



24
201
**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

"CARACTERIZACION REOLOGICA DE
FLUIDOS ELECTRO - REOLOGICOS.
EFECTO DEL TAMAÑO, DISTRIBUCION
DE TAMAÑO Y CONCENTRACION DE
LA FASE SOLIDA"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A:

JOSE CARLOS CHEW LOPEZ



MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Prof. Guerra Recasens José Francisco.
Vocal: Prof. Tejeda Castillo Román.
Secretario: Prof. Rejón García Leonardo.
1er. Suplente: Prof. Herrera Nájera Rafael.
2do. Suplente: Prof. Pérez Camacho Ricardo.

Sitio donde se desarrolló el tema:

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
EDIFICIO 22
TEMIXCO, MORELOS

Asesor del tema:

M. en I. Leonardo Rejón García



Sustentante:

José Carlos Chew López



Quiero dedicar este trabajo a :

Dios un compromiso eterno de amor al prójimo,

Mis padres Carlos y Carmen por haber depositado en mi toda su confianza y brindarme lo mejor siempre, son en verdad un ejemplo de dedicación y de amor,

Mis hermanas Adriana y Beatriz por su ayuda incondicional estoy muy orgulloso de ser parte de ustedes,

Samantha por su paciencia y comprensión durante mi estancia en el Instituto,

Mis amigos Armando, Dionicio, Eric, Isabel y Ricardo

AGRADECIMIENTOS

Al M. en I. Leonardo Rejón García por la extraordinaria labor de asesoría y por compartir su experiencia profesional.

Al Dr. Victor M. Castaño por sus valiosos comentarios y su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Al Departamento de Materiales del Instituto de Investigaciones Eléctricas por brindarme la oportunidad de desarrollar el tema.

A la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México por su ayuda en mi crecimiento profesional.

A todas las personas que contribuyeron a la realización del trabajo, en especial a mis compañeros y amigos del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

“ El hombre siempre está capacitado para el crecimiento y el cambio, y si no creéis esto, es que estáis en el proceso de la muerte ”

Leo F. Buscaglia

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN

Los fluidos electro-reológicos son un reto para la ciencia de los materiales	...	1
--	-----	---

CAPÍTULO I

Antecedentes

1.1. Dispersiones Sólido-Líquido	...	3
1.1.1. Generalidades	...	3
1.1.2. El Estado de las Dispersiones Sólido-Líquido	...	5
1.1.3. Preparación de Dispersiones	...	7
1.1.4. Interacción entre Partículas	...	8
1.1.5. Estabilización de Dispersiones	...	12
1.2. Fluidos Electro-Reológicos (FER)	...	16
1.2.1. El Efecto Electro-Reológico (EER) y sus Mecanismos	...	16
1.2.2. Trabajos Previos	...	21
1.2.3. Componentes de un FER	...	24
1.2.4. Aplicaciones	...	26
1.2.5. El Problema de la Comercialización	...	28

CAPÍTULO II

Comportamiento Reológico de Dispersiones Sólido-Líquido y FER's

2.1. Reología	...	33
2.1.1. Flujo Newtoniano	...	33
2.1.2. Flujo No-Newtoniano	...	35
2.2. Medición de Propiedades Reológicas	...	38
2.2.1. Prueba de "Flow" (Flujo)	...	38
2.2.2. Prueba de "Creep" (Deslizamiento)	...	38
2.2.3. Prueba Oscilatoria	...	42
2.3. Comportamiento Reológico de Dispersiones en Ausencia de Campo Eléctrico	...	44
2.3.1. Efecto de la Concentración	...	44
2.3.2. Efecto del Tamaño de la Partícula	...	48
2.3.3. Efecto de la Distribución del Tamaño de la Partícula	...	50
2.4. Comportamiento Reológicos de Fluidos Electro-Reológicos	...	52
2.4.1. Comportamiento Reológico Observado	...	52
2.4.2. Modelos Reológicos Propuestos para Describir el EER	...	53

Tabla de Contenido ...

CAPÍTULO III

Desarrollo Experimental

3.1.	Materiales	...	63
3.2.	Equipos Empleados	...	66
	3.2.1. Dispersión de la Fase Sólida	...	66
	3.2.2. Mediciones Reológicas	...	67
	3.2.3. Mediciones Reológicas con Aplicación de Campo Eléctrico	...	68
3.3.	Preparación de los Fluidos Electro-Reológicos	...	68
3.4.	Métodos Reológicos para la Caracterización de los FER's	...	68
	3.4.1. Geometría de Medición	...	68
	3.4.2. Espaciamiento entre Platos (GAP)	...	70
	3.4.3. Pruebas Reológicas	...	70

CAPÍTULO IV

Resultados y Discusión

4.1.	Comportamiento Reológico de las Suspensiones Sólido-Líquido Preparadas en Ausencia de Campo Eléctrico	...	74
	4.1.1. Efecto del Tamaño de Partícula sobre el Comportamiento en Flujo Observado	...	75
	a) Viscosidad Relativa	...	75
	b) Esfuerzo de Cedencia	...	77
	4.1.2. Efecto de la Distribución del Tamaño de Partícula sobre el Comportamiento en Flujo Observado	...	79
	a) Viscosidad Relativa	...	79
	b) Esfuerzo de Cedencia	...	81
	4.1.3. Efecto de la Concentración de la Fase Sólida sobre el Comportamiento en Flujo Observado	...	82
	a) Viscosidad Relativa	...	82
	b) Esfuerzo de Cedencia	...	85
4.2.	Comportamiento Reológico de los Fluidos Electro-Reológicos Preparados en Presencia de un Campo Eléctrico	...	87
	4.2.1. Efecto del Tamaño de Partícula sobre el Comportamiento en Flujo Observado	...	87
	a) Magnitud de Respuesta Electro-Reológica	...	87
	b) Esfuerzo de Cedencia	...	91
	4.2.2. Efecto de la Distribución del Tamaño de Partícula sobre el Comportamiento en Flujo Observado	...	94
	a) Magnitud de Respuesta Electro-Reológica	...	94
	b) Esfuerzo de Cedencia	...	97

Tabla de Contenido ...

4.2.3. Efecto de la Concentración de la Fase Sólida sobre el Comportamiento en Flujo Observado	...	100
a) Magnitud de Respuesta Electro-Reológica	...	100
b) Esfuerzo de Cedencia	...	103
CAPÍTULO V		
Conclusiones y Recomendaciones	...	107
<input checked="" type="checkbox"/> Anexo I Conceptos Reológicos Importantes	...	110
<input checked="" type="checkbox"/> Anexo II Datos Experimentales	...	115
<input checked="" type="checkbox"/> Anexo III Determinación de la distribución del tamaño de partícula	...	145
<input checked="" type="checkbox"/> Anexo IV Determinación de densidades de la fase sólida	...	147
<input checked="" type="checkbox"/> Bibliografía	...	150

Lista de Tablas

- 1.1. Clasificación de sistemas dispersos según el estado de las fases que lo componen.
- 1.2. Clasificación de sistemas dispersos según la distribución del tamaño de partícula.
- 1.3. Clasificación de sistemas dispersos de acuerdo al intervalo de tamaño de partícula.
- 1.4. Ejemplos de métodos de dispersión.
- 1.5. Fuerzas debidas a efectos de dispersión.
- 1.6. Energías de interacción entre partículas características en FER's.
- 1.7. Magnitudes relativas de interacciones entre partículas.
- 1.8. Sugerencias propuestas para resolver la sedimentación en FER's.
- 1.9. Algunas formulaciones de FER's reportadas en patentes.
- 1.10. Requisitos de un FER para su posible uso comercial.
- 2.1. Algunas viscosidades típicas a 20°C.
- 2.2. Modelos matemáticos que describen el comportamiento en flujo.
- 3.1. Características de la fase sólida.
- 3.2. Características de la fase líquida.
- 3.3. Condiciones establecidas para la pruebas reológicas.

Lista de Figuras

- 1.1 Representación de los distintos estados de dispersión en una suspensión.
- 1.2 Ejemplo de las energías de repulsión V_R , de atracción V_A y de la energía total de interacción V_T como función de la distancia entre dos platos paralelos.
- 1.3 Representación esquemática de la formación de cadenas de partículas en un FER ante la aplicación de un campo eléctrico: a) Sin campo eléctrico E; b) Con campo eléctrico E.
- 1.4 Representación esquemática de la teoría de la doble capa para explicar el mecanismo que se lleva a cabo en el efecto electro-reológico: a) Sin campo eléctrico; b) Con campo eléctrico.
- 1.5 Ejemplo de un absorbedor de choque electro-reológico con una válvula electro-reológica externa.
- 2.1 Modelo de flujo entre dos láminas paralelas.
- 2.2 Comparación del comportamiento en flujo de fluidos newtonianos y no-newtonianos.
- 2.3 Curvas de "creep" que representan a los modelos de materiales: a) Sólido elástico; b) Líquido newtoniano; c) Material viscoelástico.
- 2.4 Representación esquemática del modelo de Berger para comportamiento viscoelástico en una prueba de "creep".
- 2.5 Respuesta resultante de la aplicación de una onda sinusoidal a un material: a) Elástico; b) Viscoso.
- 2.6 Determinación de los componentes del módulo complejo G' y G'' en una prueba oscilatoria.
- 2.7 Curva que representa la dependencia de la concentración en la viscosidad real de una dispersión coloidal típica.
- 2.8 Curva que representa la dependencia de la cantidad de esferas pequeñas en la viscosidad aparente de una suspensión bidispersa de esferas de vidrio según J. S. Chong.
- 2.9 Curva que representa el esfuerzo contra la velocidad de corte para un fluido electro-reológico con un esfuerzo de cedencia (Modelo de Bingham): a) Con campo eléctrico; b) Sin campo eléctrico.
- 2.10 Representación esquemática de las regiones sólida (|||) y líquida (...) de la suspensión cuando se encuentra entre electrodos.
- 2.11 Representación esquemática del modelo de la gota de T.C. Hasley.
- 3.1 Micrografías representativa de la fase sólida utilizada (sílica de 25.6 micras)
- 3.2 Distribución del tamaño de partícula de la fase sólida utilizada.
- 3.3 Viscosímetro Sincroeléctrico Brookfield RVT.
- 3.4 Representación esquemática de la geometría de platos paralelos.
- 3.5 Representación esquemática del arreglo utilizado para las pruebas reológicas.

Los fluidos electro-reológicos son un reto para la ciencia de los materiales

El diseño y fabricación de dispositivos y equipos actualmente tienden hacia el uso de materiales que posean la capacidad de adaptación de alguna de sus propiedades en función de alguna condición externa específica. Como resultado de dicha tendencia se han propuesto desarrollos tecnológicos innovadores que modifican las propiedades específicas de materiales a través de la aplicación de distintas perturbaciones tales como: campos magnéticos, campos eléctricos, entre otros. Los campos eléctricos son los de mayor interés para la comunidad científica e industrial, ya que proveen formas novedosas y eficientes para el control de flujo de fluidos y transmisión de potencia así como la reducción de pérdidas de energía y daños debido a vibración y oscilación.

El efecto que produce la aplicación de un campo eléctrico sobre un fluido se conoce como "*Efecto electro-reológico*", observado en 1947 por Willis Winslow¹. Los *fluidos electro-reológicos* (FER) son sistemas dispersos (suspensiones), compuestos por una fase continua (líquido de baja constante dieléctrica) y una fase dispersa (partículas sólidas). Dichos fluidos bajo la aplicación de un campo eléctrico, presentan un incremento súbito en su viscosidad aparente. Dependiendo de la intensidad del campo aplicado la suspensión puede fluir como el agua, como la miel o llegar a solidificarse como un gel. El efecto se manifiesta instantáneamente, siendo los tiempos de respuesta del orden de milisegundos². Esta característica es la que hace importante tecnológicamente a los fluidos electro-reológicos.

Los fluidos electro-reológicos tienen aplicaciones potenciales en dispositivos tales como: absorbedores de choque, amortiguadores, válvulas electro-reológicas y transmisiones, lo cual ha dado lugar a la fabricación de diversos prototipos. Sin embargo, todos estas invenciones no se han comercializado aún.

En un estudio reciente³, realizado por el Departamento de Energía (DOE) de los EUA, se concluye que no se ha logrado consumir comercialmente esta tecnología debido a la falta de entendimiento de los materiales y mecanismos que son responsables del fenómeno electro-reológico. Algunos problemas alternos son la inestabilidad de las suspensiones y la falta de una mayor resistencia a esfuerzos mecánicos. Por tanto realizar investigaciones sobre estos materiales constituye una aportación al desarrollo de materiales que faciliten el diseño y comercialización de dispositivos electro-reológicos.

El propósito de este trabajo es realizar un estudio del comportamiento en flujo (reológico) de las suspensiones electro-reológicas preparadas (aceite silicón-silica gel) cuyos resultados aporten conocimientos básicos que contribuyan al esclarecimiento del efecto electro-reológico, con un interés particular en el efecto que tienen algunas características de los fluidos electro-reológicos tales como: tamaño, distribución del tamaño y concentración de la fase sólida, en ausencia y bajo la influencia de campo eléctrico, analizando los resultados a través de parámetros reológicos tales como la viscosidad y el esfuerzo de cedencia de las suspensiones preparadas.

El contenido de este estudio se describe a continuación: en el capítulo I se puntualizan argumentos generales de las dispersiones sólido-líquido (clasificación, métodos de preparación, fuerzas de interacción, estabilidad), se describen los fluidos electro-reológicos, sus componentes, aplicaciones y el problema de su comercialización. En el capítulo II se mencionan las mediciones de propiedades reológicas, así como la descripción del comportamiento en flujo de dispersiones en ausencia y bajo la aplicación de campo eléctrico. En el capítulo III se mencionan los componentes de las suspensiones electro-reológicas, se describe el equipo usado y se indica la metodología para la caracterización reológica. En el capítulo IV se exponen los resultados obtenidos de la experimentación a través de gráficas, llevando a cabo una discusión de los mismos en función de parámetros reológicos tales como la viscosidad y el esfuerzo de cedencia para las suspensiones en ausencia de campo eléctrico y de la magnitud de respuesta electro-reológica en el caso de los fluidos electro-reológicos bajo la influencia de un campo eléctrico. Finalmente en el capítulo V se presentan las conclusiones del trabajo, así como algunas recomendaciones para posteriores investigaciones.

Referencias Bibliográficas

1. "Methods and Means for Translating Electrical Impulses into Mechanical Force". Willis M. Winslow. US Patent: No. 2 417 850. 1947
2. V. Zamudio, R. Nava, L. Rejón, M.A. Ponce, S. Viquez y V. M. Castaño "Response time in Electro Rheological Fluids as a Function of Dielectric Constant and Viscosity", en: Physica A, (aceptado 1996)
3. I.M. Krieger et al, Electro-Rheological Fluids. A Research Needs Assessment. Final Report. (U.S. Department of Energy, Office of Energy Research. Office of Program Analysis; Washington D.C.: U.S. Government Printing Office Mayo 1993, DE - AC02 91ER30172)

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

En la primera sección de este capítulo se tratan temas relacionados con las dispersiones sólido-líquido (las cuales se llaman dispersiones coloidales siempre y cuando el tamaño de la partícula sólida sea menor a 0.1 micrómetros). En la segunda sección se hace una descripción de los fluidos electro-reológicos, mencionando sus características, propiedades y aplicaciones.

1.1. Dispersiones Sólido-Líquido

El entendimiento de las dispersiones sólido-líquido involucra el conocimiento de sus distintas clasificaciones, propiedades y aplicaciones, la descripción de su naturaleza, los métodos de preparación, las interacciones entre partículas presentes así como los diversos mecanismos propuestos para la estabilización de las dispersiones. A continuación se hace una descripción de los aspectos anteriores.

1.1.1. Generalidades

Los coloides se pueden representar como un conjunto de partículas diminutas suspendidas en un medio; a las partículas se les conoce como la fase dispersa y el medio recibe el nombre de medio de dispersión.

Los sistemas coloidales se clasifican en función de los estados de la fase dispersa y del medio de dispersión (tabla 1.1), del tamaño y de la distribución del tamaño de la partícula (tablas 1.2 y 1.3).

Tabla 1.1 Clasificación de sistemas dispersos según el estado de las fases que lo componen.

Medio de dispersión	Fase dispersa	Sistema (ejemplo)
Gas	Gas	No se forma, la mezcla es homogénea.
Gas	Líquido	Niebla (aerosoles).
Gas	Sólido	Humo.
Líquido	Gas	Espuma
Líquido	Líquido	Emulsión (aceite en agua)
Líquido	Sólido	Suspensión (pinturas, tintas y lacas)
Sólido	Gas	Espuma sólida
Sólido	Líquido	Emulsión sólida
Sólido	Sólido	Ciertas aleaciones

Tabla 1.2 Clasificación de sistemas dispersos según la distribución del tamaño de partícula.

Tipo de sistema	Distribución del tamaño de partícula
Monodispersos	Único
Pausidispersos	Pequeño
Polidispersos	Grande.

Tabla 1.3 Clasificación de sistemas dispersos de acuerdo al intervalo de tamaño de partícula.

Longitud mayor (cm) (lado para cubos, diámetro para esferas)	Superficie / unidad de volumen (cm ² /cm ³) (cubos)
1	6
10 ⁻¹	60
10 ⁻²	600 (suspensiones ordinarias)
10 ⁻³	6x10 ³ (suspensiones ordinarias)
10 ⁻⁴	6x10 ⁴ (suspensiones ordinarias)
	Límite de resolución del microscopio óptico
10 ⁻⁵	6x10 ⁵ (suspensiones coloidales típicas)
10 ⁻⁶	6x10 ⁶ (suspensiones coloidales típicas)
10 ⁻⁷	6x10 ⁷ (suspensiones coloidales típicas)
10 ⁻⁸	Soluciones verdaderas

Cuando existe atracción entre las moléculas que constituyen al medio y las de la fase sólida se dice que los sistemas son liofílicos y cuando no existe, los sistemas son liofóbicos.

