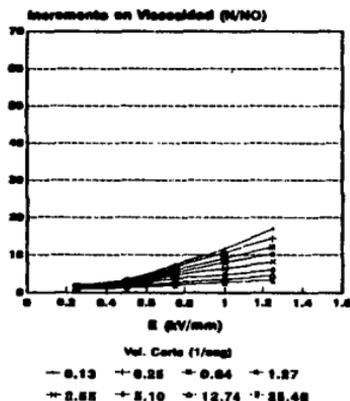


FIG. 55.-Incremento en viscosidad vs campo eléctrico para el AS-100 + SILICA (20%) a diferentes velocidades de corte.

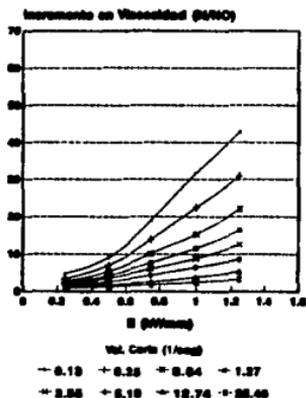


FIG. 56.-Incremento en viscosidad vs campo eléctrico para el AS-350 + SILICA (20%) a diferentes velocidades de corte.

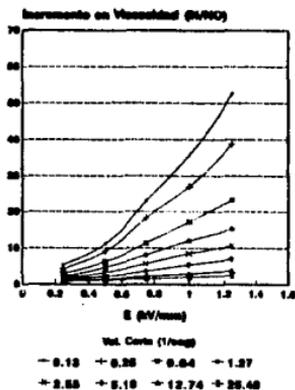


FIG. 57.-Incremento en viscosidad vs campo eléctrico para el AS-500 + SILICA (20%) a diferentes velocidades de corte.

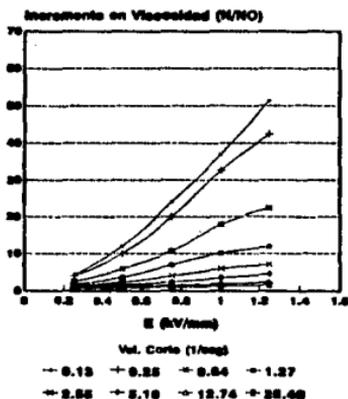


FIG. 58.-Incremento en viscosidad vs campo eléctrico para el AS-1000 + SILICA (20%) a diferentes velocidades de corte.

Al hacer el ajuste de los datos de incrementos en la viscosidad como una función del campo eléctrico para los FER's aquí analizados (aceites de silicón) se encontró que se ajustan con buena precisión a una función lineal (ver anexo páginas 14-17) y al hacer el ajuste de incrementos en la viscosidad (N/NO) como una función del campo eléctrico al cuadrado ( $E^2$ ) se encontró que se ajustan como todos los FER's [capítulo 1, referencia 6] a una relación lineal (ver anexo páginas 18-21).

Se ha reportado que partículas con un alto contenido de humedad (mayores al 8% en peso) puede influir negativamente en la respuesta electroreológica [capítulo 4, referencia 1]. Esto se puede apreciar claramente al comparar las figuras 28 y 41 de esfuerzo de corte vs velocidad de corte y las figuras 31 y 45 de viscosidad aparente vs velocidad de corte las cuales pertenecen al FER que tiene como fase líquida al AS-100. En estas figuras se muestra que una fase sólida con un contenido de agua menor (5% en peso) contribuye a una mayor respuesta electroreológica (figuras 28 y 31) y que un exceso de agua (7% en peso) disminuye dicha respuesta (figuras 41 y 45).

## BIBLIGRAFIA

- 1.- Ahnn K. H. [Y] Klingenberg D. J., "Relaxation of Polydisperse Electrorheological Suspensions", *Journal Rheology*, No. 38, Vol. 3, mayo-junio, 1994, pp. 713-741.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES.

Los alcances y objetivos de este estudio fueron enfocados a encontrar una relación entre las propiedades reológicas y estructurales de los FER's en función de las propiedades químicas y eléctricas de la fase líquida. Para encontrarla fue necesario desarrollar una etapa experimental en donde determinó que las propiedades de la fase líquida influyen directamente en el comportamiento estructural (arreglo espacial de la fase sólida) de los FER's y dichas estructuras determinan la magnitud de la respuesta electroreológica.

A partir del desarrollo y análisis de este trabajo se concluye lo siguiente:

- a) Cuando un FER se encuentra bajo la influencia de un campo eléctrico la fase sólida sufre un arreglo espacial que determina el comportamiento reológico de la suspensión.
- b) El arreglo espacial de la fase sólida se ve influenciado entre otras variables por su concentración, debido a que a altas concentraciones (20% en peso) no se presentan estructuras fibrilares como las ya reportadas en los FER's (de

acuerdo a los FER's analizados) y a bajas se observan dos tipos de estructuras: una fibrilar (aceites de silicón con una diferente viscosidad) y otra triangular (TCF con una constante dieléctrica alta), sin embargo podemos suponer una tercera en donde se presenten columnas (fibrilas muy gruesas) con ramificaciones (DOP con una constante dieléctrica intermedia).

c) Hay que recordar que las estructuras mencionadas fueron observadas a bajas concentraciones de la fase sólida y nuestra evaluación reológica se realizó a una concentración en donde no se observan dichas estructuras. Por lo que nuestro análisis debe de tomarse con ciertas reservas.

d) Teniendo en cuenta lo antes mencionado deducimos que las estructuras formadas en los FER's en presencia de un campo eléctrico y a bajas velocidades de corte dan origen a un comportamiento reológico del tipo Plástico de Bingham el cual se observa en una gráfica del esfuerzo de corte como una función de la velocidad de corte. En la medida que la velocidad de corte se incrementa las estructuras se rompen dando origen a un comportamiento de un material Pseudo-plástico, tal comportamiento es claramente observado en una gráfica de la viscosidad como una función de la velocidad de corte.

e) Al analizar los datos (de los FER's) de viscosidad aparente en función de la velocidad de corte se encontró que se ajustan a una función del tipo ley de potencia (ln-ln) mientras, que los datos de incrementos en la viscosidad en función del campo eléctrico se ajustan para el caso de los aceites de silicón a una función lineal y para el DOP y TCF a una función exponencial (x-ln). Los datos de incrementos en la viscosidad como una función del campo eléctrico al cuadrado se ajustaron a una función lineal.

f) La fase líquida de un FER no sólo juega el papel de aislante de la sólida, sino que además (como se comprobó) contribuye en el arreglo espacial de ésta.

g) Si la fase líquida de un FER tiene una constante dieléctrica alta (TCF) al aplicar un campo eléctrico a la suspensión las partículas se polarizan y éstas a su vez inducirán una carga en la fase líquida (fenómeno de apantallamiento). De tal manera que producirá una estructura triangular la cual no favorecerá la respuesta electroreológica (aumento en la viscosidad del FER).

h) Si la fase líquida de un FER tiene una baja constante dieléctrica y una viscosidad variable (aceites de silicón) dará origen a la formación de estructuras fibrilares las cuales favorecen la respuesta electroreológica.

i) Hay que considerar que una fase líquida con una constante dieléctrica baja y una viscosidad alta (AS-1000) favorece una mejor respuesta electroreológica en la medida que su viscosidad aumente (mayor estabilidad).

j) Un FER será enormemente favorecido en su respuesta electroreológica cuando su fase líquida tenga una constante dieléctrica moderada (DOP).

k) De las fases líquidas analizadas las que prometen tener buenas características para favorecer la respuesta electroreológica en un FER es el DOP y el AS-1000 debido a que el primero presenta una ligera constante dieléctrica y al segundo por su viscosidad que favorece las interacciones partícula-partícula.