Algunas propiedades importantes de las dispersiones sólido-líquido son:

- ⌘ Propiedades ópticas. Las dispersiones son de colores, debido a que el intervalo en el que se encuentra el tamaño de las partículas es comparable a la longitud de onda de la luz visible.
- ⌘ Propiedades eléctricas. Se originan debido a la carga que adquieren las partículas coloidales en su superficie. Al aplicar un campo eléctrico a una dispersión sólido-líquido, las partículas se polarizan mostrando el fenómeno de *electroforesis*. Esta polarización orienta las partículas paralelamente a las líneas de fuerza, causando así birrefringencia eléctrica, también conocida como "efecto Kerr".
- ⌘ Propiedades magnéticas. Se presentan en las dispersiones sólido-líquido siempre y cuando las partículas de la fase sólida posean dichas propiedades. Esto provoca que las partículas se orienten bajo la acción de un campo magnético (efecto Cotton-Mouton³). De este modo bajo un campo magnético nulo, las dispersiones concentradas de dichas partículas fluyen libremente, pero ante un campo magnético fuerte, se orientan (cintas de audio y video).
- ⌘ Propiedades reológicas. En sistemas coloidales concentrados, algunas dispersiones se comportan como fluidos newtonianos a bajos esfuerzos de corte, pero a altos esfuerzos, las partículas no pueden moverse lo suficientemente rápido, de tal forma que rigidifican el sistema, adquiriendo un comportamiento dilatante (fluidos que aumentan su viscosidad al aumentar la velocidad de corte)⁴. Una propiedad interesante en estos sistemas es la tixotropía, la cual consiste en una transformación reversible entre un material con una estructura que lo hace ver espeso (como puede ser un yougurth) a uno completamente líquido (si el yougurth se agita o se mueve su viscosidad disminuye) al agitarlo o moverlo. Después permanecer cierto tiempo en reposo, el material vuelve a su estado original.

Las dispersiones coloidales, tienen distintas aplicaciones en estudios teóricos que van desde estudios del número de Avogadro hasta modelos del estado líquido⁵. En la vida diaria están presentes muchas dispersiones tales como la leche, la mayonesa y la clara de huevo; también la industria maneja este tipo de materiales en productos tales como tintas, pigmentos, cosméticos, cerámicos, productos farmacéuticos y pesticidas.

1.1.2. El Estado de las Dispersiones Sólido - Líquido

Se pueden obtener varios arreglos en las estructuras de las dispersiones sólido/líquido (figura 1.1). Los estados (a) - (c) corresponden a dispersiones coloidales estables. En el caso (a) el tamaño de partícula es tan pequeño que la energía térmica se opone a la fuerza gravitacional de tal modo que da como resultado una dispersión uniforme. El caso (b) representa una dispersión con partículas de densidad mayor a la de la fase líquida, lo que provoca que las partículas sedimenten por la acción de la gravedad. Como resultado de las fuerzas repulsivas entre las partículas se forma

un sedimento muy denso, el cual es técnicamente un "cake". Dichos sedimentos son de naturaleza dilatante, es decir que la viscosidad se incrementa con la velocidad de corte. En el caso (c) el comportamiento es muy semejante al de (b) solo que las partículas no son de tamaño uniforme.

Los estados (d) - (f) representan el caso donde la fuerza neta es atractiva, por lo que ocurre la llamada "coagulación". El estado (d) representa agregados en forma de cadenas, mientras que el estado (e), en forma de racimos compactos. En el estado (f) la fuerza de atracción es tan grande que las partículas forman una red que llena la totalidad del recipiente.

El estado (g) representa el caso donde la fuerza neta es atractiva pero de magnitud pequeña, lo que da como resultado que la floculación sea débil y reversible, de manera que existe un equilibrio entre la floculación y la desfloculación (Tixotropía).

El estado (h) muestra el fenómeno de floculación puenteada, en el cual las partículas se encuentran cubiertas parcialmente en su superficie por cadenas de un polímero que se ha adicionado; la molécula polimérica puede ser adsorbida simultáneamente en varias partículas, dando como resultado la floculación. Este fenómeno se aplica para la remoción de sólidos en el tratamiento de aguas residuales.

En el estado (i) la floculación se produce por la adición de un polímero libre (que no se adsorbe). El mecanismo de floculación se debe a una repulsión entre las cadenas del polímero libre y la superficie de la partícula. Como resultado de esto ocurre una fuerza osmótica fuera de las superficies de las partículas, lo que resulta en una floculación débil.

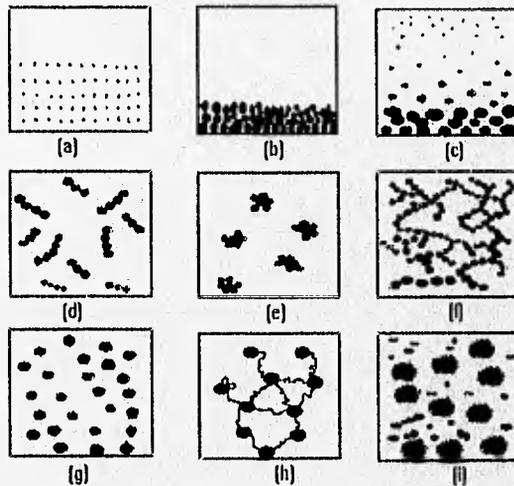


Fig. 1.1 Representación de distintos estados de dispersión. a) dispersión estable; b) dispersión estable (tamaño uniforme); c) dispersión parcialmente floculada (tamaño no uniforme); d) dispersión coagulada, agregados de cadena; e) dispersión coagulada, racimos compactos; f) dispersión coagulada, alias fracciones volumen; g) dispersión débilmente floculada; h) dispersión

1.1.3. Preparación de Dispersiones

Existen dos métodos para la preparación de dispersiones:

*Métodos de condensación*⁶. En ellos se da lugar a la formación de partículas a partir de unidades moleculares, dando un buen grado de dispersión; se involucran procesos tales como: la producción de núcleos, su crecimiento y estabilización. El proceso de nucleación ocurre en una solución sobresaturada, ya sea de forma heterogénea u homogénea, en función de la existencia de semillas (superficies iniciadoras del proceso) o ausencia de impurezas respectivamente. Para iniciar la preparación, primero se mojan los sólidos por el líquido (premezclado de los componentes de la dispersión), formándose una pasta gruesa, durante esta etapa se llevan a cabo tres procesos, el proceso de adhesión (contacto de las superficies), la penetración (de moléculas del líquido sobre la superficie porosa del sólido) y la propagación (de la superficie del líquido a la del sólido). Finalmente es importante llevar a cabo el proceso de desgasificación para evitar la oclusión de gases en la dispersión, originada generalmente durante la preparación.

Métodos de dispersión. En éstos se subdividen partículas grandes por trituración o molienda hasta obtener el tamaño deseado. Es importante tomar en cuenta que la relación tamaño de la partícula con el tiempo de molienda no es lineal; una molienda prolongada puede fragmentar los aglomerados disminuyendo el tamaño o puede incluso llegar a compactarlos, haciéndolos más grandes. Estos métodos son usados comúnmente, y se pueden llevar a cabo de varias formas, en función de los factores que la originan (Tabla 1.4).

Tabla 1.4 Ejemplos de métodos de dispersión.

Tipo de dispersión	Ejemplos de dispersores.
Impacto	Molino de dispersión, de bolas y de arena.
Corte	Molino de rodillos, disco de alta velocidad y propelas.
Cavitación	Dispersión por ultrasonido.
Extensión	Molino de dos aspas y extrusores.

En los métodos de dispersión por corte la velocidad de mezclado en un recipiente da lugar a distintos patrones de flujo⁷, en los cuales existen regiones donde el fluido se mueve más rápido y otras donde no, generalmente existe mayor velocidad en los lugares inmediatos a la propela. Para estos casos, se han desarrollado modelos acerca del diseño del agitador, cuyas variables de diseño⁸ son: el diámetro del recipiente, el tiempo de mezclado, la velocidad del impulsor o propela, el tipo de propela y el volumen del líquido.

La preparación de dispersiones se complica en el caso de dispersiones coloidales, ya que es necesario sintetizar químicamente la fase sólida de la dispersión, para luego hacer que esta permanezca suspendida dentro de la fase líquida.

1.1.4. Interacción entre las Partículas

Existen varios tipos de interacciones entre las partículas de una dispersión sólido-líquido, pero las más importantes son las térmicas, las de Van der Waals, las electrostáticas, las estéricas y las estructurales. Estas pueden atraer o repeler partículas dentro de la dispersión.

Fuerzas térmicas

Estas fuerzas se manifiestan por el movimiento que tienen las partículas sólidas dentro de las dispersiones debido a efectos de la temperatura y tamaño de la partícula de la fase sólida. La magnitud de la fuerza es del orden del término: $k_B T/a$, en donde a es el radio de la partícula, T la temperatura absoluta, y k_B la constante de Boltzmann.

Interacción Van der Waals

Las interacciones de Van der Waals son fuerzas de atracción entre átomos o moléculas que pueden llegar a ser de tal magnitud (en el contacto atómico) que provocan la aglomeración entre éstos, con la consecuente coagulación de la dispersión.

Se pueden distinguir tres tipos de atracciones entre átomos o moléculas como son: entre dipolos o interacciones de Keesom (1912), entre un dipolo y un dipolo inducido (Debye 1920) y las fuerzas de dispersión de London, donde se sabe que la nube electrónica que rodea al núcleo puede mostrar fluctuaciones locales de densidad de carga induciendo en el átomo un momento dipolar, el cual tendría una fluctuación de dipolo en función de la frecuencia de las fluctuaciones de carga (dipolo instantáneo). Estas últimas son las que originan las fuerzas de Van der Waals.

A continuación se describe brevemente el modelo de London según lo explica Th. F. Tadolos⁹:

Si se pudiera ver un átomo en una dispersión en un intervalo de tiempo muy pequeño (del orden de 10^{-15} s), la distribución electrónica aparecería con mayor concentración en uno de los lados del núcleo, lo que significa que se ha formado un dipolo instantáneo μ . Este dipolo propaga un campo eléctrico E que a una distancia "x" tiene una fuerza dada por:

$$F_E = \left(\frac{\mu}{x^3} \right) \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \right) \quad \dots (1)$$

si a esa distancia hay otro átomo, el campo lo polariza con un dipolo μ_1 (Momento dipolar inducido):

$$\mu_1 = \alpha \cdot E \quad \dots (2)$$

la energía de interacción entre esos dos átomos es entonces G y esta dada por: $\mu_1 \cdot E$ o $\alpha \cdot E^2$, con esto se puede escribir la siguiente expresión:

$$G = \left(\frac{\mu^2}{x^6} \right) \cdot \left(\frac{\alpha}{16 \cdot \pi^2 \cdot \epsilon_0^2} \right) \quad \dots (3)$$

esta puede escribirse de la siguiente manera:

$$G = -K \cdot x^{-6} \quad \dots (4)$$

Donde :

- G= Energía de interacción para distancias de separación pequeñas
- K= Constante para partículas del material 1
- x = Distancia de separación entre átomos

El modelo de London toma el caso más sencillo, el de dos átomos, con las siguientes consideraciones :

- ⌘ Sean dos átomos simples e idénticos,
- ⌘ Los átomos interactúan en el orbital S,
- ⌘ Los electrones se consideran como osciladores cuánticos de frecuencia ν . (El desplazamiento que tienen los electrones de su posición de equilibrio al producirse el dipolo instantáneo, es despreciable).

Su modelo que asume la energía de interacción de la ecuación 4, no es válido para separaciones muy pequeñas, semejantes al diámetro de las partículas (contacto atómico), ya que uno de éstos átomos puede inducir un momento dipolar a otro, pero para cuando esto ocurra, el primer átomo ya habrá modificado su configuración electrónica, produciendo las fuerzas que se conocen como retardadas. Estas provocan que la energía de interacción sea mayor, llegando a producir la coagulación. A las fuerzas que se ejercen a distancias de separación mayores a las del contacto atómico, se les llama también no retardadas.

El cálculo de ambas fuerzas, en el caso de cuerpos macroscópicos se lleva a cabo ya sea por el método de Hamaker o por el de Lifshitz. El primero supone que la fuerza entre dos partículas que interactúan, es aditiva entre cada par de átomos presentes cada uno en cada partícula; el segundo trata a los cuerpos como si estuvieran en forma continua, es decir, expresa la interacción en términos de las propiedades dieléctricas de éstos en el seno de la dispersión. Estos métodos no se pueden utilizar cuando las fuerzas son retardadas (separación entre partículas es menor a 0.2 nm aproximadamente).

Usando el método de Hamaker para calcular la energía en cuerpos macroscópicos, en vez de utilizar la energía descrita en la ecuación 4 para cada par atómico, supone que los átomos están

unidos en un cuerpo con un cierto volumen ΔV_1 , ejerciendo a un volumen ΔV_2 en el cuerpo vecino el potencial (energía de interacción) G_a , dado por:

$$G_a = - \left(\frac{K}{x^6} \right) \cdot n_1 \cdot \Delta V_1 \cdot n_2 \cdot \Delta V_2 \quad \dots (5)$$

donde n_1 y n_2 representan el número promedio de átomos por unidad de volumen en cada cuerpo. Con ello la suma se convierte en una integración. En la tabla 1.5 se muestran algunos ejemplos de ésta mostrada por J. Goodwin¹⁰ para el caso de una esfera de radio R a una distancia H de una superficie plana, y el de dos superficies planas separadas con una distancia H. Los cuerpos se consideran del mismo material con n átomos por unidad de volumen.

Tabla 1.5 Fuerzas debidas a efectos de dispersión¹⁰

Fuerza	Potencial	Fuerza para esfera sobre plano	Fuerza / Área plano en plano	Constante de Hamaker
No retardada	$-\frac{C_1}{x^6}$	$\frac{AR}{6H^2}$	$\frac{A}{6\pi \cdot H^3}$	$A = \pi \cdot C_1 \cdot n^2$
Retardada	$-\frac{C_2}{x^7}$	$\frac{2\pi \cdot B \cdot R}{3H^3}$	$\frac{B}{H^4}$	$B = 0.1 \pi \cdot C_2 \cdot n^2$

Para el caso de una esfera sobre una superficie plana, se puede ver de la tabla 1.5 que a una distancia H/2 (espacios medios) la energía tiene un valor de:

$$G_a = \frac{A \cdot a}{12 \cdot H} \quad \dots (6)$$

Esta consideración es pertinente si se supone que las partículas en una dispersión sólido-liquido son esféricas y que interactúan como cuerpos de Hamaker.

Interacción de la doble capa eléctrica ^{11,12,13}

Esta interacción se debe a la presencia de cargas en las superficies de las partículas. Dichas cargas se pueden adquirir ya sea por la adsorción preferente de ciertas especies iónicas, por la adsorción de polielectrolitos o por la sustitución isomórfica (sustitución de cationes dentro de una estructura cristalina de algunas arcillas minerales por cationes de menor valencia, sin cambios en la estructura, esta sustitución vuelve a la partícula totalmente negativa eléctricamente).

Todas las soluciones tienden a que la suma de todas sus cargas positivas y negativas sea cero (electroneutralidad).

La doble capa puede imaginarse como una caja que contiene una solución de un electrolito con sus iones uniformemente distribuidos, suponiendo cargada una de estas paredes, se atraerán de la solución un número equivalente de iones de signo contrario (contraiones); a fin de mantener eléctricamente neutra a la solución. Por consiguiente existe una redistribución de los iones de la solución, pues los contraiones serán atraídos por la pared y los iones de carga semejante a la de la pared serán repelidos por ésta.

La agitación térmica tenderá a distribuir a todos los iones uniformemente en la solución. Si la agitación no fuera muy representativa, la pared atraería una cantidad de contraiones equivalente a su carga y quedaría cubierta de los contraiones necesarios para neutralizarla. La pared y los contraiones adheridos a ella formarían una doble capa, el resto de la solución no sería afectada, pues la doble capa en conjunto es eléctricamente neutra.

Este concepto de la doble capa fue introducido por Helmholtz, quien consideró que los contraiones neutralizan la carga de la pared en un solo plano.

El efecto de la agitación térmica crea una doble capa difusa o capa de Gouy-Chapman, esta teoría sugiere que el líquido no tiene estructura ignorando la adsorción específica y el volumen específico de los iones. La limitación de dicha teoría es que al suponer cargas puntiformes, las concentraciones iónicas calculadas cerca de la superficie cargada resultan muy elevadas.

Existe otra teoría de la doble capa difusa, la de Stern, que tiene una corrección que toma en cuenta el tamaño finito de los iones en la primera capa iónica adyacente a la superficie cargada. Las fuerzas electrostáticas son demasiado fuertes por adsorción y están reforzadas por las fuerzas de Van der Waals, que la agitación térmica no puede contrarrestarlas, por lo que parte de los contraiones quedan adheridos, en capa compacta a la superficie cargada.

La doble capa en general se constituye por dos partes, una capa compacta (Stern), en la cual el potencial cambia de ψ_0 a ψ_d , y una capa difusa donde el potencial cae de ψ_d a cero; las dos capas están en equilibrio.

Un potencial electrostático en un punto representa el trabajo necesario para traer a dicho punto una unidad de carga desde el seno de la solución. Son importantes los potenciales de tres capas. El primero es el correspondiente a la superficie cargada (la pared) representado por ψ_0 y es llamado el potencial de Gouy. El segundo es el correspondiente al límite entre la parte compacta (Stern) y la partícula difusa (Gouy) de la doble capa, es llamado el potencial de Stern y se representa por ψ_d . El tercero corresponde al límite entre la solución que se adhiere a la superficie de la pared, y la solución que puede moverse respecto de la pared o de la partícula. Este límite es el plano de corte que separa la parte fija de la parte móvil de la doble capa, el potencial es llamado potencial zeta, se representa por la letra griega ζ y corresponde a la parte de la capa de Gouy que no está dentro de una capa de solución firmemente unida a la molécula.

Interacción estérica

La interacción estérica ocurre cuando las partículas contienen capas de surfactante o macromoléculas adsorbidas en su superficie, el espesor que formen alrededor de la partícula (δ) será función de la configuración (disposición de la estructura) de los surfactantes o macromoléculas adsorbidos. Cuando dos partículas con dichas capas se aproximan a una separación menor que 2δ , ocurren interferencias entre las cadenas. Bajo ciertas condiciones, esta interferencia produce una repulsión como resultado de algunos de los siguientes efectos:

- (1) El primer efecto se origina por el mezclado de las capas adsorbidas, en el cual se produce una repulsión favorecida por el disolvente, debido a que éste tiene un potencial químico mínimo en la región de traslape, llevándose a cabo aquí la difusión del disolvente del seno de la solución, produciéndose la repulsión entre las partículas.
- (2) Originado por la pérdida de la entropía configuracional de las cadenas al aproximarse una segunda superficie. Esta aproximación restringe el volumen disponible para la cadena adsorbida, llevando a la pérdida de la entropía configuracional. A este efecto se le llama "efecto de restricción de volumen".