## RECOMENDACIONES.

- a) Evaluar el comportamiento reológico a concentraciones menores o iguales al 10% (en peso) ya que en ésta se observa una fuerte dependencia del arreglo espacial de las partículas con las características de la fase líquida de un FER.
- b) Realizar caracterizaciones dinámicas a concentraciones menores del 20% en peso de sílica para determinar la existencia del fenómeno de sedimentación.
- c) Explorar el comportamiento reológico a velocidades de corte menores a  $0.1 \text{ seg}^{-1}$  y mayores a  $26 \text{ seg}^{-1}$ , con el objeto de poder determinar las regiones en donde ocurre la degradación de la estructura formada por el campo eléctrico.
- d) Determinar la viscosidad en función del campo eléctrico a tiempos del orden de milisegundos.
- e) Se recomienda evaluar las suspensiones empleando diferentes tamaños de partículas.

A N E X O

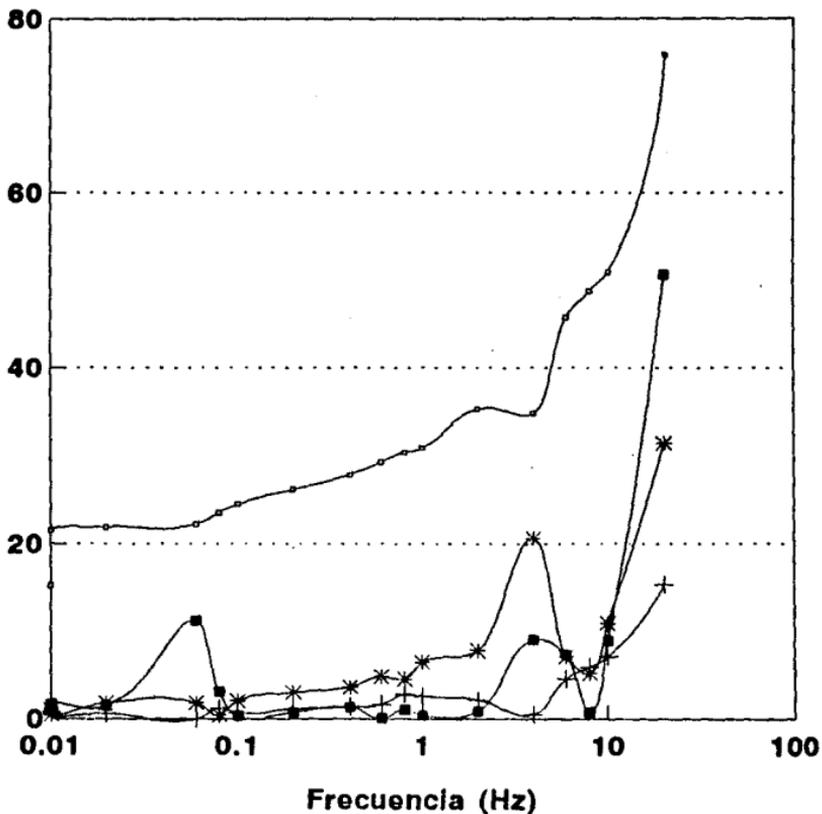
**TESIS SIN PAGINACION**

**COMPLETA LA INFORMACION**

# GRAFICA 1

## ACEITES DE SILICON + SILICA GEL (20%)

Modulo Elastico G' (Pa)



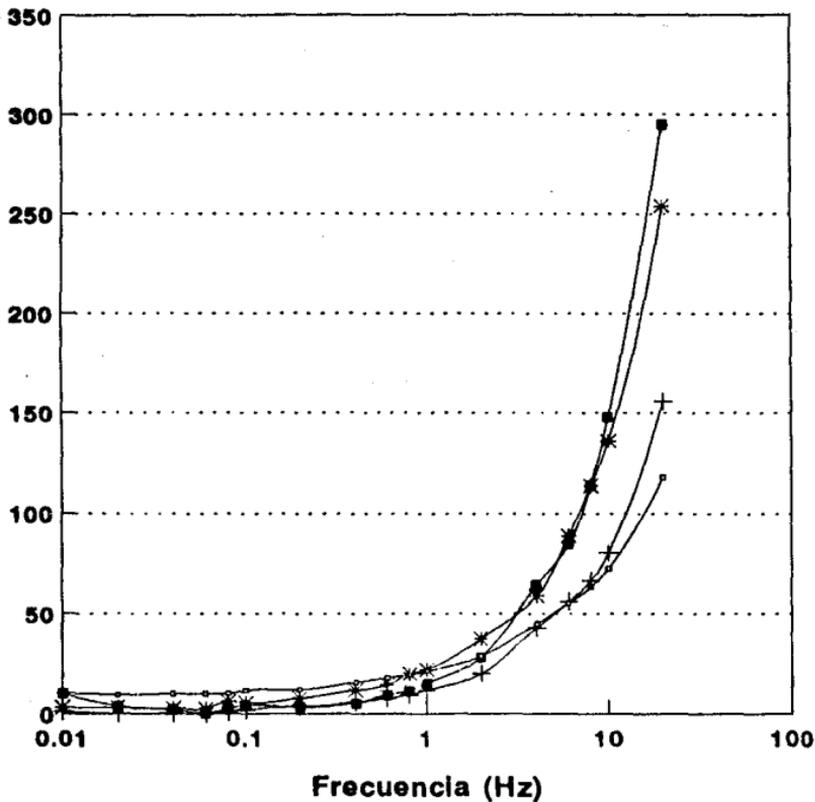
SIN CAMPO

—○— 100 + 350 \* 500 —■— 1000

## GRAFICA 2

### ACEITES DE SILICON + SILICA GEL (20%)

Modulo Viscoso  $G''$  (Pa)



SIN CAMPO

○ 100 + 350 \* 500 ■ 1000

**AJUSTE DE LOS DATOS DE VISCOSIDAD APARENTE VS VELOCIDAD DE CORTE.**

**Suspension: ACEITE SILICON 100-SILICA GEL (20%) 5% HUMEDAD**

Vel. Corte (1/Seg)	Viscosidad Aparente (N/NO)					
	E=0 kV/mm	E=0.25	E=0.5	E=0.75	E=1.0	E=1.25
0.1300	39.233	120.006	193.856	341.555	477.716	533.103
0.2500	23.078	68.080	108.467	200.779	275.783	317.323
0.6400	11.077	31.848	50.310	88.620	121.391	168.008
1.2700	6.923	18.462	30.001	46.848	68.542	94.620
2.5500	4.269	10.847	16.847	26.078	38.310	50.772
5.1000	2.712	6.520	9.693	14.251	20.309	27.694
12.7400	1.662	3.692	4.962	6.785	9.254	12.001
25.4800	1.200	2.562	3.185	4.004	5.227	6.704