Interacción por fuerzas estructurales

Se deben a la modificación de la estructura del disolvente cerca de las superficies de las partículas como resultado de restricciones de empaquetamiento. No producen una repulsión con un alcance suficientemente largo para lograr la estabilidad pero pueden tener un efecto comparativamente grande en separaciones pequeñas entre las partículas donde tienen un carácter oscilatorio, pudiendo tener una papel esencial en la peptización (redispersión de una suspensión coagulada).

Todas las interacciones entre partículas mencionadas pueden ejercerse en una dispersión, la magnitud de ellas determinará si la atracción total hace que la suspensión sedimente o no, conociendo si la dispersión es estable o no. Esto puede controlarse a través de una estabilización adecuada.

1.1.5. Estabilización de Dispersiones Coloidales

La estabilidad de una dispersión coloidal es la capacidad de ésta para mantener el estado coloidal y la completa homogeneidad a través de todo su volumen (que no sedimento).

Por efecto de la gravedad las partículas de una dispersión pueden sedimentar, ya sea en forma espontánea en un tiempo corto o por la adición de pequeñas cantidades de sales. En éste último caso se puede decir que el tamaño de las partículas sólidas aumenta, haciendo flocular (o

coagular) la dispersión. Si se invierte este efecto por un cambio apropiado en el disolvente, se dice que existe una peptización o desfloculación.

El tamaño de partícula puede aumentar por muchas causas comúnmente colisiones entre partículas (agregación), haciendo que la dispersión flocule. Esto se debe a las fuerzas de atracción que existen en la suspensión.

La manera en la cual procede la agregación de una dispersión depende del mecanismo de agregación, la concentración de partículas, el tamaño y forma de la partícula, así como de varias condiciones tales como la temperatura, condiciones de agitación y en algunos casos la forma de adición de los ingredientes.

Se puede predecir la manera en la cual se llevará a cabo la formación de la estructura de agregación en ciertos casos, dependiendo de la naturaleza de la fuerza involucrada. Por ejemplo, las estructuras formadas como resultado de una atracción muy grande, deberían formarse aleatoriamente, debido a que las partículas se pegarán tan pronto como se atraigan, dando como resultado un sistema altamente desordenado.

Se pueden formar varios tipos de estructuras: en cadena, en agrupamiento compacto o estructuras abiertas. Según el tipo de estructura formada, será el tipo de sedimento en la coagulación.

Las partículas coloidales normalmente se encuentran en constante movimiento en la fase líquida debido al movimiento Browniano, aquí experimentan las interacciones descritas anteriormente, con lo que puede controlarse dicha formación de estructuras, estabilizando el sistema.

Existen varios modelos desarrollados para la estabilización de dispersiones; todos ellos se basan en la interacción entre dos partículas. Entre los más reconocidos se encuentra la teoría desarrollada por Derjaguin y Landau en 1941 y por separado Verwey y Overbeek en 1948, también conocida como teoría DLVO.

Teoría DLVO¹⁴ (Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek)

Es una teoría cuantitativa la cual trata la estabilidad en base a los cambios de energía que se producen al acercarse mutuamente las partículas. Se requieren cálculos de las energías de atracción y repulsión en función de la distancia entre las partículas.

La expresión general para la energía de repulsión V_R que resulta de la superposición de las partes difusas de las dobles capas que rodean dos partículas esféricas idénticas es muy complicada pero la siguiente es una buena aproximación:

$$V_R = \frac{B \cdot D \cdot k^2 \cdot T^2 \cdot a \cdot \gamma^2}{z^2} \cdot \exp(-zH) \quad \dots (7)$$

Donde: H: distancia más corta entre esferas de radio a;
 B: $4.36 \times 10^{20} [A^2 s^{-2}]$;
 z: número de carga del contraión;
 k_B : constante de Boltzmann;
 T: temperatura absoluta [K].

La energía de atracción V_A proviene de las fuerzas de Van der Waals. Tomando el caso de dos esferas idénticas en el vacío, con una distancia más corta entre las esferas, no mayor que unos 10 a 20 nm y cuando la distancia H es menor que el radio a , la energía de atracción se puede escribir así:

$$V_A = \frac{a \cdot A_{11}}{12 \cdot H} \quad \dots (8)$$

Para tomar en cuenta el medio de dispersión en esta expresión, se puede sustituir la constante de Hamaker A por una constante media entre la del medio y la partícula. Esta constante es independiente de la distancia y la concentración del electrolito.

$$A_{112} = A_{11} - 2A_{112} + A_{22} = (A_{11}^{1/2} - A_{22}^{1/2})^2 \quad \dots (9)$$

Se pueden combinar V_R y V_A para dar la Energía total de interacción así $V_T = V_R + V_A$ (d , a y b respectivamente en la figura 1.2). Solamente cuando la energía térmica de las partículas es lo suficientemente grande para superar el máximo en d , se pueden acercar a distancias menores a la que corresponde este máximo, dando lugar a la formación de una nueva entidad o coalescencia (fenómeno común en emulsiones) y hasta coagular ($H = 0$).

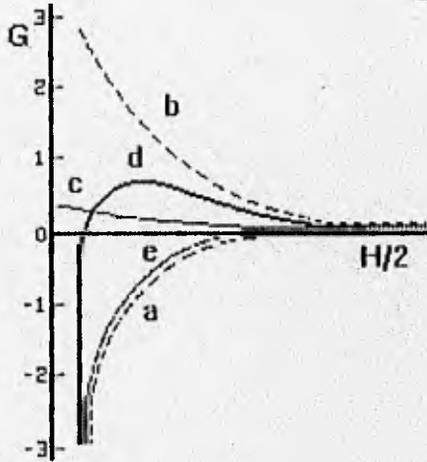


Figura 1.2 Ejemplo de las energías de repulsión V_R , de atracción V_A y total de interacción V_T como función de la distancia entre dos platos paralelos.

Estabilización estérica

Se trata de la creación de una barrera física ya sea por adsorción de un polímero sobre las partículas de la dispersión o por una reacción química sobre la superficie de dichas partículas (llamada quimisorción); existe una distancia entre las partículas en la cual se produce una interacción tal que estas flocculan, la creación de dicha barrera, no permite que las partículas se acerquen más, evitando así la floculación. Para una estabilización estérica se necesita :

- I Que el polímero sea soluble en el disolvente.
- II Cubrir toda la superficie y que las cadenas se encuentren bien fijadas.
- III Que el ancho total de la barrera sea el suficiente para impedir la floculación.

Las barreras estéricas pueden ser de diferentes formas, la gelatina, la caseína, la goma arábiga, la albúmina y los aceites vegetales son usados como dispersantes en pinturas y tintas.

Una dispersión estabilizada estéricamente es estable al corte sobre varios tamaños de partícula; existiendo floculación solamente si cambia la solubilidad del medio.

Estabilización electrostática

Según la distancia a la que se encuentren las partículas en la doble capa, dominará la atracción o la repulsión. La atracción domina a distancias muy cortas y muy largas, pero a una distancia intermedia, la repulsión gana y crea una barrera de energía que mantiene a las partículas separadas, estabilizando así el sistema.

Al aumentar la concentración y/o carga eléctrica del electrolito, la doble capa se comprime, disminuyendo el alcance de repulsión y también al ψ_d destruyendo la barrera de energía. Existen concentraciones críticas de coagulación en las cuales la dispersión floccula.

Estabilización combinada

La estabilización combinada se logra al utilizar simultáneamente cualquier combinación de las estabilizaciones mencionadas. Normalmente se utiliza en situaciones reales, principalmente en medios acuosos, cuando es necesario crear barreras físicas y de energía al mismo tiempo para que la dispersión mantenga su estado y no sedimente.

1.2 Fluidos Electro-Reológicos (FER)

Los FER's pueden constituir una tecnología aplicada muy novedosa que facilite el diseño de máquinas y dispositivos basados en ella¹⁵. Dichos dispositivos tendrán mejores características que los que hoy en día realizan su trabajo. El uso eficiente de la energía aplicada, el control instantáneo así como muchas otras propiedades han hecho que estos fluidos sean el centro de interés de la comunidad científica e industrial. Algunos de los dispositivos son: válvulas, embrages, absorbedores de choque y sistemas robóticos entre otros. Sus mecanismos aún no se conocen con certeza pero se realizan desarrollos tanto para los dispositivos como para el mejor entendimiento de los materiales que los constituyen.

En esta sección se definirá el efecto electro-reológico, las características de los materiales que lo integran. Se considera una breve semblanza de la investigación prominente llevada a cabo; se mencionan algunas aplicaciones potenciales de los FER y finalmente se trata el problema de la comercialización de dispositivos que funcionen con FER.

1.2.1. El Efecto Electro-Reológico (EER) y sus Mecanismos

Los fluidos electro-reológicos son dispersiones sólido-líquido que bajo la aplicación de un campo eléctrico (E) presentan un cambio substancial y reversible en sus propiedades de flujo (un incremento notable en su viscosidad), dando lugar al llamado Efecto Electro-Reológico (EER).

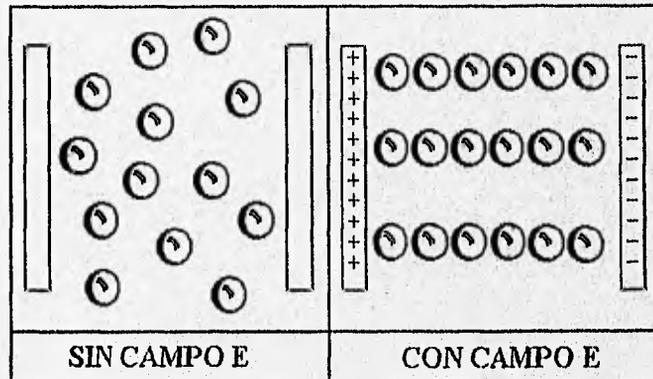


Figura 1.3 Representación esquemática de la formación de cadenas de partículas en un FER ante la aplicación de un campo eléctrico: a) Sin campo eléctrico E; b) Con campo eléctrico E.

Estas suspensiones poseen propiedades que dependen reversiblemente del campo eléctrico (E), entre ellas está la capacidad de formación de estructuras fibrosas (fibrilas) paralelas a la dirección del campo eléctrico, es decir, las partículas se orientan y se atraen unas a otras, formando cadenas que ocupan prácticamente todo el espacio entre los electrodos en los que aplica dicho campo.

La formación de las fibrilas se muestra esquemáticamente en la figura 1.3. Ellas son en gran parte las causantes del EER, formando una estructura en el sistema con lo que se produce el cambio en el comportamiento en flujo en tan solo un instante.

La respuesta electro-reológica, es decir el tiempo que transcurre para que ocurra el cambio en la viscosidad de la suspensión ha sido medido por algunos autores¹⁶ y han encontrado que ocurre en un tiempo del orden de milisegundos, sin embargo, existen problemas para relacionar este tiempo con el mecanismo del fenómeno, ya que la formación de fibrilas se puede completar hasta en unos cuantos segundos.

Se han propuesto varias teorías para explicar el mecanismo del EER, la más aceptada¹⁷ es la que señala una polarización entre las partículas suspendidas en un medio aislante bajo la aplicación de un campo eléctrico. Existen otras que explican el mecanismo en función de la deformación de la doble capa eléctrica y los puentes de agua entre las partículas.

No existe aún un consenso general para el mecanismo observado en este fenómeno. Esta situación es adversa ya que se requiere del entendimiento del mecanismo para poder optimizar las formulaciones de los fluidos y así utilizarlos en aplicaciones específicas.

A continuación se mencionan las teorías propuestas para explicar el mecanismo del EER:

Teoría de la doble capa

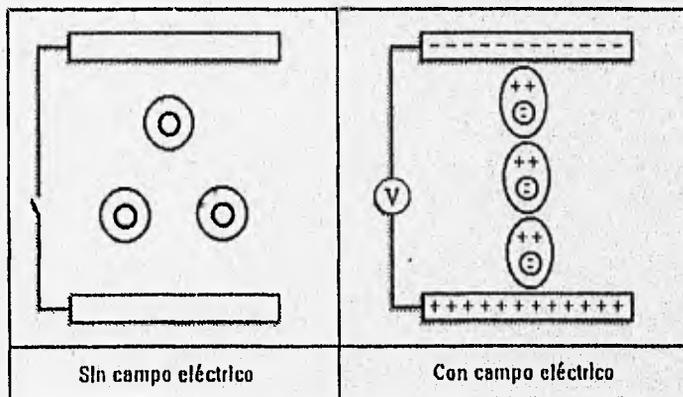


Figura 1.4 Representación esquemática de la teoría de la doble capa para explicar el mecanismo que se lleva a cabo en el efecto electro-reológico: a) Sin campo eléctrico; b) Con campo eléctrico.

Esta teoría fue propuesta por Klass y Martinek¹⁸, en la figura 1-4, se puede apreciar como la aplicación de un campo eléctrico produce una deformación en la doble capa que rodea a cada partícula, deformándose en el extremo donde la partícula tiene iones de carga contraria a la del electrodo que aplica el campo. Este mecanismo es diferente al de una interacción coulombica entre dipolos ya que la deformación conduce a una distribución de cargas fuera del equilibrio, dando lugar a repulsiones y/o atracciones de cargas. La crítica principal que recibe esta teoría es que la longitud característica de Debye de las dobles capas que rodean a las partículas es demasiado grande y frecuentemente mayor a la distancia de separación entre electrodos. Esto ha llevado a la búsqueda de otras interpretaciones.

Teoría de los puentes de agua

Stangroom en 1983¹⁹ afirma que para que un fluido manifieste un EER debe constituirse por un líquido hidrofóbico y una partícula hidrofílica porosa, incluyendo una cierta cantidad de agua (adsorbida en la partícula). Supone que los iones que se encuentran atrapados en los poros de la partícula pueden incrementar su movilidad al disolverse en agua. Bajo la influencia de un campo eléctrico estos iones movilizan la capa de agua que se encuentra alrededor de la partícula en la dirección del electrodo con carga opuesta, de este modo uno de los extremos de la partícula se satura de agua y funciona como un puente o unión que produce el EER; al dejar de aplicar el E, los iones y el agua retornan a los poros, disipando el dipolo inducido. Aunque este mecanismo es factible en sistemas que contienen agua, no es aplicable para los sistemas "anhídros". Se puede argumentar que el agua no es un requisito indispensable para observar un EER.

Teoría de la polarización de las partículas

Presentada por Mason en 1974, en ella se pueden distinguir cinco tipos distintos de polarización, tales son:

- 1) La electrónica: proviene de deformaciones pequeñas que pueden ocurrir en la distribución de carga positiva o negativa de los átomos. A pesar de que la contribución de dicha polarización a la polarización total de la partícula es pequeña, puede influir directamente en la constante dieléctrica de la partícula.
- 2) La atómica: se produce por el movimiento dentro del reticulado sólido de átomos cargados cuando se exponen a un campo eléctrico; también contribuye a la constante dieléctrica de partículas.
- 3) La dipolar: aparece cuando las partículas contienen un momento dipolar permanente, constituyendo una parte importante al hablar de polarización de macromoléculas.
- 4) La normádica: ocurre a través del movimiento de cargas generadas térmicamente en una partícula sobre diversas intersecciones en el reticulado. Puede involucrar tanto el movimiento de electrones o protones.
- 5) La interfacial o de Maxwell-Wagner: proviene de la acumulación de carga en las interfases entre partículas. Aquí las cargas iónicas o electrónicas pueden movilizarse libremente de un lado a otro de la partícula, lo que origina la existencia de momentos dipolares grandes. Ocurre generalmente en sistemas no homogéneos donde los materiales tienen distintas conductividades y las cargas pueden moverse libremente.

Realmente el origen de la polarización no importa, lo que importa es la velocidad y magnitud de ésta en el EER, por ejemplo: en un sistema electro-reológico la formación de aglomerados se debe a las interacciones entre partículas; si la rotación de las partículas es muy rápida, la dirección del campo también lo es, esto hace que la polarización efectiva de la partícula sea pequeña, disminuyendo el EER; por ello una velocidad óptima puede incrementar el fenómeno electro-reológico. Una vez que se ha establecido la polarización, la interacción entre fuerzas coulombicas interparticulares genera una estructura fibrilar. En esta teoría se supone que las estructuras fibrilares se degradan cuando el FER fluye. La agregación de partículas en un FER concentrado, provocaría una rotación de agregados de partículas en vez de partículas individuales.

Todas estas teorías suponen ciertos mecanismos, pero ninguno ha logrado convencer totalmente la opinión de los científicos, ya que no esclarecen la totalidad del fenómeno.

Para lograr un mejor entendimiento, es necesario analizar la importancia relativa de las interacciones entre partículas, tal como lo hacen algunos autores²⁰.

En la sección 1.1.4. se hizo referencia a ciertas fuerzas importantes en una suspensión sin la aplicación de un campo eléctrico, ellas eran: las de London-Van der Waals, las de la doble capa eléctrica, las estéricas, las viscosas y las térmicas. Estas fuerzas controlan la estructura de la suspensión y la viscosidad de ésta puede entenderse en términos de ellas. Cuando se aplica un campo eléctrico, las fuerzas de polarización se hacen importantes e incluso llegan a dominar el comportamiento estructural de la dispersión. Sin embargo, una buena respuesta electro-reológica requiere de la preparación de una suspensión estable en ausencia de campo eléctrico. En la tabla 1.6 se muestran las energías de interacción entre partículas características para suspensiones de FER's.

La capacidad de un campo eléctrico para alterar la estructura de una suspensión puede ser medida por las magnitudes de las relaciones de la energía de polarización con las que controlan el comportamiento de la suspensión sin la aplicación de un campo eléctrico. Dichas relaciones se muestran en la tabla 1.7.

Al someter un FER a un esfuerzo cortante, las partículas experimentan un arrastre viscoso, el cual se regula por las interacciones hidrodinámicas con otras partículas en la suspensión. Estas interacciones modifican la microestructura y hacen difícil la descripción del comportamiento en flujo. Las fuerzas hidrodinámicas se muestran en la tabla 1.6 como fuerzas viscosas, en ellas las partículas en una suspensión están sujetas a una velocidad de corte.

El número adimensional de Mason, es la relación entre las fuerzas viscosas y las de polarización, este parámetro describe la interacción entre las fuerzas dipolares y el flujo, las fuerzas viscosas tienden a deshacer la estructura y las de polarización a formar estructuras (fibrilas).