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	2.177934	Constant	3.170189	Constant	3.602034
Std Err of Y Est	0.113412	Std Err of Y Est	0.10352	Std Err of Y Est	0.056765
R Squared	0.992802	R Squared	0.995093	R Squared	0.998688
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.66526	X Coefficient(s)	-0.73629	X Coefficient(s)	-0.78224
Std Err of Coef.	0.023125	Std Err of Coef.	0.021108	Std Err of Coef.	0.011574
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	4.087908	Constant	4.424659	Constant	4.66038
Std Err of Y Est	0.038546	Std Err of Y Est	0.014992	Std Err of Y Est	0.076515
R Squared	0.99949	R Squared	0.999924	R Squared	0.997908
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.85198	X Coefficient(s)	-0.85837	X Coefficient(s)	-0.83457
Std Err of Coef.	0.00786	Std Err of Coef.	0.003057	Std Err of Coef.	0.015601

La viscosidad vs velocidad de corte se ajusta a una funcion logaritmica (ln-ln)

**AJUSTE DE DATOS VISCOSIDAD APARENTE VS VELOCIDAD DE CORTE.**

Suspension: DOP-SILICA GEL (20%) 5% HUMEDAD

Vel. Corte (1/Seg)	Viscosidad Aparante (N/NO)					
	E=0 kV/mm	E=0.25	E=0.5	E=0.75	E=1.0	E=1.25
0.1300	36.925	249.243	440.791	507.717	694.649	948.507
0.2500	20.770	138.468	216.934	278.090	380.788	533.103
0.6400	10.616	62.772	112.159	154.623	209.087	270.013
1.2700	6.000	38.310	74.081	101.774	147.930	188.317
2.5500	3.462	26.886	56.541	76.158	115.275	
5.1000	2.250	17.770	48.118			
12.7400	1.292	9.462	24.140			
25.4800	0.912	5.469				

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	2.043758	Constant	3.95497	Constant	4.636243
Std Err of Y Est	0.109313	Std Err of Y Est	0.10351	Std Err of Y Est	0.189712
R Squared	0.994087	R Squared	0.994542	R Squared	0.968558
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	7
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	5
X Coefficient(s)	-0.70787	X Coefficient(s)	-0.69788	X Coefficient(s)	-0.58795
Std Err of Coef.	0.022289	Std Err of Coef.	0.021106	Std Err of Coef.	0.047375
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	4.828896	Constant	5.19071	Constant	5.346817
Std Err of Y Est	0.108568	Std Err of Y Est	0.132796	Std Err of Y Est	0.084425
R Squared	0.984926	R Squared	0.975136	R Squared	0.990803
No. of Observations	5	No. of Observations	5	No. of Observations	4
Degrees of Freedom	3	Degrees of Freedom	3	Degrees of Freedom	2
X Coefficient(s)	-0.63385	X Coefficient(s)	-0.60011	X Coefficient(s)	-0.71081
Std Err of Coef.	0.045273	Std Err of Coef.	0.055325	Std Err of Coef.	0.048426

La viscosidad vs velocidad de corte se ajusta a una funcion logaritmica (ln-ln)

AJUSTE DE LOS DATOS VISCOSIDAD APARENTE VS VELOCIDAD DE CORTE.

Suspension: TCF-SILICA GEL (20%) 5% HUMEDAD

Vel. Corte (1/Seg)	Viscosidad Aparente (N/NO)					
	E=0 kV/mm	E=0.25	E=0.5	E=0.75	E=1.0	E=1.25
0.1300	39.233	154.623	161.546	207.702	256.166	420.020
0.2500	23.078	83.081	92.312	120.006	167.316	236.550
0.6400	11.539	36.463	46.156	66.926	86.773	129.237
1.2700	7.154	22.616	30.001	48.695	64.849	105.236
2.5500	4.616	16.962	24.001	31.732	51.002	85.966
5.1000	3.000	12.116	18.001	25.213	40.502	
12.7400	1.754	8.377	13.524	17.262		
25.4800	1.269	6.693	11.077			

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	2.215135	Constant	3.534843	Constant	3.781652
Std Err of Y Est	0.095345	Std Err of Y Est	0.232696	Std Err of Y Est	0.212821
R Squared	0.994685	R Squared	0.961784	R Squared	0.955871
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.65143	X Coefficient(s)	-0.58354	X Coefficient(s)	-0.4947
Std Err of Coef.	0.019441	Std Err of Coef.	0.047487	Std Err of Coef.	0.043394
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	4.076551	Constant	4.398922	Constant	4.810756
Std Err of Y Est	0.124872	Std Err of Y Est	0.129336	Std Err of Y Est	0.166221
R Squared	0.983298	R Squared	0.973727	R Squared	0.950934
No. of Observations	7	No. of Observations	6	No. of Observations	5
Degrees of Freedom	5	Degrees of Freedom	4	Degrees of Freedom	3
X Coefficient(s)	-0.53502	X Coefficient(s)	-0.50612	X Coefficient(s)	-0.52804
Std Err of Coef.	0.031183	Std Err of Coef.	0.041568	Std Err of Coef.	0.08925

La viscosidad vs velocidad de corte se ajusto a una logaritmica (ln-ln)

AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO.

Suspension: ACEITE SILICON 100-SILICA GEL (20%) 5% HUMEDAD

Viscosidad Aparente (N/NO)

E (kV/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.84	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.2500	3.059	2.860	2.875	2.667	2.541	2.404	2.221	2.136
0.5000	4.941	4.700	4.542	4.334	3.948	3.574	2.988	2.854
0.7500	8.706	8.700	8.000	8.787	6.109	5.255	4.082	3.337
1.0000	12.178	11.950	10.959	9.901	8.974	7.469	5.568	4.356
1.2500	13.588	13.750	15.167	13.667	11.853	10.212	7.221	5.587

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	0.0059	Constant	-0.2450	Constant	-1.0	Constant	-0.8
Std Err of Y Est	0.7449	Std Err of Y Est	0.7011	Std Err of Y Est	0.8	Std Err of Y Est	0.8
R Squared	0.9796	R Squared	0.8826	R Squared	1.0	R Squared	1.0
No. of Observations	5.0000	No. of Observations	5.0000	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0
Degrees of Freedom	3.0000	Degrees of Freedom	3.0000	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0
X Coefficient(s)	11.3175	X Coefficient(s)	11.5400	X Coefficient(s)	12.4	X Coefficient(s)	11.0
Std Err of Coef.	0.9422	Std Err of Coef.	0.8869	Std Err of Coef.	1.0	Std Err of Coef.	1.0
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	-0.4	Constant	-0.1	Constant	0.8	Constant	1.0
Std Err of Y Est	0.6	Std Err of Y Est	0.5	Std Err of Y Est	0.3	Std Err of Y Est	0.3
R Squared	1.0	R Squared	1.0	R Squared	1.0	R Squared	1.0
No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0
Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0
X Coefficient(s)	9.5	X Coefficient(s)	7.8	X Coefficient(s)	8.0	X Coefficient(s)	3.4
Std Err of Coef.	0.7	Std Err of Coef.	0.7	Std Err of Coef.	0.4	Std Err of Coef.	0.3

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL

PAG. 4

**AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTOS EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO.**

**Suspension: DCP-SILICA GEL (20%) 5% HUMEDAD**

**Viscosidad Aparente (N/NO)**

E (kV/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.54	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.2500	6.750	6.667	5.913	6.385	7.768	7.898	7.324	5.997
0.5000	11.937	10.445	10.565	12.347	18.332	21.386	18.684	
0.7500	13.750	13.389	14.565	16.962	21.998			
1.0000	18.812	18.334	19.695	24.655	33.297			
1.2500	25.687	25.667	25.435	31.386				

**Regression Output:**  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

**Regression Output:**  
 1.7 Constant  
 0.1 Std Err of Y Est  
 1.0 R Squared  
 5.0 No. of Observations  
 3.0 Degrees of Freedom

**Regression Output:**  
 1.6 Constant  
 0.1 Std Err of Y Est  
 1.0 R Squared  
 5.0 No. of Observations  
 3.0 Degrees of Freedom

**Regression Output:**  
 1.5 Constant  
 0.1 Std Err of Y Est  
 1.0 R Squared  
 5.0 No. of Observations  
 3.0 Degrees of Freedom

1.5  
 0.1  
 1.0  
 5.0  
 3.0

X Coefficient(s) 1.3  
 Std Err of Coef. 0.1

X Coefficient(s) 1.3  
 Std Err of Coef. 0.1

X Coefficient(s) 1.4  
 Std Err of Coef. 0.1

X Coefficient(s) 1.6  
 Std Err of Coef. 0.2

**Regression Output:**  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

1.7  
 0.1  
 1.0  
 4.0  
 2.0

X Coefficient(s) 1.9  
 Std Err of Coef. 0.3

**EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO SE AJUSTO A UNA FUNCION SEMILOGARITMICA (x-b)**

**AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTOS EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO.**

**Suspension: TRICRESIL FOSFATO-SILICA GEL (20%) 5% HUMEDAD**

**Viscosidad Aparente (N/NO)**

E (kV/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.64	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
9.2500	3.941	3.600	3.160	3.161	3.675	4.039	4.776	5.274
0.5000	4.118	4.000	4.000	4.134	5.200	6.000	7.710	8.729
0.7500	5.294	5.200	5.800	6.807	6.874	8.404	9.842	
1.0000	6.529	7.250	7.520	9.065	11.049	13.501		
1.2500	10.706	10.250	11.200	14.710	18.623			

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	1.002	Constant	0.819	Constant	0.8	Constant	0.7
Std Err of Y Est	0.139	Std Err of Y Est	0.088	Std Err of Y Est	0.0	Std Err of Y Est	0.1
R Squared	0.912	R Squared	0.988	R Squared	1.0	R Squared	1.0
No. of Observations	5.000	No. of Observations	5.000	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0
Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0
X Coefficient(s)	1.0	X Coefficient(s)	1.1	X Coefficient(s)	1.3	X Coefficient(s)	1.5
Std Err of Coef.	0.2	Std Err of Coef.	0.1	Std Err of Coef.	0.1	Std Err of Coef.	0.1
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	0.8	Constant	1.0	Constant	1.2	Constant	0.1
Std Err of Y Est	0.1	Std Err of Y Est	0.0	Std Err of Y Est	0.0	Std Err of Y Est	0.1
R Squared	1.0	R Squared	1.0	R Squared	1.0	R Squared	1.0
No. of Observations	5.0	No. of Observations	4.9	No. of Observations	3.0	No. of Observations	3.0
Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	2.0	Degrees of Freedom	1.0	Degrees of Freedom	1.0
X Coefficient(s)	1.6	X Coefficient(s)	1.6	X Coefficient(s)	1.4	X Coefficient(s)	0.3
Std Err of Coef.	0.1	Std Err of Coef.	0.1	Std Err of Coef.	0.3	Std Err of Coef.	0.3

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO SE AJUSTO A UNA FUNCION SEMILOGARITMICA (x-1)

AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO.

Suspension: ACEITE SILICON 100-SILICA GEL (20%) 5% HUMEDAD

Viscosidad Aparente (N/NO)

$E^{-2}(kV/mm)$	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.64	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.0625	3.059	2.950	2.875	2.667	2.541	2.404	2.221	2.135
0.2500	4.941	4.700	4.542	4.334	3.946	3.574	2.966	2.654
0.5625	8.706	8.700	8.000	6.767	6.109	5.255	4.082	3.337
1.0000	12.176	11.950	10.959	9.901	8.974	7.489	5.588	4.356
1.5625	13.588	13.750	15.167	13.667	11.893	10.212	7.221	5.567

Regression Output:  
 Constant 3.5373  
 Std Err of Y Est 1.3879  
 R Squared 0.9293  
 No. of Observations 5.0000  
 Degrees of Freedom 3.0000

Regression Output:  
 Constant 3.3379  
 Std Err of Y Est 1.3154  
 R Squared 0.9387  
 No. of Observations 5.0000  
 Degrees of Freedom 3.0000

Regression Output:  
 Constant 2.7  
 Std Err of Y Est 0.5  
 R Squared 1.0  
 No. of Observations 5.0  
 Degrees of Freedom 3.0

Regression Output:  
 Constant 2.5  
 Std Err of Y Est 0.2  
 R Squared 1.0  
 No. of Observations 5.0  
 Degrees of Freedom 3.0

X Coefficient(s) 7.2097  
 Std Err of Coef. 1.1482

X Coefficient(s) 7.3776  
 Std Err of Coef. 1.0883

X Coefficient(s) 8.2  
 Std Err of Coef. 0.4

X Coefficient(s) 7.3  
 Std Err of Coef. 0.2

Regression Output:  
 Constant 2.4  
 Std Err of Y Est 0.3  
 R Squared 1.0  
 No. of Observations 5.0  
 Degrees of Freedom 3.0

Regression Output:  
 Constant 2.2  
 Std Err of Y Est 0.1  
 R Squared 1.0  
 No. of Observations 5.0  
 Degrees of Freedom 3.0

Regression Output:  
 Constant 2.1  
 Std Err of Y Est 0.1  
 R Squared 1.0  
 No. of Observations 5.0  
 Degrees of Freedom 3.0

Regression Output:  
 Constant 2.0  
 Std Err of Y Est 0.0  
 R Squared 1.0  
 No. of Observations 5.0  
 Degrees of Freedom 3.0

X Coefficient(s) 6.3  
 Std Err of Coef. 0.3

X Coefficient(s) 5.2  
 Std Err of Coef. 0.1

X Coefficient(s) 3.3  
 Std Err of Coef. 0.1

X Coefficient(s) 2.3  
 Std Err of Coef. 0.0

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL

AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO.