Tabla 1.6 Energías de interacción entre partículas características en FER's.

Energía	Escala
Térmica	$\frac{k_B \cdot T}{a}$
De London-Van de Waals	$\frac{A}{12 \cdot H}$
De la Doble Capa Eléctrica	$4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot \psi^2$
De Polarización	$\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot a^3 \cdot (\beta \cdot E)^2$
Viscosa	$6 \cdot \pi \cdot \eta_s \cdot a^2 \cdot \gamma$

Cuando las polarizabilidades de las partículas y del medio son muy semejantes se puede ver que las fuerzas de polarización se hacen despreciables en comparación con las térmicas ($\lambda \rightarrow 0$). Bajo estas condiciones se puede considerar a una suspensión de esferas rígidas, donde se puede caracterizar la estructura por medio del movimiento térmico y la perturbación característica de la estructura. Esto está dado por el número de Peclet, que representa la relación de las fuerzas viscosas y térmicas.

Desde un análisis de las magnitudes relativas de las interacciones entre partículas, es claro que un balance de las fuerzas determina si la suspensión será estable o sedimentará. En los FER's es más importante la magnitud de las fuerzas de polarización en relación a otras fuerzas de la suspensión.

En la tabla 1.7 se han calculado los valores de las interacciones para una suspensión bajo un campo eléctrico de 2 kV/mm. Las fuerzas de polarización entre partículas de 1 μm de tamaño son las que dominan. De hecho para que las fuerzas térmicas fueran comparables a las de polarización sería necesario que el campo eléctrico se redujera en casi tres órdenes de magnitud. En consecuencia, aún para campos eléctricos pequeños, la estructura de la suspensión está determinada por completo por las fuerzas de polarización. Esto conlleva a realizar simplificaciones en el desarrollo de modelos para la respuesta electro-reológica ya que las partículas pueden considerarse como esferas rígidas interactuando solamente con fuerzas de polarización y viscosas.

Tabla 1.7 Magnitudes relativas de interacciones entre partículas*.

Relación	Grupo adimensional	Magnitud
<u>Van der Waals</u> Térmica	$\frac{A \cdot a}{24 \cdot H \cdot k_B \cdot T}$	2
<u>De la doble Capa Eléctrica</u> Térmica	$\frac{4 \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot a^3 \cdot \varphi^2}{k_B \cdot T}$	6.8
<u>Polarización</u> Térmica	$\lambda = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot a^3 \cdot (\beta \cdot E)^2}{k_B \cdot T}$	96,000
<u>Viscosa</u> Térmica	$N_{Pe} = \frac{6 \pi \cdot \eta_s \cdot a^3 \cdot \gamma}{k_B \cdot T}$	92,000
<u>Viscosa</u> Polarización	$N_{Mu} = \frac{6 \cdot \eta_s \cdot \gamma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot (\beta \cdot E)^2}$	1

* Calculado para partículas de 1µm de radio con $\epsilon_p=10$, $H=20nm$, $A=1kBT$, $\psi=5mV$, en un solvente donde $\epsilon_s=2$, $\eta_s=0.1$ Pa.s, y sujeto a una velocidad de corte $\gamma=200$ 1/s y un campo eléctrico de 2kV/mm. Fuente²¹.

1.2.2. Trabajos Previos

El fenómeno electro-reológico se conoce también con el nombre de "Efecto Winslow", ya que Willis Winslow fue el primero que lo reportó en 1949²². Este ingeniero americano trabajó en Colorado en la purificación de aceites minerales utilizando campos eléctricos. Una de las impurezas que trabajó fue el carbonato de calcio, cuyas partículas coagulaban bajo la acción del campo, formando aglomerados que ayudaban a la resistencia al flujo, dando como consecuencia un incremento notable en la viscosidad. Obtuvo buenos resultados con partículas adsorbentes, tales como: almidón, sílice, etc. Todas ellas tenían su conductividad eléctrica y su constante dieléctrica más altas que las del líquido. Reportó así mismo las siguientes características de las suspensiones de partículas de sílica gel en aceites de baja viscosidad.

- 1) Bajo un campo eléctrico de 3 kV/mm de magnitud, las suspensiones mostraban una tendencia a la fibrilación, formándose estructuras de partículas agrupadas paralelas al campo eléctrico.
- 2) Se requiere de una fuerza proporcional al cuadrado del campo eléctrico para mantener totalmente fijo al fluido entre los electrodos. Por tanto a bajos esfuerzos cortantes, el sistema se comporta como un sólido (punto de cedencia).

- 3) A esfuerzos mayores que este esfuerzo de cedencia, la suspensión fluye con una alta viscosidad, de nuevo proporcional al cuadrado del campo eléctrico.

Entre las fases activadoras, Winslow hizo hincapié en el agua, la cual adsorbida en pequeñas cantidades, cambia la densidad de carga de la doble capa eléctrica, incrementando el EER.

Muchas de las formulaciones y mecanismos originalmente descritos por Winslow tienen importancia para los materiales electro-reológicos que se evalúan hoy en día.

A pesar de que esta nueva tecnología era prometedora no fue tomada en cuenta durante 15 años debido a la baja resistencia mecánica de los FER bajo la aplicación de campo eléctrico, así como también su sedimentación e inestabilidad a altas temperaturas.

En 1967, D.L. Klass y T.W. Martinek²³ estudiaron el papel que desempeñaba el agua sobre la sílica en un FER. Las partículas de sílica tienen una gran área de superficie y pueden retener grandes cantidades de agua, la cual se encuentra unida por un enlace físico o de agua "libre".

En una patente²⁴ Westhave hizo intentos para mejorar las características del FER formulado a base de almidón, (el desarrollado por Winslow), sugirió utilizar las propiedades de los electrolitos para mejorar la magnitud del EER.

En 1963 Yu Deinega y G. Vinogradov estudiaron lubricantes electrosensibles en la USSR, también demostraron que las propiedades electro-reológicas en la interfase son frecuentemente de mayor importancia que las características de volumen de las partículas y el medio, en particular de las constantes dieléctricas.

En un principio los trabajos de estudio de FER, utilizaron fluidos con componentes elegidos al azar, realizando modificaciones en la superficie de las partículas sólidas con el fin de mejorar la magnitud del EER. Lo más común fue cubrir la superficie de las partículas de la fase sólida con "activadores", (agua, ácidos orgánicos, aminas, surfactantes, iones metálicos etc.). Existe una concentración óptima de contenido de activador ya que en algunos casos su exceso es contradictorio para el EER²⁵ debido a que pueden conducir la poca corriente eléctrica que se aplica.

Los surfactantes juegan un papel importante en la magnitud del EER; hacen posible mejorar el enlace de las partículas sólidas con el medio disperso. La cantidad que debe añadirse depende del área superficial, del volumen de poros en la partícula, de su peso molecular y su densidad. Como una regla, se utilizan surfactantes de bajo peso molecular y aditivos poliméricos que dan una mayor estabilidad a las suspensiones. Este punto fue estudiado por Peterzhik et al.²⁶, ellos postularon que bajo el efecto del campo eléctrico el surfactante adquiere un estado de cristal líquido caracterizado por un incremento en la viscosidad y una elevación en la permitividad de dichas substancias.

H. Block y L. Kelly²⁷ propusieron una nueva forma de resolver el problema de crear la densidad de carga óptima en las partículas, cambiando el uso del activador conductor común por el uso como fase sólida de "conductores electrónicos". Estos materiales no conducen iónicamente, son semiconductores orgánicos. Los electrones actúan como simples acarreadores de la carga en ellos, la transfieren de un lado a otro de la partícula, eliminando la necesidad de la presencia de iones. Algunos investigadores de la compañía "Bayer" en Alemania y de la Universidad de Michigan en los Estados Unidos²⁸ trabajaron con mezclas de aluminio y sílica, las zeolitas, que tienen una estructura porosa con un catión metálico. Dichos cationes no se encuentran unidos (covalentemente) en el retículo cristalino sino que se mueven libremente sobre la superficie y ante

la aplicación de un campo eléctrico, este efecto se incrementa. Con estos fluidos se ha conseguido formular suspensiones anhidras para aplicaciones de altas temperaturas.

J. Carlson, de la compañía "Lord", prefirió utilizar hidrazina de sulfato de litio $\text{LiN}_2\text{H}_5\text{O}_4$, que es un cristal líquido con una permitividad dieléctrica anisotrópica y una conducción únicamente a lo largo de un eje. Este concepto se basa en como se transmite la corriente, siendo los protones el medio de transmisión y no los electrones, éstos se adhieren a un acarreador "molecular" formando iones parecidos al $\text{N}_2\text{H}_5^{+1}$. Así esta sustancia se polariza con facilidad y las cargas en campo se desplazan a distancias considerables, estas poseen una conductancia menor que otras suspensiones, estabilidad, un buen intervalo de temperatura y no requiere la adición de anticoagulantes.

Algunos investigadores japoneses²⁹ han propuesto el uso de partículas compuestas para incrementar la polarización y las propiedades eléctricas que se requieren en las superficies de las partículas. Su parte interior se compone de un material conductor (un metal) cubierto en su exterior por una capa delgada de una película aislante (ejemplo: Aluminio más hidróxido de potasio en agua).

Un problema importante de los FER es la sedimentación. Para resolverlo se ha tratado de usar partículas de bajo peso molecular y que en teoría tengan la misma densidad que la fase líquida, por ejemplo la sílica. Algunas propuestas³⁰ para solucionar el problema se describen en la tabla 1.8:

Tabla 1.8 Sugerencias propuestas para resolver la sedimentación en FER's.

Acción estabilizadora	Ventajas/Desventajas
Uso de partículas huecas por dentro en la fase sólida	La fase líquida no ingresa al interior de la partícula, evitando la sedimentación por un largo tiempo.
Uso de partículas en forma de plumas o fibras en la fase sólida	Presentan propiedades eléctricas que permiten la estabilidad de los FER, aumentando además el EER.
Adición de aditivos tixotrópicos en la fase líquida	Forman una matriz que contiene partículas electroactivas en sus celdas, la efectividad del EER disminuye.
Aplicación de un campo magnético	Requiere de materiales ferromagnéticos en la fase sólida.

Como se puede notar se han realizado ya numerosas investigaciones sin embargo, aún se encuentran algunos problemas tales como: su comercialización; la falta de conocimiento de más materiales que desarrollen un buen EER y la falta de una teoría que explique el mecanismo que se lleva a cabo, todos ellos son interrogaciones que solo podrán resolverse a través de la investigación continua.

1.2.3. Componentes de un FER

Un FER se constituye de un sólido suspendido en un líquido dieléctrico, formando lo que se conoce como suspensión o dispersión sólido-líquido, este material de dos componentes únicamente fue utilizado desde las primeras formulaciones en los cuarentas, desde entonces se han desarrollado un gran número de combinaciones de líquidos y sólidos dispersos que producen un mejor EER. Hoy en día ya no son esas simples suspensiones; además de los componentes elementales (líquido y sólido), contienen un surfactante y una fase activadora³¹. El surfactante previene que las partículas se adhieran entre ellas y sedimenten en la ausencia de campo eléctrico. La fase activadora es normalmente agua o alcohol y el mecanismo por el cual el trabaja no se conoce perfectamente, pero se cree que el agua repelida por el líquido de la suspensión se aloja en las superficies de las partículas, las sales disueltas se polarizan bajo un campo eléctrico, añadiendo su carga a la de la polarización intrínseca de las partículas (Teoría de puentes de agua).

En las patentes se encuentran disponibles muchas formulaciones de FER. Se han patentado muchas desde la primera en 1947 por Willis Winslow³², desafortunadamente las propiedades reportadas en las patentes son vagas, obtenidas por diferentes metodologías de prueba, con definiciones inconsistentes y distintas unidades de medición. En la tabla 1.9 se muestran algunas formulaciones reportadas en patentes contiene algunos de los componentes más comunes para formulaciones de FER, entre los sistemas más comunes se encuentran (fase sólida-líquida-fase activadora): sílica/aceite silicón/agua; celulosa/parafinas-cloradas/dietilamina; almidón/hidrocarburos/formamida; arenas/aceites minerales/alcoholes; entre otros.

Tabla 1.9 Algunas formulaciones de FER's reportadas en patentes⁴¹.

Partícula	Fluidos	Surfactantes	Fase activadora	Ref.
Almidón, carbón etc.	Aceite de transformador, de oliva y mineral	No se menciona	No se menciona	33
Silica gel	Aceite de transformador	Oleato ferroso, Naftenato de plomo, naftenato de sodio, etc.	Agua, glicerina, dietilenglicol	34
Silica gel	Aceite mineral, Keroseno	Diesterato de Aluminio, estereato de litio	Agua, etilenglicol	35
Silica (saturada con agua)	Aceite mineral, líquidos oleosos no polares	Monooleato de glicerol, alcoholes.	Butilamina, hexilamina, etanolamina, etc	36
Alúmina, alúmina/silica	Líquidos oleosos no polares con cte. dieléctrica <10, aceite mineral	Sulfonatos, alcoholes sulfonatados, ácidos grasos, laureatos, alcoholes grasos, etc.	Aminas, ácido acético, agua etc.	37
Silica con superficie esterificada por monoesteratos de glicerol de ácidos grasos.	Líquidos oleosos no polares on cte. dieléctrica <, 10 aceite mineral.	Surfactantes no iónicos, catiónicos y aniónicos.	Agua, aminas, etc.	38
Silica gel	Aceite Silicón	Polisiloxanatos funcionales	Agua	39
Silica gel	Hidrocarburos, parafinas, olefinas, aromáticos	Polímeros hidrocarbonados que contienen hidrógeno	Agua	40

1.2.6. Aplicaciones

La idea de aplicar el fenómeno electro-reológico surgió en 1947, cuando Willis M. Winslow obtuvo la primera patente⁴². Este descubrimiento fue muy excitante, y el futuro de los FER's se veía promisorio, ya que podrían servir para la creación de una gran diversidad de nuevos dispositivos.

El día de hoy se cuenta con varios prototipos tales como: absorbedores de choque, embragues, frenos, transmisiones, válvulas, amortiguadores y hasta un dispositivo de "tracking" complejo para máquinas copiadoras. Su funcionamiento está basado en el *control del movimiento* de un fluido bombeado a través de pequeños canales. La principal atracción de estos dispositivos son sus rápidos tiempos de respuesta, lo que hace posible retroalimentar sistemas de control para aplicaciones en la robótica y en la industria automotriz, de una mejor forma que las alternativas existentes⁴³. El panorama tan grande de las aplicaciones motiva a que el interés por el fenómeno siga creciendo.

Aquí se ilustran algunas aplicaciones potenciales :

Embrague Automotriz Electro-Reológico⁴⁴

El embrague automotriz es una de las metas más aventuradas de los FER's. Si los ingenieros automotrices pudieran imaginar uno de ellos, sería de la siguiente forma: el fluido dentro de este embrague acoplaría la máquina del automóvil a la flecha impulsora (la cual proporciona la movimiento a las ruedas). Cuando el fluido se hallara en estado sólido, obligaría a rotar a la flecha, mientras que en estado líquido, permitiría separar la máquina de la flecha, dejándola girar libremente, tal como sucede en el "punto muerto" en un automóvil. Este embrague constaría de pocas partes que fallaran y su tiempo de respuesta del orden de milisegundos, dejaría ver a los embragues mecánicos como dispositivos muy lentos.

Válvula Electro-Reológica⁴⁵

Esta válvula se utilizaría en sistemas hidráulicos formados por FER's. La suspensión podría moverse a través del sistema libremente, hasta llegar a un capacitor donde se aplicaría un campo eléctrico en las paredes o canales, con lo que se regularía la resistencia al flujo (viscosidad) del FER llegando incluso hasta formar un tapón que impediría el movimiento. Esta aplicación específica puede ser utilizada en dispositivos más complejos como una parte importante donde se regule el flujo, tal como se muestra en la figura 1.5, donde es parte de un absorbedor de choque.

Absorbedores de Choque⁴⁶

Otra idea muy atractiva para la industria automotriz son los dispositivos de amortiguación variable, entre ellos se encuentran los absorbedores de choque. Estos consisten ordinariamente de un pistón en un cilindro; el pistón comprime al aceite viscoso dentro del cilindro, bombeándolo a través de un orificio muy pequeño. El fluido absorbe la fuerza del impacto atravesando lentamente la restricción al paso; por otra parte un orificio más grande permite que el aceite regrese rápidamente al cilindro. La viscosidad del aceite es muy sensible a la temperatura, por lo que en

días fríos, es más viscoso haciendo que el absorbedor sea un poco duro, pero el aceite se calienta debido a las compresiones continuas, por lo que en un camino lleno de baches su efecto sería casi nulo, siendo cuando más se necesita. Los FER's pueden proveer una alternativa para resolver este problema, introduciendo un sistema electro-reológico, con electrodos y un microprocesador. Mientras el pistón realiza la compresión, el microprocesador modula rápidamente el campo eléctrico a través de los electrodos para cambiar la viscosidad del fluido. Tal cambio permitiría amortiguar el efecto de un camino lleno de baches. La suspensión podría recobrar su viscosidad inicial al modificar nuevamente el campo aplicado. Un absorbedor de choque simple podría adaptarse a una gran variedad de vehículos y condiciones de operación.

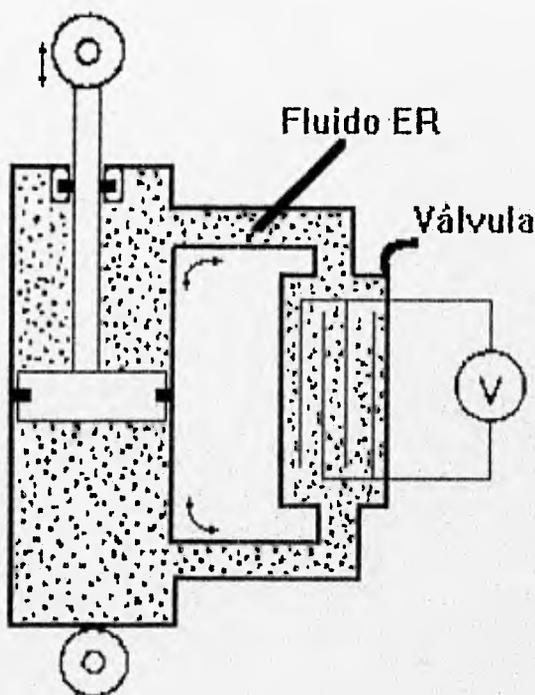


Figura 1.5 Ejemplo de un absorbedor de choque electro-reológico con una válvula electro-reológica externa.