Suspension: DOP - SILICA GEL (20%) 5% HUMEDAD

Viscosidad Aparente (N/NO)

E <sup>2</sup> (kV/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.64	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.0625	6.750	6.667	5.913	6.385	7.766	7.898	7.324	5.987
0.2500	11.937	10.445	10.565	12.347	16.332	21.386	18.684	
0.5625	13.750	13.389	14.565	16.962	21.998			
1.0000	18.812	18.334	19.695	24.655	33.297			
1.5625	25.687	25.667	25.435	31.386				

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

7.2956 Constant  
 1.2411 Std Err of Y Est  
 0.9777 R Squared  
 5.0000 No. of Observations  
 3.0000 Degrees of Freedom

Regression Output:

6.5341 Constant  
 0.6580 Std Err of Y Est  
 0.9940 R Squared  
 5.0000 No. of Observations  
 3.0000 Degrees of Freedom

Regression Output:

6.6 Constant  
 1.2 Std Err of Y Est  
 1.0 R Squared  
 5.0 No. of Observations  
 3.0 Degrees of Freedom

Regression Output:

7.2  
 1.6  
 1.0  
 5.0  
 3.0

X Coefficient(a) 11.7700  
 Std Err of Coef. 1.0268

X Coefficient(b) 12.1689  
 Std Err of Coef. 0.5444

X Coefficient(a) 12.5  
 Std Err of Coef. 1.0

X Coefficient(b) 16.2  
 Std Err of Coef. 1.3

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

7.7  
 1.9  
 1.0  
 4.0  
 2.0

X Coefficient(a) 25.8  
 Std Err of Coef. 2.7

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL

AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTOS EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO

Suspension: TRICRESIL FOSFATO-SILICA GEL (20%) 5% HUMEDAD

Viscosidad Aparente (N/NO)

$E^2$ (kV/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.64	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.0625	3.941	3.600	3.160	3.161	3.675	4.039	4.776	5.274
0.2500	4.118	4.000	4.000	4.194	5.200	6.000	7.710	8.729
0.5625	5.294	5.200	5.800	6.807	6.874	8.404	9.842	
1.0000	6.529	7.250	7.520	9.065	11.049	13.501		
1.5625	10.706	10.250	11.200	14.710	18.623			

Regression Output:  
 Constant 3.0674  
 Std Err of Y Est 0.7917  
 R Squared 0.9386  
 No. of Observations 5.0000  
 Degrees of Freedom 3.0000

Regression Output:  
 Constant 2.9615  
 Std Err of Y Est 0.3324  
 R Squared 0.9890  
 No. of Observations 5.0000  
 Degrees of Freedom 3.0000

Regression Output:  
 Constant 2.7  
 Std Err of Y Est 0.3  
 R Squared 1.0  
 No. of Observations 5.0  
 Degrees of Freedom 3.0

Regression Output:  
 Constant 2.4  
 Std Err of Y Est 0.6  
 R Squared 1.0  
 No. of Observations 5.0  
 Degrees of Freedom 3.0

X Coefficient(s) 4.4366  
 Std Err of Coef. 0.6550

X Coefficient(s) 4.5070  
 Std Err of Coef. 0.2750

X Coefficient(s) 5.3  
 Std Err of Coef. 0.3

X Coefficient(s) 7.6  
 Std Err of Coef. 0.5

Regression Output:  
 Constant 2.3  
 Std Err of Y Est 1.1  
 R Squared 1.0  
 No. of Observations 5.0  
 Degrees of Freedom 3.0

Regression Output:  
 Constant 3.3  
 Std Err of Y Est 0.4  
 R Squared 1.0  
 No. of Observations 4.0  
 Degrees of Freedom 2.0

Regression Output:  
 Constant 4.6  
 Std Err of Y Est 0.8  
 R Squared 0.9  
 No. of Observations 3.0  
 Degrees of Freedom 1.0

X Coefficient(s) 9.8  
 Std Err of Coef. 0.9

X Coefficient(s) 9.9  
 Std Err of Coef. 0.6

X Coefficient(s) 9.8  
 Std Err of Coef. 2.3

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL

**AJUSTE DE LOS DATOS VISCOSIDAD APARENTE VS VELOCIDAD DE CORTE.**

**Suspension: ACEITE SILICON 100--SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD**

Vel. Corte (1/Seg)	Viscosidad Aparente (N/NO)					
	E=0 kV/mm	E=0.25	E=0.5	E=0.75	E=1.0	E=1.25
0.1300	23.078	46.156	80.773	173.085	267.705	392.327
0.2500	13.847	25.386	47.310	94.620	147.700	198.471
0.6400	6.923	12.462	22.155	41.540	63.234	84.004
1.2700	4.385	7.154	13.154	23.078	35.309	45.002
2.5500	2.769	4.039	7.385	13.154	17.885	22.732
5.1000	1.904	2.539	4.327	7.154	9.116	11.539
12.7400	1.223	1.454	2.169	3.323	4.385	5.723
25.4800	0.923	1.027	1.373	1.950	2.596	3.116

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	1.73214	Constant	2.214637	Constant	2.768169
Std Err of Y Est	0.129898	Std Err of Y Est	0.115579	Std Err of Y Est	0.03972
R Squared	0.988949	R Squared	0.993753	R Squared	0.99935
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.61374	X Coefficient(s)	-0.72806	X Coefficient(s)	-0.77773
Std Err of Coef.	0.026486	Std Err of Ccoef.	0.023566	Std Err of Coef.	0.008099

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	3.373602	Constant	3.751901	Constant	4.033535
Std Err of Y Est	0.032914	Std Err of Y Est	0.054722	Std Err of Y Est	0.062649
R Squared	0.999626	R Squared	0.999057	R Squared	0.998834
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.84986	X Coefficient(s)	-0.88943	X Coefficient(s)	-0.91586
Std Err of Coef.	0.006711	Std Err of Coef.	0.011158	Std Err of Coef.	0.012774

La viscosidad vs velocidad de corte se ajusto a una funcion logaritmica (ln-ln)

AJUSTE DE LOS DATOS VISCOSIDAD APARENTE VS VELOCIDAD DE CORTE.

Suspension: ACEITE SILICON 350-SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD

Vel. Corte (1/Seg)	Viscosidad Aparente (N/NO)					
	E=0 kV/mm	E=0.25	E=0.5	E=0.75	E=1.0	E=1.25
0.1300	13.847	64.619	126.929	263.090	438.483	593.106
0.2500	10.385	34.617	72.696	144.238	233.088	320.785
0.6400	6.462	16.155	34.156	65.080	98.774	142.622
1.2700	4.616	9.000	19.616	35.309	53.079	75.696
2.5500	3.231	5.539	11.424	19.386	28.501	40.617
5.1000	2.539	3.577	6.520	10.847	16.365	21.636
12.7400	2.054	2.377	3.462	5.193	7.708	10.824
25.4800	1.823	1.939	2.458	3.266	4.477	5.931

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	1.709434	Constant	2.548865	Constant	3.209384
Std Err of Y Est	0.130182	Std Err of Y Est	0.210619	Std Err of Y Est	0.088956
R Squared	0.974296	R Squared	0.976325	R Squared	0.996601
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.4003	X Coefficient(s)	-0.67553	X Coefficient(s)	-0.76076
Std Err of Coef.	0.026544	Std Err of Coef.	0.042945	Std Err of Coef.	0.018138
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	3.802327	Constant	4.234885	Constant	4.562137
Std Err of Y Est	0.058046	Std Err of Y Est	0.080284	Std Err of Y Est	0.045093
R Squared	0.998808	R Squared	0.988798	R Squared	0.999334
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.83915	X Coefficient(s)	-0.88805	X Coefficient(s)	-0.87258
Std Err of Coef.	0.011835	Std Err of Coef.	0.012292	Std Err of Coef.	0.009194

La viscosidad vs velocidad de corte se ajusto a una funcion logaritmica (ln--ln)