Estas aplicaciones son la gran promesa de realización de la tecnología electro-reológica, y solamente se harán realidad cuando se conozcan bien los mecanismos y los materiales que constituyen a los FER's.

1.2.5. El Problema de la Comercialización

A pesar del gran potencial que posee esta tecnología y de los cientos de patentes que se han otorgado durante casi medio siglo, ningún dispositivo electro-reológico ha llegado al mercado hasta la fecha.

Tal como lo citan muchísimos autores y en especial el Departamento de Energía de los EUA⁴⁷, existen varias deficiencias en el entendimiento de los materiales y los mecanismos responsables del efecto electro-reológico.

Se han identificado tres aspectos importantes en esta tecnología: el dispositivo electro-reológico, el fluido electro-reológico y los circuitos de potencia/control. Muchos dispositivos que han sido propuestos y probados parecen estar bien concebidos y aunque existen algunos problemas relacionados con el cambio de alta velocidad de altas diferencias de potencial, la electrónica del estado sólido moderna y el control por computadora pueden satisfacer los requerimientos de la tecnología electro-reológica. El factor limitante es el fluido electro-reológico.

Dichos fluidos deben poseer ciertas características para que su comercialización sea posible, cumpliendo los requisitos gubernamentales y operativos del dispositivo donde se pretendan utilizar. Estas características se presentan en la tabla 1.10. Entre las más importantes se tiene que el intervalo de temperatura de operación requerido por la industria automotriz es de -40 a 200°C, la estabilidad a los cambios de temperatura así como a la sedimentación debe maximizarse, no debe ser tóxico ni inflamable y sobre todo debe tener un bajo costo para poder competir con las alternativas convencionales.

Resumiendo, para lograr la comercialización plena se requiere profundizar el conocimiento de cómo se produce el efecto electro-reológico, ya que al conocerlo mejor podría ayudar al desarrollo de FER's que satisfagan los requerimientos de los dispositivos comerciales. Se requiere también mejorar las formulaciones de los fluidos para que se ajusten a los requerimientos comerciales, así como un mejor entendimiento de sus propiedades reológicas y eléctricas para conocer como afectan las variables estructurales (tamaño, distribución, concentración etc.) y las condiciones experimentales (campo eléctrico, temperatura etc.).

Tabla I.10 Requisitos de un FER para su posible uso comercial⁴⁸.

1. Características con poca variación con el uso o almacenamiento.
2. Baja demanda de potencia eléctrica en condiciones de trabajo.
3. Tiempo de respuesta rápido.
4. Intervalo de temperatura de operación amplio.
5. Baja viscosidad ante un campo eléctrico nulo.
6. Alta Potencia dieléctrica
7. No debe sedimentar.
8. No debe ser abrasivo.
9. Debe poseer gran estabilidad.
10. No debe ser tóxico.
11. No debe ser flamable.
12. Debe tener un bajo costo.
13. Alta resistencia a esfuerzos mecánicos.

Finalmente se debe desarrollar una metodología sistemática para el diseño de dispositivos electro-reológicos, basada en el propósito y función del dispositivo, las propiedades específicas conocidas de los FER's disponibles y los requerimientos de potencia y control del dispositivo en particular. El desarrollo de métodos sistemáticos acelerará el momento de la comercialización de los FER's.

Nomenclatura

FER	Fluido Electro-Reológico.
EER	Efecto Electro-Reológico.
GAP	Espaciamiento entre platos paralelos.
DOE	Departamento de Energía de los Estados Unidos de América.
k_B	Constante de Boltzmann.
T	Temperatura absoluta.
a	Radio de la partícula.
μ	Dipolo instantáneo proveniente de las fluctuaciones de densidad de carga electrónica en un átomo "1".
E_d	Campo eléctrico propagado por el dipolo instantáneo del átomo 1.
s	Distancia de separación entre los átomos 1 y 2.
ϵ_0	Permitividad dieléctrica en el vacío.
F_E	Fuerza del campo eléctrico ejercida por el acercamiento entre los átomos 1 y 2.
μ_1	Momento dipolar inducido al átomo 2 por el átomo 1.
α	Polarizabilidad de los átomos 1 y 2.
G	Energía de interacción entre los átomos 1 y 2 para distancias de separación pequeñas.
K	Constante para partículas del material 1.
v	Frecuencia de oscilación.
G_a	Energía de interacción entre dos cuerpos vecinos.
ΔV_1	Volumen de un cuerpo 1 formado por la unión de varios átomos.
ΔV_2	Volumen de un cuerpo 2 formado por la unión de varios átomos.
n_1	Número promedio de átomos por unidad de volumen del cuerpo 1.
n_2	Número promedio de átomos por unidad de volumen del cuerpo 2.
R	Radio de una esfera.
H	Distancia de separación entre dos cuerpos.
C_1	Constante para partículas del material 1 para una fuerza no retardada.
C_2	Constante para partículas del material 1 para una fuerza retardada.
A	Constante de Hamaker para el caso de una fuerza no retardada ($\pi C_1 n^2$).
B	Constante de Hamaker para el caso de una fuerza retardada ($0.1 \pi C_2 n^2$).
ψ_0	Potencial de la capa de Gouy.
ψ_d	Potencial de la capa de Stern.
ζ	Potencial zeta.
δ	Espesor de partículas adsorbidas en una molécula que ocasiona interacción estérica.
SEM	Microscopía de barrido electrónico.
DLVO	Teoría de estabilización de dispersiones según Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek.
V_R	Energía de repulsión al acercar dos partículas ocasionada por el traslape de sus dobles capas eléctricas.
B	Constante: $4.36 \times 10^{20} \text{ [A}^{-2} \text{s}^{-2} \text{]}$.
z	Número de carga del contraión.
V_A	Energía de atracción al acercar dos partículas ocasionada por las fuerzas de Van der Waals.
A_{11}	Constante de Hamaker para la interacción de una partícula tipo 1 con otra del mismo tipo.
A_{22}	Constante de Hamaker para la interacción de una partícula tipo 2 con otra del mismo tipo.
A_{12}	Constante de Hamaker para la interacción entre dos partículas tipo 1 y el medio circundante de partículas tipo 2.
V_T	Energía total de interacción: $V_A + V_R$.
E	Campo eléctrico [kV/mm]
γ	Velocidad de corte [1/s].
ϵ_s	Permitividad dieléctrica de la fase líquida de la suspensión.

ϵ_p	Permitividad dieléctrica de la fase sólida de la suspensión (partícula).
ψ_0	Potencial eléctrico de la superficie de las partículas.
β	Coefficiente dipolar de la partícula: $(\epsilon_p - \epsilon_s)/(\epsilon_p + 2\epsilon_s)$
η_s	Viscosidad de la fase líquida de la suspensión.
N_{Pe}	Número de Peclet $(6\pi\eta_s a^3 \gamma)/kBT$
N_{Mu}	Número de Mason $(6\eta_s \gamma)/(\epsilon_0 \epsilon_s \mathbf{E} ^2)$

Referencias Bibliográficas

1. Ma. T. Toral, Fisicoquímica de Superficies y Sistemas Dispersos. (Buenos Aires, Argentina: Editorial Brito 1980) pág. 127
2. James W. Goodwin, Colloidal Dispersions. (The Royal Society of Chemistry; Dorchester, Great Britain: Dorset Press 1982) pág. 15
3. Ibidem, pág. 16
4. Gebhard Schramm, A practical Approach to Rheology and Rheometry. (Karlsruhe, República Federal Alemana; Haake Rheometers 1994) pág. 16
5. James W. Goodwin, Colloidal Dispersions. (The Royal Society of Chemistry; Dorchester, Great Britain: Dorset Press 1982) pág. 16
5. Ma. T. Toral, op.cit., pp. 141-151
6. Ma. T. Toral, Fisicoquímica de Superficies y Sistemas Dispersos. (Buenos Aires, Argentina: Editorial Brito 1980) pp. 144 - 151
7. André Bakker y L.E. Gates, "Properly Choose Mechanical Agitators for Viscous Liquids" en: Chemical Engineering Progress Vol. 91 No. 12 (diciembre 1991) pág 27
8. André Bakker y L.E. Gates, "Properly Choose Mechanical Agitators for Viscous Liquids" en: Chemical Engineering Progress Vol. 91 No. 12 (diciembre 1991) pág 27
9. James W. Goodwin, Colloidal Dispersions. (The Royal Society of Chemistry; Dorchester, Great Britain: Dorset Press 1982) pág. 24 - 25
10. James W. Goodwin, Colloidal Dispersions. (The Royal Society of Chemistry; Dorchester, Great Britain: Dorset Press 1982) pág. 29
11. Theodore F. Tadros, Solid/Liquid Dispersions. (ICI Plant Protection Division; Bracknell, England: Academic Press 1987) pp. 71 - 75
12. James W. Goodwin, Colloidal Dispersions. (The Royal Society of Chemistry; Dorchester, Great Britain: Dorset Press 1982) pp. 57 - 68
13. Ma. T. Toral, Fisicoquímica de Superficies y Sistemas Dispersos. (Buenos Aires, Argentina: Editorial Brito 1980) pp. 120
14. Theodore F. Tadros, Solid/Liquid Dispersions. (ICI Plant Protection Division; Bracknell, England: Academic Press 1987) pp. 92-100
15. Nigel Webb, "ER Fluids" en: Chemistry in Britain (abril 90) pág. 338
16. Nigel Webb, "ER Fluids" en: Chemistry in Britain (abril 90) pág. 338
17. Keith D. Weiss, J. D. Carlson, J. P. Coulter, "Material Aspects of Electrorheological Systems" en: Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 4 (enero 1993) pp. 15, 13-34
18. Donald Klass y T. W. Martinek, "Electroviscous fluids I. Rheological Properties" en: Journal of Applied Physics Vol. 38 No. 1 (enero 1967) pág. 72
19. J. E. Stangroom, Physical Technology Vol. 14 (1983) pp. 290 -296
20. Louise Marshall, C.F. Zukoski, J. W. Goodwin, "Effects of Electric Fields on the Rheology of non-aqueous Concentrated Suspensions" en: Journal of Chemical Society Faraday Trans. Vol. 85 No. 9 (1989) pp. 2789

21. Alice P. Gast y C.F. Zukoski, "Electrorheological Fluids as Colloidal Suspensions" en: Advances in Colloidal Interface Science, Vol. 30 (1989) pp.177-179
22. W. Winslow en: Journal of Applied Physics Vol. 20 (1949) pp. 1137-1140
23. Donald Klass y T. W. Martinek, "Electroviscous fluids I. Rheological Properties" en: Journal of Applied Physics Vol. 38 No. 1 (enero 1967) pág. 68
24. "Electroviscous Fluids", J. W. Westlake. US patent: No. 3970573
25. A. F. Sprecher, J. D. Carlson y H. Conrad, "Electrorheology at small strains and strain rates of suspensions of silica particles in silicon oil" en: Material Science Engineering (1995) pp. 187-197
26. G. G. Peterzhik, O. A. Cherkova y A. A. Trapeznikov, "Electrorheological Effect in Non-Aqueous Different-Composition Dispersions in Dependence on Electric Field Parameters" en: Dokl AN SSSR, Vol. 253 No. 1 (1980) pp. 173-177
27. H. Block y L. Kelly, "Electro-rheology" en: Journal of Physical Design: Applied Physics, Vol. 21 (1988) pp. 1661-1677
28. "Electric Field Dependent Fluids", F.E. Felisko y W.E. Armstrong, US patent: No: 4744914
29. "Electroviscous Fluid", A. Inoue, Japanese patent: No. 64-6093
30. Evgeniya V. Korobko "The Main Properties of ERJ's and their Application" en: Conference on Recent Advances in Adaptive and Sensory Materials and their Applications 1992 (US Technomic Publishing Co. Inc. abril 1992) pp. 3 - 11
31. Keith D. Weiss, J. D. Carlson, J. P. Coulter, "Material Aspects of Electrorheological Systems" en: Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 4 (enero 1993) pp. 18, 13-34
32. Winslow W. M. US patent: No. 2, 417, 850. 1947
33. Winslow W. M. US patent: No. 2, 417, 850. 1947
34. Winslow W. M. US patent: No. 2, 611, 596. 1953
35. Winslow W. M. US patent: No. 2, 611, 825. 1953
36. Klass D. y T. Martinek US patent: No. 3, 250, 726. 1966
37. Martinek T., D. Klass and H. Folkins US patent: No. 3, 367, 872. 1968
38. Martinek T. US patent: No. 3, 397, 147. 1968
39. Goossens, J. EP patent: No. 170, 939. 1986
40. Goossens, J. EP patent: No. 201, 827. 1986
41. Keith D. Weiss, J. D. Carlson, J. P. Coulter, "Material Aspects of Electrorheological Systems" en: Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 4 (enero 1993) pp. 19-24
42. W. Winslow en: Journal of Applied Physics Vol. 20 (1949) pp. 1137-1140
43. Therese C. Jordan y M. T. Shaw, "Electrorheology" en: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24 No. 5 (octubre 1989) pp. 853
44. Thomas C. Hasley y J. E. Martin "Electrorheological Fluids", en: Scientific American, (octubre 1993) pág. 43
45. Therese C. Jordan y M. T. Shaw, "Electrorheology" en: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24 No. 5 (octubre 1989) pp. 853
46. Therese C. Jordan y M. T. Shaw, "Electrorheology" en: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24 No. 5 (octubre 1989) pp. 854
47. Irving M. Krieger y E. A. Collins. Electrorheological (ER) Fluids, A Research Needs Assessment. Final Report. Washington, D. C. : US Department of Energy. Consultec Scientific, Inc. Mayo 1993 pp. 1-1 a 1-3 (DE-ACO2-91ER30172)
48. D. L. Hartssock, R. F. Novak y G. J. Chaundy, "ER fluid requirements for automotive devices" en: Journal of Rheology Vol. 35 No. 7 (octubre 1991) pp. 1305-1326

CAPÍTULO II

COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

En este capítulo se darán a conocer las ecuaciones constitutivas de la reología de suspensiones sólido-líquido, se mencionarán los conceptos de parámetros necesarios en la medición de propiedades reológicas, se citarán las principales técnicas existentes relacionadas la medición de propiedades reológicas; se mencionará el comportamiento reológico de dispersiones sólido-líquido reportado en la literatura y también el comportamiento ante la aplicación de un campo eléctrico, así como algunos modelos reológicos de FER. Algunos conceptos reológicos importantes se analizan en el anexo I ya que el objetivo del presente trabajo no es realizar un texto didáctico.

2.1. Reología

La *reología* es una ciencia que describe la deformación de un cuerpo cuando se sujeta a un esfuerzo; dicho cuerpo puede ser sólido, líquido o gaseoso. A los líquidos y gases se les llama fluidos y su comportamiento reológico está gobernado por distintas ecuaciones.

El comportamiento reológico de los FER's puede analizarse tanto en su forma básica (como dispersión sólido-líquido) y bajo la aplicación de un campo eléctrico.

En reología existen en forma general dos tipos de comportamientos: el newtoniano y el no-newtoniano, atendiendo a la conducta de los materiales.

2.1.1. Flujo Newtoniano

Las ecuaciones reológicas constitutivas provienen de considerar el siguiente modelo¹, (figura 2.1) que representa el movimiento de un fluido originado por la aplicación de un esfuerzo de corte:

Sea un sistema en reposo constituido por un fluido entre dos láminas planas paralelas, separadas entre sí a una distancia Y . Si la lámina superior comienza a moverse con una velocidad constante V_m en la dirección z , entonces la capa de fluido adyacente a dicha lámina también lo hará, casi a esta misma velocidad. Esta capa transmitirá su movimiento a la siguiente, haciendo que se mueva también pero con una velocidad menor (la energía no se transmite íntegramente). Cuando se establece el régimen permanente, se puede ver que se ha formado un perfil de velocidades a lo largo del eje Y entre las distintas capas de fluido, tal como se muestra en la figura 2.1.

Este régimen se conservará solamente si la lámina superior se mueve a la misma velocidad, por lo que existe una cierta fuerza F que se necesita aplicar a la lámina superior. Esta fuerza es proporcional al gradiente de velocidades del eje Y por una constante:

$$\frac{F}{A} = \eta \cdot \frac{V_m}{Y} \quad \dots (10)$$

Bajas velocidades de corte

Altas velocidades de corte

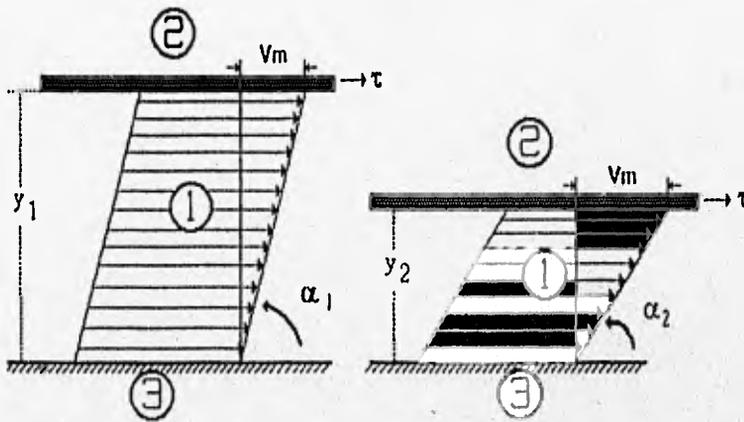


Figura 2.1 Modelo de flujo entre dos láminas paralelas.

en la ecuación 10, la constante de proporcionalidad η se conoce como la *viscosidad* del fluido, se mide en [Pa.s] y es función del estado fisicoquímico de la sustancia, de la temperatura, presión, velocidad de corte, tiempo y de la diferencia de potencial eléctrico.

La fuerza F aplicada al área A descrita en la ecuación 10, favorece el movimiento de la lámina y se conoce como *esfuerzo cortante* (τ). Este esfuerzo tiene una aplicación tangencial y paralela a la dirección del flujo y es el resultado de la acción de un par de cortes que se aplican al fluido, por tanto, literalmente se corta al fluido. Su unidad de medición es el [Pa].

El gradiente de velocidad a lo largo del eje y y se conoce como la *velocidad de corte* ($\dot{\gamma}$), se define matemáticamente por una diferencial (dV_z/dy en la dirección del gradiente de velocidad). Su unidad de medición es [1/s].

Así la ley de Newton de la viscosidad puede expresarse usando los términos mencionados bajo la siguiente forma :

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}; \quad \tau = \eta \dot{\gamma} \quad \dots (11)$$

La relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte que define el comportamiento en flujo de un fluido se puede graficar en curvas de esfuerzo cortante contra velocidad de corte, llamadas curvas de flujo o bien se puede realizar la gráfica de viscosidad vs. velocidad o esfuerzo de corte. En estas gráficas la ecuación de Newton sigue líneas rectas, en la primera con una pendiente η y en la segunda una línea paralela al eje X. De acuerdo a la variación de la viscosidad η , en dichas gráficas, los fluidos se pueden clasificar en newtonianos y no newtonianos.

Los fluidos *newtonianos* son aquellos que se ajustan al modelo de Newton, es decir que su viscosidad no cambia con la velocidad de corte. Tal es el caso del agua, de aceites minerales, melazas, etc. Los fluidos *no newtonianos* son aquellos otros líquidos que no exhiben el comportamiento en flujo "ideal o newtoniano", siendo su viscosidad función de la velocidad de corte.

En la tabla 2.1. se presentan algunos valores de viscosidad a 20 °C, dichos valores típicos de viscosidad pueden usarse para comparar cualitativamente a los fluidos.

Tabla 2.1 Algunas viscosidades típicas a 20°C.²

Substancia	Valor típico de Viscosidad [Pa.s]	Substancia	Valor típico de Viscosidad [Pa.s]
Gasolina	6.5×10^{-4}	Crema de café	1.0×10^{-2}
Agua	1.0×10^{-3}	Miel	10
Mercurio	1.5×10^{-3}	Mezclas de polímeros	(1-1000)
Jugo de uva	$(2-5) \times 10^{-3}$	Materiales bituminosos	$1.0 \times 10^{+5}$
Sangre (37°C)	$(4-15) \times 10^{-3}$	Vidrio	$1.0 \times 10^{+20}$

2.1.2. Flujo No-Newtoniano

El comportamiento de dichos fluidos se muestra en la figura 2.1, donde se pueden apreciar cuatro tipos (ver también anexo I): el comportamiento *pseudoplástico* corresponde a fluidos que tienen un decremento en su viscosidad ante un incremento de la velocidad de corte, es decir ellos sufren un adelgazamiento viscoso. El comportamiento *dilatante* es aquel en el cual se incrementa su viscosidad al aumentar la velocidad de corte. El comportamiento *plástico* describe a fluidos pseudoplásticos que tienen un esfuerzo de cedencia (esfuerzo necesario para hacer fluir a un líquido), algunas dispersiones al estar en reposo, forman una red intermolecular/interparticular de

fuerzas de unión (fuerzas electrostáticas, fuerzas de Van der Waals), las cuales restringen el cambio de posición del fluido, manteniéndolo rígido hasta que el esfuerzo de cedencia se vence.

Se han propuesto diferentes ecuaciones empíricas para modelar la relación que existe, en régimen permanente, entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte. En la tabla 2.2 se presenta un resumen de 10 modelos representativos.

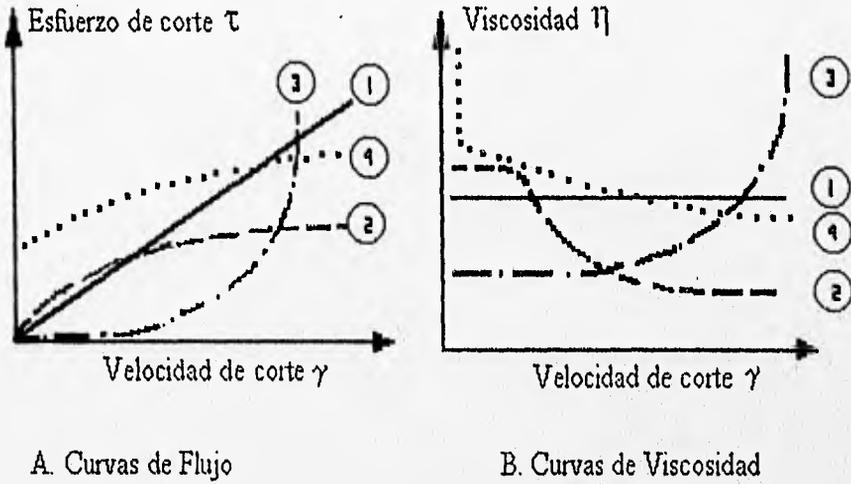


Figura 2.2 Comparación entre el comportamiento en flujo de fluidos newtonianos y no-newtonianos. 1) Líquido Newtoniano; 2) Líquido pseudoplástico; 3) Líquido dilatante; 4) Líquido plástico (líquido pseudoplástico con un esfuerzo de cedencia)

Tabla 2.2 Modelos matemáticos que describen el comportamiento en flujo de dispersiones^{3,4}.

Modelos en curva de flujo	$\tau = f(\dot{\gamma})$
Newton	$\tau = \eta\dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \eta_p \cdot \dot{\gamma} + \tau_0$
Ley de potencia (Ostwald-de-Waele)	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$
Herschel-Bulkey	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n + \tau_0$
Casson	$\tau = (\dot{\gamma} \cdot \tau_0^{1/2} + (\eta_p \cdot \dot{\gamma})^{1/2})^{1/2}$
Cross	$\tau = \dot{\gamma} \cdot \left[\eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) / (1 + (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_b)^n) \right]$
Carreau	$\tau = \left[\eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) / (1 + (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_b)^2) \right]^{n/2}$
Meter	$\dot{\gamma} = \tau / \left[\eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) / (1 + (\tau / \tau_b)^n) \right]$
Tscheuschner	$\tau = \dot{\gamma} \cdot \left[\eta_\infty + \tau_0 / \dot{\gamma} + \eta_b / (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_b)^n \right]$
Sisko	$\eta = \eta_\infty + K_1 \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$

2.2. Medición de Propiedades Reológicas

La caracterización reológica de cualquier material se lleva a cabo aplicándole una fuerza, que le provoca una deformación. Esto se hace en los dispositivos llamados reómetros, los cuales hacen mediciones de los resultados de la deformación sobre amplios intervalos de velocidad o esfuerzo de corte. Existen reómetros de velocidad controlada y de esfuerzo controlado, en cualquiera de ellos la cantidad de muestra requerida es mínima, las pruebas son no destructivas y ayudan a determinar la estructura que constituye a las muestras. Las principales pruebas que pueden realizar en un reómetro de esfuerzo controlado son las siguientes: prueba de flujo, de deslizamiento y oscilación.

2.2.1. Prueba de "Flow" (Flujo)

Con esta prueba se construye la "curva de flujo", es decir la relación que existe entre el esfuerzo y la velocidad de corte (inciso 2.1.1) para el material en cuestión. La aplicación de la fuerza de corte se hace por medio de un barrido controlando el esfuerzo aplicado.

La corrida experimental se lleva a cabo en tres partes. Primero se aplica una perturbación tipo rampa desde un cierto esfuerzo mínimo hasta otro máximo, ambos predeterminados, conformando el barrido ascendente (curva ascendente). Después se mantiene el esfuerzo máximo durante un intervalo de tiempo definido, esta parte se conoce con el nombre de curva de máximo sostenido. Y por último se realiza un barrido descendente desde este esfuerzo máximo hasta el mínimo nuevamente (curva descendente).

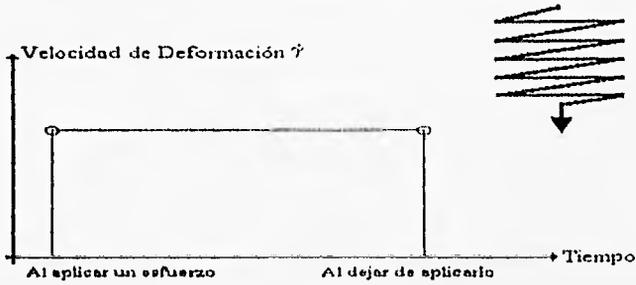
Los resultados que se obtienen contienen datos de viscosidad experimental para un cierto valor de esfuerzo o velocidad de corte, también se puede hallar relación con el comportamiento en función del tiempo del material probado (tixotropía) manifestándose en el área que se encuentra entre las curvas de barrido ascendente y descendente.

Los datos provenientes de los resultados se pueden analizar y ajustar a modelos establecidos que relacionan el comportamiento de esfuerzo contra velocidad de corte. En la tabla 2.2 se muestran varios modelos matemáticos comunes para el análisis de estas curvas; ellos pueden ajustarse con los parámetros que describen para hallar el comportamiento en flujo teórico más cercano del material que se prueba.

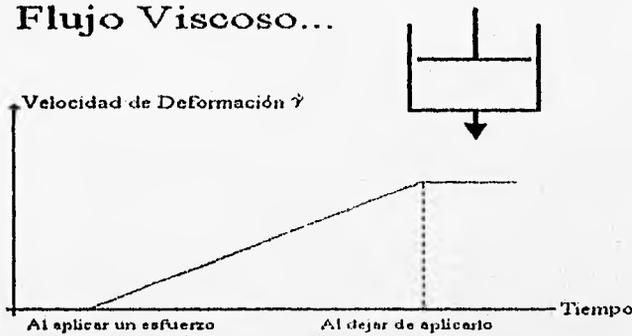
2.2.2. Prueba de "Creep" (Deslizamiento)

El deslizamiento o "creep" se define como: "La medición de la deformación lenta de un material bajo un esfuerzo constante"⁵. Esta prueba es muy útil para determinar el comportamiento viscoelástico de un material (anexo I), es decir, un material que se comporta como sólido y líquido a la vez. Lo que se analiza es la diferencia entre las respuestas de la parte viscosa y elástica del material en cuestión.

Deformación Elástica ...



Flujo Viscoso...



Respuesta Viscoelástica...

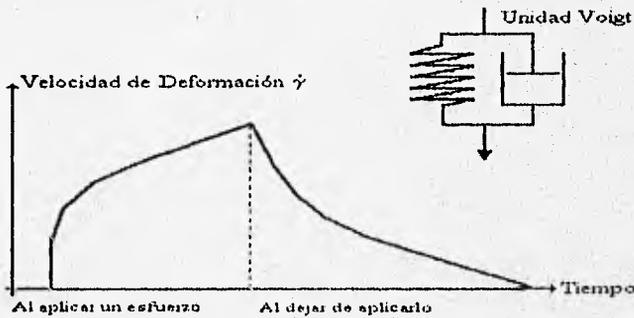


Figura 2.3 Curvas de "creep" que representan a los modelos de materiales: a) Sólido elástico; b) Líquido newtoniano; c) Material viscoelástico.

En esta prueba se aplica un esfuerzo de pequeña magnitud a la muestra (p.ej.- 10-100 Pa) durante un periodo de tiempo largo; al dejar de aplicarlo, se realizan mediciones del comportamiento del material para descubrir detalles estructurales que no se pueden conocer por una simple prueba de flujo. El deslizamiento es normalmente muy sensible ya que se miden desplazamientos del orden de $1e-4$ rad. En la figura 2.3 se muestra la curva de aplicación de esfuerzo o curva de retardación y la curva de relajación de éste aplicando esfuerzos pequeños de tres materiales distintos: un sólido elástico, representado por el comportamiento de un resorte que sigue la ley de Hooke para la deformación en materiales sólidos; una deformación viscosa de un líquido que sigue la ley de Newton, representada por un pistón y un material viscoelástico. La respuesta de éste último se puede postular que es el resultado de la adición del resorte y el pistón.

La forma de la curva de deformación contra tiempo de los materiales viscoelásticos se encuentra gobernada por la interacción de las dos respuestas (viscosa y elástica). Los modelos reológicos típicos utilizan arreglos de resortes y pistones para modelar los procesos de deformación elástica y viscosa.

Un ejemplo de una respuesta puramente elástica es golpear con un martillo una pieza de hule vulcanizado; este permanecerá muy poco tiempo deformando la superficie del hule y debido a la elasticidad total, el martillo rebotará y la deformación en la superficie del hule desaparecerá. El hule recobra totalmente su forma original, en otras palabras, la deformación es elástica y se recupera totalmente. Si se coloca el material en un sistema de platos paralelos en un reómetro rotacional y se le aplica un esfuerzo constante τ_0 ; se obtiene como resultado un esfuerzo y su deformación las cuales tienen una relación lineal (al duplicar el esfuerzo se duplica la deformación). Esto es similar a lo que ocurriría si a un resorte de metal se le expande o comprime debido a una carga de tensión o de corte sobre él, siendo la constante de proporcionalidad el módulo de Young E para el caso de tensión o el de corte G para el caso de fuerza de corte:

$$\sigma = E \cdot \gamma \quad \tau = G \cdot \gamma \quad \dots (12)$$

Donde σ es el esfuerzo de tensión y τ el de corte. La deformación se mantiene durante el tiempo que se aplique el esfuerzo y desaparece completa e instantáneamente al removerlo (figura 2.3a). La energía de esta deformación se almacena elásticamente en el resorte.

En una respuesta totalmente viscosa por ejemplo agua pura que se vierte de una botella a una mesa que tiene una superficie plana. El agua forma un montículo que fluye extendiéndose hasta formar una capa de agua suficientemente delgada (la tensión superficial del agua previene que la capa que forma no se haga infinitamente delgada). La energía cinética del agua al caer sobre la superficie de la mesa y la gravedad en otras capas superiores de agua, hacen fluir al material y el agua nunca regresará a la botella por sí misma. La energía se transforma completamente en calor y no puede recuperarse. Similarmente si se coloca agua en un sistema de cono y plato o platos paralelos, y se aplica un esfuerzo para realizar la curva de deformación contra el tiempo, se puede observar una deformación lineal ilimitada hasta que se remueve el esfuerzo y la deformación se mantiene totalmente (figura 2.3b).

En un material viscoelástico se aprecia una combinación de ambas respuestas. Existen varios modelos (Berger, Maxwell, Kelvin, etc.)^{6,7} que tratan de representar el comportamiento

viscoelástico de materiales en las curvas de deformación contra tiempo. Tal es el caso del modelo de Berger, que se muestra en la figura 2.4, el cual está constituido por tres partes: una respuesta puramente elástica, " J_0 " (representada por el resorte), una respuesta puramente viscosa, " η_0 " (representada por un pistón), y una respuesta viscoelástica (representada por un resorte y un pistón en paralelo llamada unidad voigt).

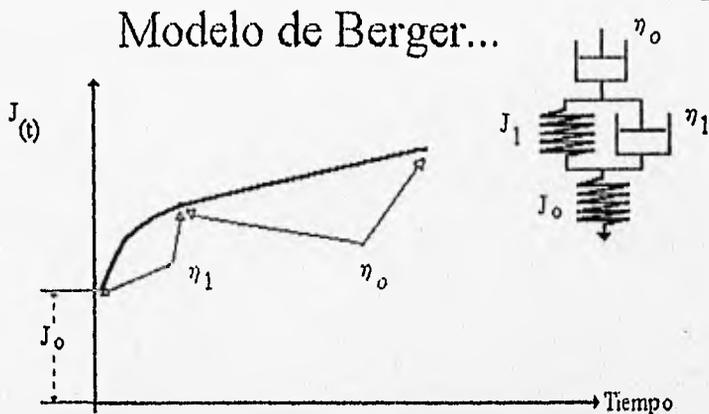


Figura 2.4 Representación esquemática del modelo de Berger para el comportamiento viscoelástico en una prueba de "creep".

Los materiales viscoelásticos en la realidad corresponden a modelos de resortes y pistones mucho más complejos; el modelo de Berger es una buena aproximación.

Para un mejor entendimiento del concepto de "deslizamiento", se deben tomar en cuenta factores de tiempo que se pueden relacionar con el comportamiento mecánico de las muestras (se detallan en el inciso de viscoelasticidad en el anexo I), ellos son el tiempo característico del material λ y el del proceso t , cuya relación adimensional está dada por el número de Deborah (λ/t). Este número da información acerca de su comportamiento, un valor grande del número de Deborah reafirma un comportamiento de sólido; esto puede deberse indistintamente a que λ sea grande o a que se estudia un proceso de deformación más rápido que λ (t muy pequeño). En un modelo viscoelástico si se aplica un esfuerzo velozmente tal como en una oscilación de alta frecuencia, provocará que los elementos viscosos respondan para poder ser medidos en un marco de tiempo de la prueba, con lo que solamente se podrá observar la respuesta de los componentes elásticos. En la prueba de "creep" el esfuerzo que se aplica es pequeño y el tiempo del proceso relativamente largo, por lo que todos los elementos de la muestra tienen tiempo suficiente para responder; las curvas de retardación y relajación se ven influenciadas por la respuesta de cada elemento del modelo. Si se analiza la curva de retardación en una gráfica de la obediencia J o "compliance" (cociente de la deformación entre el esfuerzo) contra tiempo (figura 2.4), se pueden

apreciar varias características: inicialmente hay un incremento instantáneo de "compliance", J_0 , que es la característica que es influenciada por el resorte del modelo que representa el comportamiento elástico. También existe en el equilibrio una porción lineal en la curva, " η_0 ", dado por el pistón que representa el comportamiento meramente viscoso, tienen el tiempo de respuesta más lento. Entre estos comportamientos extremistas se encuentran las llamadas unidades Voigt, el número de unidades entre el resorte y pistón en serie dependerá en el número de "procesos" que ocurren con las interacciones partícula-partícula, la deformación de gotas, etc. Si las unidades voigt reveladas por el análisis varían ampliamente en sus constantes de viscosidad y tiempo, representan problemas por separado, sin embargo si estas tienen una relación cercana, es posible que las fases múltiples pertenezcan al mismo proceso que se observa.

2.2.3. Prueba Oscilatoria

Al igual que en la prueba de "creep", el análisis de las muestras en una prueba oscilatoria proviene de aplicar una pequeña perturbación al material que se quiere analizar. Dicha prueba provee una gran cantidad de información acerca de la estructura de los materiales, ya que se pueden analizar elementos estructurales con tiempos de respuesta relativamente rápidos, por lo que se dice que es una prueba complementaria a la de "creep". La perturbación que se aplica consiste en una onda sinusoidal, cuya amplitud es proporcional al esfuerzo aplicado. Es muy importante la magnitud de dicho esfuerzo, ya que uno muy grande, puede romper la red formada por los elementos estructurales, cambiando las propiedades mecánicas aparentes.

La esencia del análisis oscilatorio consiste en probar la existencia de varias estructuras en la muestra (por ejemplo "cross-links" en un gel polimérico) de una forma no destructiva. Si la frecuencia de la onda aplicada se varía, puede provocar la respuesta de elementos asociados con los enlaces atómicos (del orden de MHz), con interacciones macromoleculares o con movimientos asociados a frecuencias mucho más bajas (del orden de Hz).