**AJUSTE DE LOS DATOS VISCOSIDAD APARENTE VS VELOCIDAD DE CORTE.**

**Suspension: ACEITE SILICON 500-SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD**

Vel. Corte (1/Seg)	Viscosidad Aparente (N/NO)					
	E=0 kV/mm	E=0.25	E=0.5	E=0.75	E=1.0	E=1.25
0.1300	11.539	62.311	129.237	265.398	410.789	606.953
0.2500	8.077	34.617	73.850	147.700	218.088	312.707
0.6400	5.539	16.155	34.617	62.772	95.543	130.160
1.2700	4.385	9.000	20.539	35.309	52.618	66.926
2.5500	3.462	5.770	11.308	19.732	29.425	37.156
5.1000	3.058	3.981	6.808	11.135	16.674	21.520
12.7400	2.723	3.000	4.039	5.746	7.985	10.385
25.4800	2.516	2.573	3.058	3.912	5.008	6.208

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	1.668949	Constant	2.592353	Constant	3.251828
Std Err of Y Est	0.146457	Std Err of Y Est	0.257116	Std Err of Y Est	0.137734
R Squared	0.938164	R Squared	0.95838	R Squared	0.991125
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.28492	X Coefficient(s)	-0.61622	X Coefficient(s)	-0.72696
Std Err of Coef.	0.029862	Std Err of Coef.	0.052426	Std Err of Coef.	0.028084
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	3.826007	Constant	4.219732	Constant	4.520533
Std Err of Y Est	0.101868	Std Err of Y Est	0.068013	Std Err of Y Est	0.093005
R Squared	0.99608	R Squared	0.998357	R Squared	0.997139
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.81098	X Coefficient(s)	-0.83747	X Coefficient(s)	-0.88715
Std Err of Coef.	0.020771	Std Err of Coef.	0.013868	Std Err of Coef.	0.018964

La viscosidad vs velocidad de corte se ajusto a una funcion logaritmica (ln-ln)

**AJUSTE DE LOS DATOS VISCOSIDAD APARENTE VS VELOCIDAD DE CORTE.**

**Suspension: ACEITE SILICON 1000-SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD**

Vel. Corte (1/Seg)	Viscosidad Aparente (N/NO)					
	E=0 kV/mm	E=0.25	E=0.5	E=0.75	E=1.0	E=1.25
0.1300	9.231	39.233	110.775	221.549	341.555	473.100
0.2500	5.770	23.078	57.695	115.390	188.086	244.627
0.6400	4.616	11.539	27.232	49.387	82.619	103.390
1.2700	4.616	8.077	16.847	32.309	46.848	54.926
2.5500	4.616	6.116	10.847	18.578	27.694	32.886
5.1000	4.558	4.846	7.385	11.135	16.155	20.886
12.7400	4.477	4.362	5.308	6.877	8.585	10.801
25.4800	4.408	4.096	4.443	5.066	5.943	7.466

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	1.693062	Constant	2.452526	Constant	3.164031
Std Err of Y Est	0.181071	Std Err of Y Est	0.274861	Std Err of Y Est	0.228792
R Squared	0.560814	R Squared	0.90565	R Squared	0.966136
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.10219	X Coefficient(s)	-0.42532	X Coefficient(s)	-0.61035
Std Err of Coef.	0.03692	Std Err of Coef.	0.056044	Std Err of Coef.	0.04665
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	3.723439	Constant	4.127401	Constant	4.366558
Std Err of Y Est	0.163825	Std Err of Y Est	0.107785	Std Err of Y Est	0.147579
R Squared	0.98715	R Squared	0.995196	R Squared	0.991294
No. of Observations	8	No. of Observations	8	No. of Observations	8
Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6	Degrees of Freedom	6
X Coefficient(s)	-0.71714	X Coefficient(s)	-0.7747	X Coefficient(s)	-0.7865
Std Err of Coef.	0.033404	Std Err of Coef.	0.021973	Std Err of Coef.	0.030091

La viscosidad vs velocidad de corte se ajusto a una funcion logaritmica (ln-ln)

AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTOS EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO.

Suspension: ACEITE SILICON 100-SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD

Viscosidad Aparente (N/ND)

E (N/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.64	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.2500	2.000	1.853	1.800	1.632	1.468	1.333	1.189	1.113
0.5000	3.500	3.417	3.200	3.000	2.867	2.273	1.774	1.488
0.7500	7.500	6.633	6.000	5.263	4.750	3.758	2.717	2.113
1.0000	11.600	10.667	9.133	8.053	6.458	4.788	3.585	2.813
1.2500	17.000	14.333	12.133	10.263	8.208	6.061	4.679	3.375

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	-3.1100	Constant	-2.2583	Constant	-1.5	Constant	-1.1
Std Err of Y Est	1.2632	Std Err of Y Est	0.7980	Std Err of Y Est	0.6	Std Err of Y Est	0.4
R Squared	0.9681	R Squared	0.9820	R Squared	1.0	R Squared	1.0
No. of Observations	5.0000	No. of Observations	5.0000	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0
Degrees of Freedom	3.0000	Degrees of Freedom	3.0000	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0
X Coefficient(s)	15.2400	X Coefficient(s)	12.9000	X Coefficient(s)	10.8	X Coefficient(s)	8.9
Std Err of Coef	1.5978	Std Err of Coef.	1.0094	Std Err of Coef.	0.8	Std Err of Coef.	0.6
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	-0.5	Constant	0.1	Constant	0.2	Constant	0.4
Std Err of Y Est	0.2	Std Err of Y Est	0.1	Std Err of Y Est	0.2	Std Err of Y Est	0.1
R Squared	1.0	R Squared	1.0	R Squared	1.0	R Squared	1.0
No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0
Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0
X Coefficient(s)	6.9	X Coefficient(s)	4.8	X Coefficient(s)	3.5	X Coefficient(s)	2.3
Std Err of Coef	0.3	Std Err of Coef.	0.2	Std Err of Coef.	0.2	Std Err of Coef.	0.1

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL

AJUSTE DE LOG DATOS INCREMENTOS EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO.

Suspension: ACETE SILICON 350--SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD

Viscosidad Aparente (M/NO)

E (KV/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.54	Vel=1.27	Vel=2.56	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.2500	4.667	3.333	2.500	1.850	1.714	1.400	1.157	1.064
0.5000	9.167	7.000	5.296	4.250	3.536	2.986	1.895	1.349
0.7500	19.000	13.889	10.071	7.640	6.000	4.272	2.528	1.782
1.0000	31.666	22.445	15.285	11.488	8.821	6.453	3.753	2.456
1.2500	42.833	30.689	22.071	16.389	12.571	8.521	5.270	3.253

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		
Constant		-8.18	Constant	-5.86	Constant	-3.760	Constant	-2.485
Std Err of Y Est		2.79	Std Err of Y Est	1.84	Std Err of Y Est	1.316	Std Err of Y Est	0.576
R Squared		1.0	R Squared	1.0	R Squared	0.98	R Squared	1.0
No. of Observations		5.000	No. of Observations	5.000	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0
Degrees of Freedom		3.000	Degrees of Freedom	3.000	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0
X Coefficient(s)	39.532	X Coefficient(s)	28.223	X Coefficient(s)	18.7	X Coefficient(s)	14.5	
Std Err of Coef.	3.532	Std Err of Coef.	2.322	Std Err of Coef.	1.7	Std Err of Coef.	1.1	
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		
Constant		-1.571	Constant	-0.788	Constant	-0.2688	Constant	0.3388
Std Err of Y Est		0.655	Std Err of Y Est	0.376	Std Err of Y Est	0.3843	Std Err of Y Est	0.1926
R Squared		0.983	R Squared	0.987	R Squared	0.9839	R Squared	0.9843
No. of Observations		5.000	No. of Observations	5.000	No. of Observations	5.000	No. of Observations	5.000
Degrees of Freedom		3.000	Degrees of Freedom	3.000	Degrees of Freedom	3.000	Degrees of Freedom	3.000
X Coefficient(s)	10.800	X Coefficient(s)	7.244	X Coefficient(s)	4.1175	X Coefficient(s)	2.1944	
Std Err of Coef.	0.828	Std Err of Coef.	0.475	Std Err of Coef.	0.4908	Std Err of Coef.	0.2436	

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL.

ALJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTOS EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO.

Suspension: ACETE SILICON 500-SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD

Viscosidad Aparente (N/NO)

E (N/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.54	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.2500	5.400	4.286	2.917	2.052	1.867	1.302	1.102	1.003
0.5000	11.200	9.143	6.250	4.684	3.267	2.226	1.483	1.215
0.7500	23.000	18.286	11.333	8.052	5.670	3.941	2.110	1.885
1.0000	35.800	27.001	17.249	12.000	8.486	5.463	2.932	1.880
1.2500	52.600	38.716	23.499	15.262	10.733	7.037	3.814	2.467

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

-10.08 Constant  
 3.64 Std Err of Y Est  
 1.0 R Squared  
 5.000 No. of Observations  
 3.000 Degrees of Freedom

Regression Output:

-6.53 Constant  
 2.14 Std Err of Y Est  
 1.0 R Squared  
 5.000 No. of Observations  
 3.000 Degrees of Freedom

Regression Output:

-3.389 Constant  
 1.061 Std Err of Y Est  
 0.99 R Squared  
 5.0 No. of Observations  
 3.0 Degrees of Freedom

Regression Output:

-1.711  
 0.392  
 1.0  
 5.0  
 3.0

X Coefficient(s) 47.520  
 Std Err of Coef. 4.606

X Coefficient(s) 34.667  
 Std Err of Coef. 2.706

X Coefficient(s) 20.9  
 Std Err of Coef. 1.3

X Coefficient(s) 13.5  
 Std Err of Coef. 0.5

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

-1.042 Constant  
 0.368 Std Err of Y Est  
 0.993 R Squared  
 5.000 No. of Observations  
 3.000 Degrees of Freedom

Regression Output:

-0.477 Constant  
 0.296 Std Err of Y Est  
 0.988 R Squared  
 5.000 No. of Observations  
 3.000 Degrees of Freedom

Regression Output:

0.2283 Constant  
 0.1678 Std Err of Y Est  
 0.9761 R Squared  
 5.0000 No. of Observations  
 3.0000 Degrees of Freedom

Regression Output:

0.5511  
 0.1044  
 0.9762  
 5.0000  
 3.0000

X Coefficient(s) 9.346  
 Std Err of Coef. 0.466

X Coefficient(s) 5.679  
 Std Err of Coef. 0.377

X Coefficient(s) 2.7482  
 Std Err of Coef. 0.2377

X Coefficient(s) 1.4652  
 Std Err of Coef. 0.1321

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL

PAG. 16

AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO.

Suspension: ACEITE SILICON 1000-SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD

Viscosidad Aparente (P/NO)

E (kV/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.54	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.2500	4.250	4.000	2.450	1.750	1.325	1.063	0.874	0.823
0.5000	12.000	9.999	5.899	3.650	2.360	1.620	1.188	1.006
0.7500	24.001	19.998	10.699	6.989	4.025	2.443	1.536	1.149
1.0000	37.001	32.597	17.898	10.149	6.000	3.544	1.918	1.348
1.2500	51.251	42.396	22.398	11.868	7.124	4.382	2.413	1.694

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		
Constant		-10.00	Constant	-8.02	Constant	-3.780	Constant	-1.150
Std Err of Y Est		2.24	Std Err of Y Est	2.02	Std Err of Y Est	1.100	Std Err of Y Est	0.527
R Squared		1.0	R Squared	1.0	R Squared	0.99	R Squared	1.0
No. of Observations		5.000	No. of Observations	5.000	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0
Degrees of Freedom		3.000	Degrees of Freedom	3.000	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0
X Coefficient(s)	47.601	X Coefficient(s)	39.796	X Coefficient(s)	20.8	X Coefficient(s)	10.7	
Std Err of Coef.	2.835	Std Err of Coef.	2.959	Std Err of Coef.	1.4	Std Err of Coef.	0.7	
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		
Constant		-0.410	Constant	-0.038	Constant	0.5224	Constant	0.6988
Std Err of Y Est		0.290	Std Err of Y Est	0.202	Std Err of Y Est	0.0833	Std Err of Y Est	0.0812
R Squared		0.989	R Squared	0.985	R Squared	0.9804	R Squared	0.9342
No. of Observations		5.000	No. of Observations	5.000	No. of Observations	5.0000	No. of Observations	5.0000
Degrees of Freedom		3.000	Degrees of Freedom	3.000	Degrees of Freedom	3.0000	Degrees of Freedom	3.0000
X Coefficient(s)	6.099	X Coefficient(s)	3.585	X Coefficient(s)	1.4440	X Coefficient(s)	0.7528	
Std Err of Coef.	0.367	Std Err of Coef.	0.256	Std Err of Coef.	0.1180	Std Err of Coef.	0.1154	

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL

**AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTOS EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO.**

Suspension: ACETE SILICON 100-SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD

**Viscosidad Aparente (N/ND)**

$E^2$ (kV/m)	Val=0.13	Val=0.25	Val=0.64	Val=1.27	Val=2.55	Val=5.10	Val=12.74	Val=25.48
0.0625	2.000	1.833	1.800	1.632	1.458	1.333	1.189	1.113
0.2500	3.500	3.417	3.200	3.000	2.867	2.273	1.774	1.488
0.5625	7.500	6.833	6.000	5.263	4.750	3.758	2.717	2.113
1.0000	11.600	10.867	9.133	8.053	6.458	4.788	3.585	2.813
1.5625	17.000	14.333	12.133	10.263	8.208	6.061	4.679	3.375

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	1.3641	Constant	1.5807	Constant	1.7	Constant	1.8
Std Err of Y Est	0.3636	Std Err of Y Est	0.5788	Std Err of Y Est	0.5	Std Err of Y Est	0.5
R Squared	0.9974	R Squared	0.9805	R Squared	1.0	R Squared	1.0
No. of Observations	5.0000	No. of Observations	5.0000	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0
Degrees of Freedom	3.0000	Degrees of Freedom	3.0000	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0
X Coefficient(s)	10.1176	X Coefficient(s)	8.4742	X Coefficient(s)	7.0	X Coefficient(s)	5.8
Std Err of Coef.	0.3008	Std Err of Coef.	0.4786	Std Err of Coef.	0.4	Std Err of Coef.	0.4
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	1.6	Constant	1.5	Constant	1.2	Constant	1.1
Std Err of Y Est	0.5	Std Err of Y Est	0.4	Std Err of Y Est	0.2	Std Err of Y Est	0.2
R Squared	1.0	R Squared	1.0	R Squared	1.0	R Squared	1.0
No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0	No. of Observations	5.0
Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0	Degrees of Freedom	3.0
X Coefficient(s)	4.5	X Coefficient(s)	3.1	X Coefficient(s)	2.3	X Coefficient(s)	1.5
Std Err of Coef.	0.4	Std Err of Coef.	0.3	Std Err of Coef.	0.1	Std Err of Coef.	0.1

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL

AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTOS EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO.

Suspension: ACEITE SILICON 350--SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD

Viscosidad Aparente (MNO)

E <sup>-2</sup> (kV/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.64	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.0625	4.887	3.333	2.500	1.950	1.714	1.408	1.157	1.084
0.2500	9.167	7.000	5.288	4.250	3.538	2.988	1.885	1.348
0.5625	19.000	13.889	10.071	7.649	6.000	4.272	2.528	1.782
1.0000	31.888	22.445	15.285	11.499	8.821	6.453	3.753	2.495
1.5625	42.833	30.889	22.071	16.389	12.571	8.521	5.270	3.253

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant		3.55 Constant		2.73 Constant		2.123 Constant	
Std Err of Y Est		1.63 Std Err of Y Est		1.00 Std Err of Y Est		0.358 Std Err of Y Est	
R Squared		1.0 R Squared		1.0 R Squared		1.00 R Squared	
No. of Observations		5.000 No. of Observations		5.000 No. of Observations		5.0 No. of Observations	
Degrees of Freedom		3.000 Degrees of Freedom		3.000 Degrees of Freedom		3.0 Degrees of Freedom	
X Coefficient(s)	26.060	X Coefficient(s)	18.591	X Coefficient(s)	13.0	X Coefficient(s)	8.5
Std Err of Coef.	1.350	Std Err of Coef.	0.828	Std Err of Coef.	0.4	Std Err of Coef.	0.4
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant		1.640 Constant		1.381 Constant		0.8888 Constant	
Std Err of Y Est		0.326 Std Err of Y Est		0.318 Std Err of Y Est		0.0132 Std Err of Y Est	
R Squared		0.986 R Squared		0.891 R Squared		1.0000 R Squared	
No. of Observations		5.000 No. of Observations		5.000 No. of Observations		5.0000 No. of Observations	
Degrees of Freedom		3.000 Degrees of Freedom		3.000 Degrees of Freedom		3.0000 Degrees of Freedom	
X Coefficient(s)	7.110	X Coefficient(s)	4.746	X Coefficient(s)	2.7438	X Coefficient(s)	1.4815
Std Err of Coef.	0.289	Std Err of Coef.	0.283	Std Err of Coef.	0.0110	Std Err of Coef.	0.0103

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL.

AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTOS EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO.

Suspension: ACEITE SILICON 500-SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD

Viscosidad Aparente (N/NO)

E <sup>-2</sup> (V/mm)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.64	Vel=1.27	Vel=2.98	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.0625	5.400	4.286	2.917	2.052	1.087	1.302	1.102	1.023
0.2500	11.200	9.143	6.250	4.684	3.267	2.226	1.483	1.215
0.5625	23.000	18.286	11.333	8.052	5.670	3.641	2.110	1.986
1.0000	35.800	27.001	17.249	12.000	8.488	5.453	2.932	1.980
1.5625	52.600	38.716	23.499	15.262	10.733	7.037	3.614	2.467

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

3.91 Constant  
 0.96 Std Err of Y Est  
 1.0 R Squared  
 5.000 No. of Observations  
 3.000 Degrees of Freedom

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

3.79 Constant  
 1.22 Std Err of Y Est  
 1.0 R Squared  
 5.000 No. of Observations  
 3.000 Degrees of Freedom

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

13.7  
 0.7  
 X Coefficient(s)  
 Std Err of Coef.

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

2.848 Constant  
 0.873 Std Err of Y Est  
 0.88 R Squared  
 5.0 No. of Observations  
 3.0 Degrees of Freedom  
 8.7  
 0.8  
 X Coefficient(s)  
 Std Err of Coef.

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

1.794 Constant  
 0.625 Std Err of Y Est  
 0.979 R Squared  
 5.000 No. of Observations  
 3.000 Degrees of Freedom

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

1.288 Constant  
 0.293 Std Err of Y Est  
 0.988 R Squared  
 5.000 No. of Observations  
 3.000 Degrees of Freedom

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

1.8154  
 0.0884  
 X Coefficient(s)  
 Std Err of Coef.

Regression Output:  
 Constant  
 Std Err of Y Est  
 R Squared  
 No. of Observations  
 Degrees of Freedom

1.0401 Constant  
 0.0708 Std Err of Y Est  
 0.9889 R Squared  
 5.0000 No. of Observations  
 3.0000 Degrees of Freedom  
 0.9887  
 0.0287  
 X Coefficient(s)  
 Std Err of Coef.

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL

## AJUSTE DE LOS DATOS INCREMENTOS EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO.

Sugarsator: ACEITE SILICON 1000-SILICA GEL (20%) 7% HUMEDAD

## Viscosidad Aparente (#MPC)

E <sup>2</sup> (N/V/m)	Vel=0.13	Vel=0.25	Vel=0.64	Vel=1.27	Vel=2.55	Vel=5.10	Vel=12.74	Vel=25.48
0.0825	4.250	4.000	2.450	1.790	1.325	1.083	0.874	0.883
0.2500	12.000	9.890	5.890	3.850	2.350	1.820	1.188	1.088
0.5625	24.001	19.980	10.698	6.888	4.025	2.443	1.836	1.148
1.0000	37.001	32.597	17.896	10.148	6.000	3.544	1.918	1.388
1.5625	51.251	42.386	22.386	11.890	7.124	4.582	2.413	1.884

Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant		4.28 Constant		3.95 Constant		2.578 Constant	
Std Err of Y Est		2.17 Std Err of Y Est		2.34 Std Err of Y Est		1.438 Std Err of Y Est	2.175
R Squared		1.0 R Squared		1.0 R Squared		0.98 R Squared	1.147
No. of Observations		5,000 No. of Observations		5,000 No. of Observations		5,000 No. of Observations	0.9
Degrees of Freedom		3,000 Degrees of Freedom		3,000 Degrees of Freedom		3,000 Degrees of Freedom	5.0
X Coefficient(s)	31.145	X Coefficient(s)	25.948	X Coefficient(s)	13.5	X Coefficient(s)	8.9
Std Err of Coef.	1.794	Std Err of Coef.	1.938	Std Err of Coef.	1.2	Std Err of Coef.	0.9
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant		1.450 Constant		1.032 Constant		0.8888 Constant	0.8752
Std Err of Y Est		0.541 Std Err of Y Est		0.144 Std Err of Y Est		0.8884 Std Err of Y Est	0.0277
R Squared		0.963 R Squared		0.982 R Squared		0.9885 R Squared	0.9538
No. of Observations		5,000 No. of Observations		5,000 No. of Observations		5,000 No. of Observations	5,000
Degrees of Freedom		3,000 Degrees of Freedom		3,000 Degrees of Freedom		3,000 Degrees of Freedom	3,000
X Coefficient(s)	3.935	X Coefficient(s)	2.353	X Coefficient(s)	0.9022	X Coefficient(s)	0.5079
Std Err of Coef.	0.448	Std Err of Coef.	0.119	Std Err of Coef.	0.0328	Std Err of Coef.	0.0229

EL INCREMENTO EN LA VISCOSIDAD VS CAMPO ELECTRICO AL CUADRADO SE AJUSTO A UNA FUNCION LINEAL