Si se aplica una onda sinusoidal a una muestra, existen dos formas posibles de respuesta. El patrón de la deformación resultante puede dar una segunda onda sinusoidal, o una onda distorsionada. La distorsión ocurre debido a procesos mecánicos causados por fuerzas o interacciones en la estructura de la muestra que se encuentran gobernadas por relaciones no-lineales; pero solo los resultados procedentes de relaciones lineales son representativos.

En los resultados de la prueba se hacen comparaciones entre la señal aplicada y la que resulta. Entre ellas existe un desfaseamiento que se puede caracterizar por el ángulo de fase δ .

El desfaseamiento entre las dos ondas provee información del tipo de respuesta que muestra el material. Si esta es puramente elástica, se caracteriza por un ángulo de fase igual a cero; una respuesta puramente viscosa, por una diferencia de fase de 90 grados (fig. 2.5) y una respuesta viscoelástica se encontrará entre estas dos. Si el ángulo es mayor a 90 grados es muy probable que existan problemas en la aplicación del torque o la amplitud.

La fuerza estructural de la sustancia se hace especialmente importante a altas frecuencias, donde el ciclo de aceleración/desaceleración aplicado a una geometría dada es mayor que a bajas frecuencias.

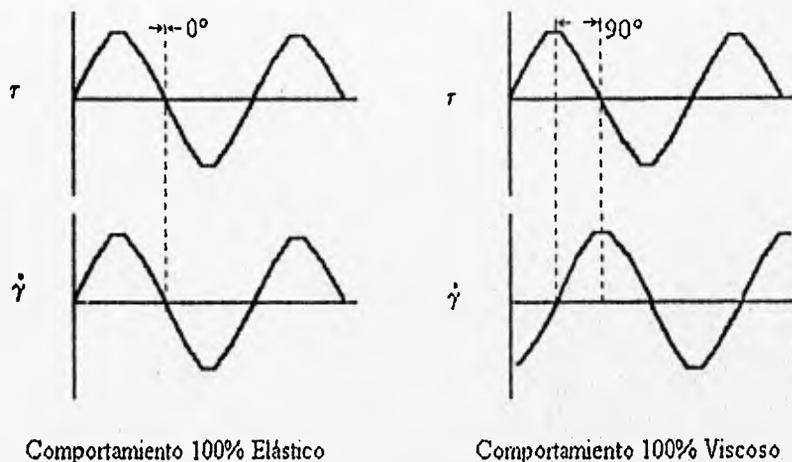


Figura 2.5 Respuesta resultante de la aplicación de una onda sinusoidal a un material: a) Elástico; b) Viscoso.

Como era de esperarse de la naturaleza sinusoidal de la oscilación, existe una relación trigonométrica que gobierna al llamado módulo complejo G^* (relación entre la amplitud del esfuerzo y la amplitud de la deformación). En la figura 2.6 se puede ver dicha relación en la cual G^* se integra por dos componentes, los cuales son conocidos como el módulo de almacenamiento G' , y el módulo de pérdida G'' . El primero se refiere a los componentes estructurales elásticos del material y el segundo a los viscosos. La energía se almacena en el módulo elástico a medida que ocurre la elongación debida al incremento del esfuerzo aplicado, y se libera de nuevo conforme se relajan al disminuir el esfuerzo. Los elementos viscosos no pueden almacenar energía de esta manera, ya que siempre hay una disipación del esfuerzo aplicado como una deformación, de manera que el módulo de pérdida cuantifica la energía de disipación. Los dos módulos se relacionan con el ángulo de fase con las siguientes ecuaciones:

$$G' = G^* \cos \delta \qquad G'' = G^* \sin \delta \qquad \dots (13)$$

$$\eta' = \eta^* \cos \delta \qquad \eta'' = \eta^* \sin \delta \qquad \dots (14)$$

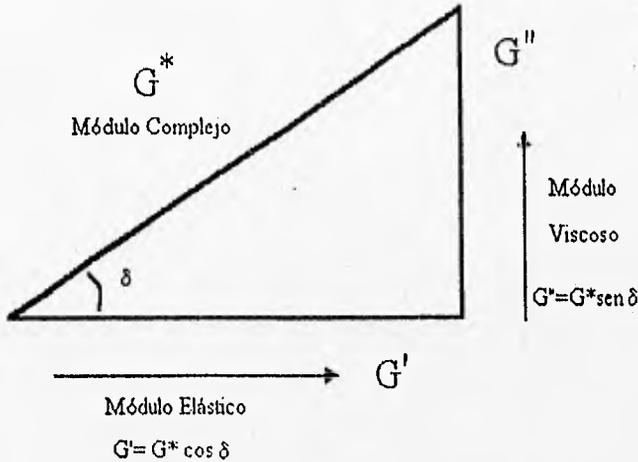


Figura 2.6 Determinación de los componentes del módulo complejo G' y G'' en una prueba oscilatoria.

2.3. Comportamiento Reológico de Dispersiones en Ausencia de Campo Eléctrico

Una dispersión sólido-líquido es una colección de partículas individuales pequeñas suspendidas en un medio. El comportamiento en flujo de dichos sistemas se ha modelado con distintas ecuaciones tanto analíticas como experimentales. Entre los primeros trabajos realizados se encuentra el de A. Einstein⁶, que propone un modelo teórico, en el se basan la mayoría de las ecuaciones propuestas, las cuales incorporan relaciones entre la fracción en volumen (concentración) y la viscosidad relativa del sistema, aunque también existen algunas que describen únicamente el comportamiento en función del esfuerzo cortante y la velocidad de corte.

A continuación se presenta un resumen de dichas ecuaciones separadas en función de las variables que se utilizan :

2.3.1. Efecto de la Concentración

El primer modelo que considera este efecto es el de las esferas rígidas, dado a conocer por A. Einstein en su "Teoría de la viscosidad de una dispersión de esferas rígidas", suponiendo que las dispersiones son monodispersas, diluidas, las partículas de la fase sólida son de tamaño mayor

a las de la fase líquida y de forma esférica. Establece la relación entre la fracción en volumen y la viscosidad de la suspensión de la siguiente manera :

$$\eta_r = 1 + \frac{5}{2} \cdot \varphi + O(\varphi^2) \quad \dots (15)$$

donde η_r es la viscosidad relativa (η/η_0), η es la viscosidad de la suspensión, η_0 la del medio y φ la fracción en volumen de esferas en la suspensión. El término que contiene a $O(\varphi^2)$ significa un término de orden cuadrático. También define una viscosidad intrínseca $[\eta]$, de la siguiente manera:

$$[\eta] = \lim_{\varphi \rightarrow 0} \frac{(\eta_r - 1)}{\varphi} = \frac{5}{2} \quad \dots (16)$$

Para $[\eta]$ determinó un valor de 2.5, encontrando que es función del tamaño y distribución del tamaño de las esferas. Se han realizado experimentos en distintos sistemas tales como dispersiones de esferas de vidrio y reticulados poliméricos, confirmando esta predicción, encontrando valores para las viscosidades intrínsecas entre 2.5 a 3.0⁹.

Hay varios factores que alteran el valor de la viscosidad intrínseca, uno de ellos es cargar eléctricamente a las partículas, lo que provoca un aumento en ésta debido al incremento de la disipación de energía en la doble capa eléctrica que rodea a la partícula, esto constituye un efecto electroviscoso analizado por primera vez por von Smolichowski, Chan y Goring en 1967 estudiaron esferas de látex sulfonadas, ellos mostraron que la viscosidad intrínseca medida tenía una dependencia muy fuerte en la concentración del electrolito del diluyente, como en el caso de los polielectrolitos.

La función de viscosidad relativa es :

$$\eta_r = h(\varphi) \quad \dots (17)$$

ésta tiene un comportamiento semejante al que se muestra en la figura 2.7. La región diluida se determina por la condición de que la pendiente al origen sea igual a la viscosidad intrínseca, mientras que el comportamiento a concentraciones altas está gobernado por el hecho de que más allá de cierta fracción en volumen ρ (o fracción de empaquetamiento) las partículas dispersadas forman una estructura rígida (se comporta como un sólido), haciendo que el flujo se detenga. Se ha estudiado tanto teórica como experimentalmente la naturaleza de la función $h(\varphi)$, Eilers en 1943 realizó un estudio de suspensiones de esferas bituminosas, representando sus datos con la siguiente ecuación:

$$\eta_r = \left(1 + \frac{\frac{1}{2} [\eta] \varphi}{\left(1 - \frac{\varphi}{\rho} \right)} \right)^2 \quad \dots (18)$$

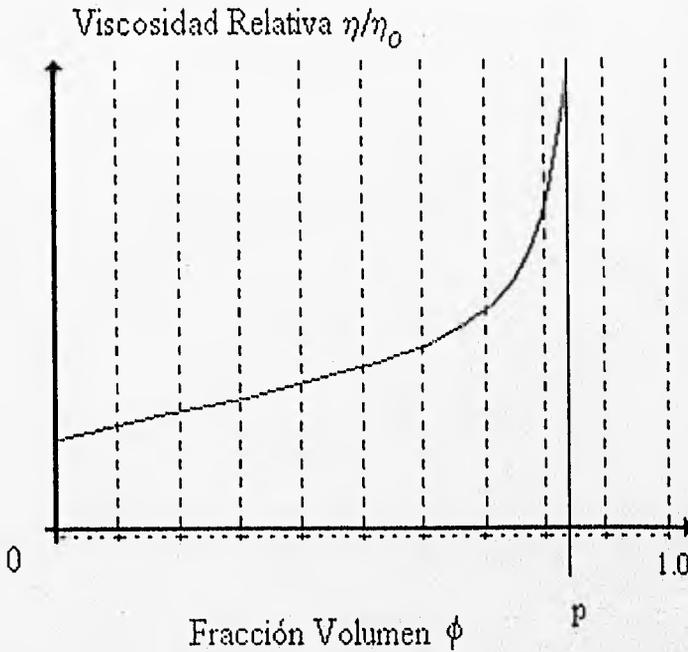


Figura 2.7 Curva que representa la dependencia de la concentración en la viscosidad real de una dispersión coloidal típica.

En 1951 *Maron* y sus colaboradores estudiaron reticulados sintéticos polidispersos y correlacionaron sus datos por medio de la siguiente relación:

$$\eta_r = \exp\left(\frac{[\eta]\phi}{1 - \frac{\phi}{p}}\right) \quad \dots (19)$$

Esta expresión fue derivada teóricamente por *Mooney* en 1951 a través de un análisis funcional; considerando la fracción en volumen de una suspensión dividida en dos porciones, el imaginó una solución compuesta, por una suspensión de fracción en volumen ϕ_1 a la que se agregaban partículas suficientes para elevar la fracción volumen a ϕ ; también se podría haber empezado con una fracción en volumen $\phi_2 = \phi - \phi_1$. Suponiendo que la suspensión inicial se comporta en este

proceso como un medio continuo de la misma viscosidad, la suspensión final tendrá una viscosidad relativa dada por:

$$\eta_r(\varphi_1 + \varphi_2) = \eta_r(\varphi_1) \eta_r(\varphi_2) \quad \dots (20)$$

La solución de esta ecuación funcional es

$$\eta_r = \exp([\eta]\varphi) \quad \dots (21)$$

Esta ecuación se ajusta con éxito a bajas fracciones en volumen, pero no crece tan rápido como sucede en la realidad a fracciones altas. Mooney modificó su análisis funcional al asumir que el volumen disponible para dispersar la segunda porción disminuía por un factor de $1 - K\phi$, debido a que ya existía un volumen prevaciado por las partículas que ya estaban presentes. Por lo tanto la fracción en volumen efectiva φ_{12} de las partículas añadidas en presencia de la primera porción es:

$$\varphi_{12} = \frac{\varphi_1}{(1 - K\varphi_2)} \quad \dots (22)$$

Se puede definir un volumen efectivo para la segunda fracción :

$$\varphi_{21} = \frac{\varphi_2}{(1 - K\varphi_1)} \quad \dots (23)$$

Tomando en cuenta dicha fracción corregida la ecuación funcional de Mooney toma la siguiente forma:

$$\eta_r(\varphi_1 + \varphi_2) = \eta_r(\varphi_{12}) \eta_r(\varphi_{21}) \quad \dots (24)$$

cuya solución es:

$$\eta_r = \exp\left(\frac{[\eta]\varphi}{(1 - k\varphi)}\right) \quad \dots (25)$$

donde: $k = 1/p$, siendo p la fracción de empaquetamiento.

Dougherty y Krieger afirman que el efecto de amontonamiento aplica solamente a la segunda porción, aunque la viscosidad relativa debe ser independiente del orden de adición; proponen la siguiente ecuación funcional:

$$\eta_r(\varphi_1 + \varphi_2) = \eta_r(\varphi_1) \eta_r(\varphi_{21}) = \eta_r(\varphi_2) \eta_r(\varphi_{12}) \quad \dots (26)$$

La solución de esta ecuación es:

$$\eta_r = \left(1 - \frac{\varphi}{\rho}\right)^{-[\eta]\rho} \quad \dots (27)$$

Esta ecuación puede convertirse a la propuesta por Eilers (ec. 18) cuando $p[\eta]=2$, tomando $[\eta]=5/2$ y $p=0.74$ (esferas monodispersas muy empacadas) dan en el producto 1.85; por esto las ecuaciones propuestas por Dougherty y Eilers predicen un comportamiento similar para dispersiones de esferas rígidas.

Se han desarrollado también por varios investigadores¹⁰ ecuaciones que toman en cuenta las interacciones hidrodinámicas, a través de una expansión de la ecuación para esferas rígidas de Einstein de la siguiente manera:

$$\eta_r = 1 + k_1 \cdot \varphi + k_2 \cdot \varphi^2 + k_3 \cdot \varphi^3 + \dots \quad \dots (28)$$

donde: k_1, k_2 y k_3 son constantes.

Existen otros intentos por publicar relaciones entre la viscosidad y la concentración en una base más rigurosa, pero han encontrado problemas hidrodinámicos y no han dado aún resultados que vayan de acuerdo a datos experimentales como lo hacen las ecuaciones anteriores.

2.3.2. Efecto del Tamaño de la Partícula

El efecto del tamaño de la partícula en la viscosidad de una suspensión también ha sido estudiado, entre los primeros estudios, se analizó el incremento en la viscosidad debido a la presencia de cargas en las partículas, ya que estas aumentan la viscosidad relativa de las suspensiones concentradas. Brodnyan y Kelley¹¹ atribuyeron este efecto a un aumento del radio hidrodinámico efectivo de la partícula por el espesor de la doble capa eléctrica. A pesar de que esta explicación es congruente con los datos experimentales, no puede ser válida rigurosamente ya que la mayoría de la doble capa no gira con la partícula. Existe otra explicación propuesta por Harmsen, en términos de desplazamientos de las trayectorias de las partículas vecinas debido a repulsiones electrostáticas; esta es más razonable y también depende del espesor de la doble capa eléctrica, ajustándose a la desaparición del efecto a altas velocidades de corte.

Los primeros estudios en el comportamiento no newtoniano en reticulados postulan un comportamiento que se ajusta al modelo de Bingham, manifestando un esfuerzo de cedencia. Maron desaprueba la existencia del punto de cedencia y muestra que el flujo no newtoniano en reticulados comerciales ocurre para concentraciones menores al 25% en volumen, utilizó la ley de la potencia y la ecuación de Ree-Eyring para expresar la dependencia de la viscosidad sobre la velocidad de corte. La ley de la potencia se puede escribir para una viscosidad $\eta(1)$ a una velocidad de corte $\gamma(1)$.

$$\eta = \eta_{(1)} \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{(1)}} \right)^m \quad \dots (29)$$

donde m es el índice del comportamiento no newtoniano; una m negativa indica un adelgazamiento viscoso y una positiva un "shear thickening", mientras que para un comportamiento newtoniano m=0. La ecuación de Ree-Eyring incluye un parámetro de viscosidad a_j, un tiempo de relajación λ_j para cada una de las n+1 unidades de flujo, con λ₀=0.

$$\eta = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j (\dot{\gamma} \lambda_j)^{-1} \sinh^{-1}(\dot{\gamma} \lambda_j) \quad \dots (30)$$

Krieger y Dougherty dedujeron una ecuación para la viscosidad no newtoniana de dispersiones de esferas rígidas, en la cual pares de partículas adyacentes rotan como dobles bajo un campo de corte; estos dobles próximos se forman por el movimiento Browniano y se destruyen debido a la aplicación del corte. Los resultados se expresaron en la forma de la ecuación de Williamson:

$$\eta = \eta_1 + (\eta_2 - \eta_1) \cdot \left(1 + \frac{\tau}{\tau_m} \right)^{-1} \quad \dots (31)$$

en la cual la viscosidad disminuye con el corte en el intervalo desde un límite a corte cero η₂ hasta un límite de alto corte η₁. El parámetro τ_m, significa físicamente que el esfuerzo cortante con una viscosidad que se encuentra a la mitad entre η₁ y η₂, es independiente de la concentración

$$\tau_m = \frac{\alpha \cdot k_B \cdot T}{a^3} \quad \dots (32)$$

donde a, es el radio de la partícula; k_B, la constante de Boltzmann; T, la temperatura y α un número aún no determinado completamente cercano a uno. Dicha ecuación se probó con datos experimentales de Maron en 1959 y se ajustaron bien a concentraciones menores de 55%, arriba de esta concentración, fué necesario variar τ_m con la concentración para que se ajustaran correctamente.

Saunders realizó estudios sobre las viscosidades en retículos de poliestireno monodisperso con diámetros de 0.1 a 0.9 micras, e incluyó en el diámetro de la esfera un incremento para la monocapa de surfactante, encontró una viscosidad intrínseca de 2.504±0.046. Para concentraciones altas, la ecuación de Mooney representaba muy bien a los datos, pero el valor de la concentración de empaquetamiento p, variaba con el tamaño de partícula. Schaller y Humprey estudiaron reticulados monodispersos de 0.088, 0.557 y 1.305 micras de diámetro en fracciones volumén hasta del 25%; encontraron un comportamiento Newtoniano en todos los casos excepto

para las partículas más pequeñas a bajos niveles de electrolito, usando también la ecuación de Mooney. Woods y Krieger mostraron que un látex polimérico monodisperso y concentrado, se comporta como el modelo de esferas rígidas bajo las siguientes condiciones:

- (1) Diámetro de partícula menor a 0.5 micras.
- (2) Presencia de electrolito neutro suficiente para proveer una doble capa compacta que apantalle las fuerzas Coulómbicas interparticulares y,
- (3) Inclusión del espesor de la monocapa de surfactante como parte del radio de la partícula.

R. Pal investigó también el efecto del tamaño de la partícula¹² para suspensiones monodispersas. Obtuvo los siguientes lineamientos:

- 1) A bajas fracciones en volumen, el tamaño tiene poco efecto, pero al aumentar el tamaño se hace significativo, especialmente a bajas velocidades de corte.
- 2) Los sólidos de menor tamaño ocasionan un incremento en la viscosidad del líquido mayor que las de mayor tamaño.
- 3) A bajos esfuerzos de corte el efecto del tamaño es menor.

2.3.3. Efecto de la Distribución del Tamaño de la Partícula

La distribución del tamaño de partícula es una variable importante en reología. Con el descubrimiento en los cincuenta de los métodos para producir reticulados monodispersos sobre un amplio intervalo de tamaños fue posible controlarla. No existen muchos trabajos que determinen variables reológicas en sistemas polidispersos, pero de los que se han realizado¹³, se ha concluido que la viscosidad decrece drásticamente ante un aumento en la polidispersidad de las partículas a una mismo tamaño de partícula promedio, así mismo el efecto de la distribución decrece ante una disminución en la concentración de la fase sólida.

Maron y sus colaboradores también investigaron el efecto de la polidispersidad, mezclando dos reticulados a la misma concentración en volumen pero con diferentes diámetros promedio de partícula (sistema bidisperso), encontraron que la mezcla era más fluida y más cercana al comportamiento Newtoniano que los reticulados originales.

Otro trabajo semejante fue realizado por J. S. Chong y sus colaboradores¹⁴ para suspensiones concentradas. Encontraron que al agregar mayor cantidad de partículas pequeñas, la viscosidad relativa de las suspensiones disminuía significativamente. Sin embargo, también encontraron que si la relación de cantidad de partículas pequeñas a grandes era menor a 0.1, entonces las partículas pequeñas se comportaban como parte del mismo fluido, sin interactuar considerablemente con las grandes.

En la figura 2.8 se puede apreciar la variación de la viscosidad obtenida por J. Chong al variar el por ciento de sólidos pequeños en la suspensión bidispersa, se puede ver que al principio la viscosidad relativa disminuye, sin embargo existe un porcentaje en el cual las curvas cambian de pendiente, haciendo entonces que la viscosidad crezca.

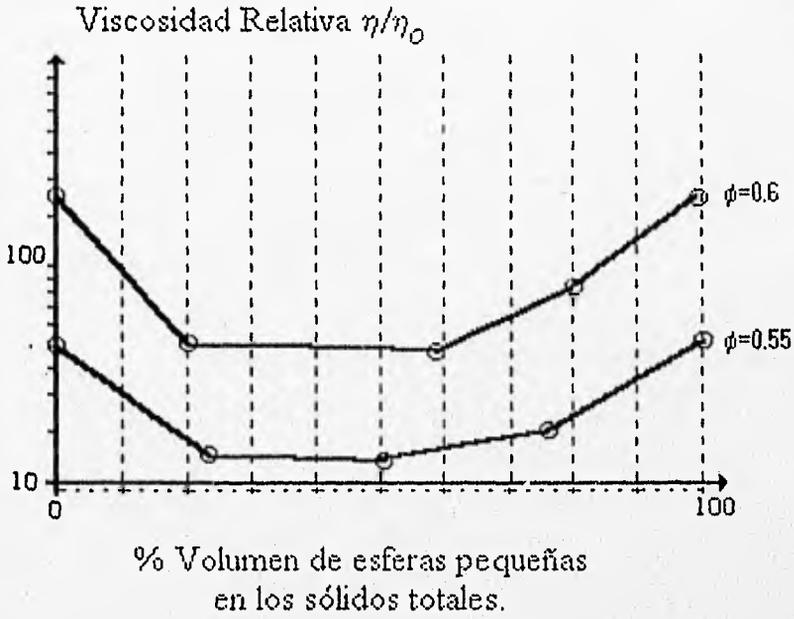


Figura 2.8 Curva que representa la dependencia de la cantidad de esferas pequeñas en la viscosidad relativa de una suspensión bidispersa de esferas de vidrio según J. S. Chong.

2.4. Comportamiento Reológico de Fluidos Electro-Reológicos

La habilidad para controlar el comportamiento en flujo de un material bajo la aplicación de un campo eléctrico ha sido de gran interés para el sector industrial y la comunidad científica; ya lo hacía W. Winslow cuando aplicaba un campo eléctrico a sus FER's formados por almidón en aceite de maíz, siendo significativo el cambio en su viscosidad. Se pueden observar cambios cada vez más sorprendentes en la viscosidad (hasta de 100 veces en magnitud)¹⁵ en los FER's desarrollados hasta hoy, dependiendo de la capacidad de polarizabilidad de las partículas y la intensidad del campo eléctrico aplicado. En seguida se describen los modelos reológicos desarrollados para describir el comportamiento reológico de los FER así como su comportamiento en función de la escala del tiempo o comportamiento dinámico, haciendo énfasis en los efectos del tamaño de la partícula, la distribución del tamaño y la concentración de la fase sólida.

2.4.1. Comportamiento Reológico Observado

Los FER's se pueden describir a partir de su comportamiento en flujo al momento de aplicarles un campo eléctrico, con esto se pueden conocer los cambios que se llevan a cabo en la estructura del fluido. Existe un parámetro que determina el cambio en dicha estructura llamado esfuerzo de cedencia, que es el mínimo esfuerzo que se requiere para iniciar el flujo. Dicho esfuerzo define tres zonas reológicas distintas¹⁶: la región de precedencia, donde aún no se ha iniciado el flujo, la región de cedencia, donde se inicia el flujo y la región de postcedencia o después de que el FER ha fluído.

A. Región de Precedencia

Entre las propiedades que caracterizan a ésta región se encuentran las siguientes: los esfuerzos que se aplican son de baja magnitud (menores al esfuerzo de cedencia del que se trate), se considera al sistema en estado estacionario con una deformación de corte constante. El comportamiento que gobierna es el elástico.

B. Región de Cedencia

En ella se realiza una transición del comportamiento elástico al comportamiento viscoso, el FER comienza a fluir y se deforma permanentemente. Se caracteriza por la existencia de una deformación de cedencia o esfuerzo de cedencia.

Este parámetro tan importante puede usarse para comparar la magnitud del EER a distintos campos eléctricos aplicados. A pesar de que no existe una metodología uniforme para reportar propiedades de los FER, es posible hacer comparaciones generales entre los datos publicados, tomando en cuenta si los materiales tienen distintas formulaciones, de que esfuerzo de cedencia se está haciendo referencia. Ya que si el esfuerzo que se reporta es un esfuerzo de cedencia estático, se está hablando del esfuerzo que proviene del un modelo teórico, pero si se trata de un esfuerzo de cedencia dinámico, se habla del esfuerzo de cedencia encontrado al

extrapolar los resultados experimentales. En general el esfuerzo estático es mayor que el dinámico, por lo que las comparaciones no se pueden llevar a cabo satisfactoriamente.

C. Región de Postcedencia.

Es la región que más se ha estudiado, en ella existe un corte continuo del fluido a una velocidad de corte constante, para un cierto valor de esfuerzo. Se puede caracterizar por medio de la viscosidad aparente (viscosidad de fluidos no newtonianos) la cual aumenta ante un incremento del campo eléctrico aplicado. No existen datos consistentes en metodologías de prueba de comparación de resultados para esta región, por lo que hasta hoy, a pesar de ser la que posee más datos experimentales, no es posible aún realizar una comparación total de todas propiedades de los FER's estudiados.

2.4.2. Modelos Reológicos Propuestos para Describir la Respuesta Electro-Reológica

Se han elaborado varios modelos fenomenológicos y micromodelos para explicar el EER. Ellos describen los cambios en el incremento de viscosidad ante un campo eléctrico externo así como los rearrreglos estructurales que suceden en ellos. A continuación se muestran algunas investigaciones realizadas para los distintos efectos en estudio.

Modelo de Bingham

Este modelo es el más utilizado para describir el comportamiento de los FER's¹⁷. Explica la existencia de una resistencia inicial al flujo por medio del esfuerzo de cedencia τ_0 :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \gamma \quad \dots (33)$$

Donde η_p es la viscosidad plástica y τ_0 , el esfuerzo de cedencia. Cuando se aplica un campo eléctrico y un esfuerzo cortante, esta ecuación se transforma en la siguiente:

$$\tau = \tau(E) + \eta_p(E) \cdot \gamma \quad \dots (34)$$

En la cual τ es el esfuerzo cortante, $\tau(E)$ es el esfuerzo de cedencia en función de la intensidad de campo eléctrico y $\eta_p(E)$ es la viscosidad aparente del FER.

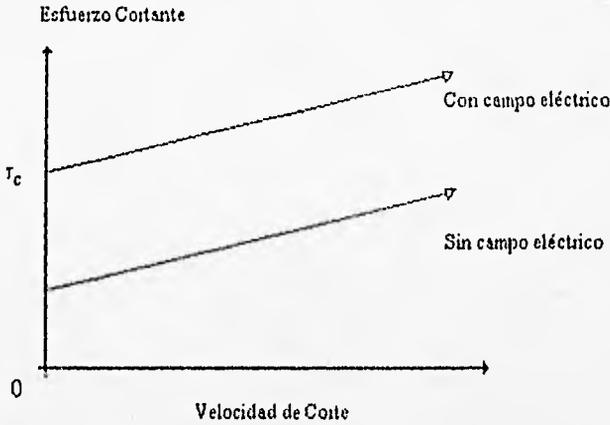


Figura 2.9 Esquema de la curva del esfuerzo cortante contra la velocidad de corte para un FER con un esfuerzo de cedencia (comportamiento según el modelo de Bingham). a) Sin campo eléctrico; b) Con campo eléctrico.

Modelo de Klms y Martinek

En el estudio de FER concentrados, D. Klms y Martinek¹⁸ han atribuido los cambios estructurales de las suspensiones al traslape y deformación de las dobles capas eléctricas de las partículas de la fase sólida. Propusieron la siguiente ecuación para la viscosidad contra la intensidad del campo :

$$\eta = \frac{(K_m \cdot E^2)}{\gamma \cdot \left(\frac{P}{\phi} - 1\right)^2} \quad \dots (36)$$

donde P es el factor de empaquetamiento y K_m la polarizabilidad de la doble capa. Este modelo incluye la dependencia de la fracción en volumen de las partículas a la viscosidad y es congruente con los datos experimentales, pero no explica del todo el papel de las fuerzas que causan la formación de la estructura.

Modelo de la Zona de Corte

D. Klingenberg y Zukoski C.¹⁹ realizaron estudios de cambios estructurales, describiendo la relación entre la deformación y la velocidad de corte bajo condiciones de corte estacionario prolongado. Observaron que al aplicar un campo eléctrico a un FER se formaban estructuras fibrilares en cuestión de segundos. Si la deformación aplicada era menor a un valor crítico, las fibrilas no modificaban su estructura; mientras que una mayor provocaba su rompimiento. Para el caso de una deformación grande en la geometría de platos paralelos, la fibrila rota se mueve adherida al plato superior, y es capturada después por la fibrila adherida al plato inferior, con lo que se reestructura el FER abarcando de nuevo el espacio existente entre los electrodos.

Pudieron observar que a altas velocidades de corte, con un flujo en dirección opuesta a la normalmente aplicada, se formaba una región con una masa de partículas estacionaria, en la que las estructuras fibrilares se inclinaban en dirección al flujo. Esto podría sugerir que la estructura era capaz de soportar un esfuerzo, comportándose como un sólido elástico. Al someter la dispersión electrificada a una deformación continua, se compactan las partículas dentro de estructuras más densas, con ello la región que soporta la deformación contiene pocas partículas.

Proponen el modelo de Zona de Corte, asumiendo que la fuerza eléctrica domina en la región sólida y la fuerza hidrodinámica en la región líquida, se puede calcular el tamaño de dichas regiones haciendo un balance de fuerzas sobre las partículas cerca de la interfase (figura 2.10). En el espacio que comprende la región líquida de espesor Δ , la velocidad de corte será mayor que la velocidad de corte aparente por un factor (L/Δ) . La posición de la interfase sólido-líquido se determina por un balance del esfuerzo de corte en esta interfase con las fuerzas de polarización, manteniendo las partículas en esta región.

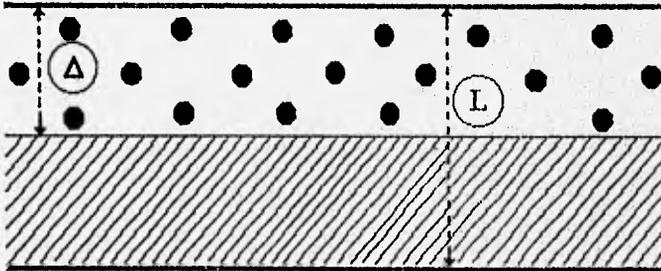


Figura 2.10 Representación esquemática de las regiones sólida (///) y líquida (...) de la suspensión cuando se encuentra entre electrodos.

La fuerza eléctrica sobre las partículas es la siguiente:

$$F_e = 12 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_c \cdot a^2 \cdot \beta^2 \cdot E_0^2 \quad \dots (37)$$

donde:

F_e es la fuerza eléctrica sobre las partículas, ϵ_0 la permitividad del espacio libre, ϵ_c la constante dieléctrica de la fase continua, a el radio de la partícula, β la polarización relativa de las partículas y E_0 la magnitud del campo eléctrico aplicado.

La fuerza viscosa sobre la partícula cerca de la interfase se puede representar por:

$$F_v = 6 \cdot \pi \cdot \eta_\infty \cdot a^2 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{L}{\Delta}\right) \quad \dots (38)$$

donde F_v es la fuerza viscosa sobre las partículas, η_∞ , la viscosidad de la suspensión a una velocidad de corte alta en ausencia de campo eléctrico, L el espacio entre electrodos (GAP), Δ la distancia o espesor de la fase líquida y γ la velocidad de corte.

Para caracterizar la importancia relativa de las fuerzas citadas, se puede hacer uso de un número adimensional, el número de Mason:

$$N_{Ma} = \frac{\text{Fzs. viscosas}}{\text{Fzs. polarización}} = \frac{\eta_\infty \cdot \gamma \cdot \left(\frac{L}{\Delta}\right)}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_c \cdot \beta^2 \cdot E_0^2} \quad \dots (39)$$

Este número es útil para analizar el balance de fuerzas, si coexisten las regiones sólida y líquida, el número será igual a la unidad. Por lo tanto, si el potencial del campo es constante y existe un incremento en la velocidad de corte, (L/Δ) disminuye, para mantener al N_{Ma} constante, lo que significa que al aumentar la velocidad de corte la región líquida se expandirá y la sólida disminuirá. Para el caso donde L/Δ tenga un valor cercano a la unidad se tiene una región sólida degradada totalmente. Si L/Δ se aproxima a L/a sucede que la región sólida abarca la totalidad de la apertura de electrodos, haciendo que la velocidad de corte tienda a cero. El modelo considera dos regiones y para este caso podría decirse que no aplica, sin embargo, el modelo puede predecir el esfuerzo de cedencia en la región sólida²⁰ de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\tau_0 = \left(\frac{4}{3}\right) \cdot a \cdot E_0^b \cdot \phi_0^r \quad \dots (40)$$

donde:

b = Constante*

r = Constante*

ϕ_0 = Fracción en volumen en el centro de la apertura del electrodo.

* independientes del campo eléctrico y la fracción volumen.

El modelo de zona de corte puede expresarse en términos de la viscosidad relativa (η_0/η_∞), en función del número de Mason²¹:

$$\frac{\eta}{\eta_\infty} = 2 \cdot \left[\frac{1}{B} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_\infty} \frac{NMH}{g(\phi, E_0)} \right)^{1/r} - 1 \right]^{-1/n} \quad \dots (41)$$

Donde:

- η = Viscosidad aparente de la suspensión con campo eléctrico.
- B = Constante de la suspensión.
- n = Constante de la suspensión.
- ϕ = Fracción en volumen de la suspensión.
- $g(\phi, E_0)$ = factor función de fracción en volumen y del campo eléctrico.

dicha función g fue aproximada por Klingenberg y Zukoski de la siguiente manera:

$$g(\phi, E_0) = \phi^{1.5 \pm 0.5} \quad \dots (42)$$

Es importante resaltar que este modelo predice las propiedades de flujo observadas, tiene poca sensibilidad a detalles de la estructura sólida degradada.

Modelo de la Gota

T.C. Hasley y sus colaboradores proponen en su modelo, una gota formada por partículas polares en un flujo de corte, el cual tenderá a rotarla en la dirección del flujo. El campo eléctrico también ejercerá un torque, llevando a la gota a una posición paralela a éste (figura 2.10). Se puede conocer un ángulo característico entre la dirección del campo eléctrico y un eje a lo largo de la gota a través de un balance de las fuerzas viscosas y polares. Dicho ángulo se incrementa con el tamaño de la gota debido a que le es difícil mantenerse paralela a la dirección del campo al incrementar la velocidad de corte. Si el ángulo es muy grande, y la gota se orienta, será difícil formar agrupaciones debido a que su energía de polarización no es lo suficientemente grande.

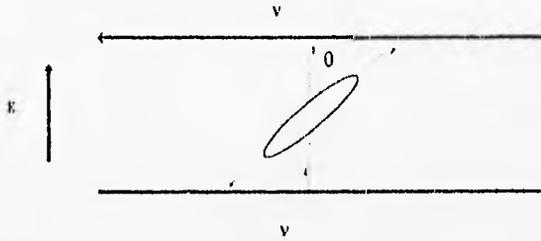


Figura 2.11 Representación esquemática del modelo de la gota de T. C. Hasley.

Las gotas al estar en flujo de corte chocan unas con otras continuamente, deformándose y llegando incluso a aglomerarse debido a las fuerzas de polarización. Existe un tamaño de gota específico que minimiza esta energía. Lo que sucede es algo semejante al fenómeno de maduración de Ostwald (capítulo I) originado probablemente por la competencia entre la energía de polarización y la viscosa.

El ángulo característico puede determinarse a partir del número de Mason²⁴ :

$$\theta = N^{1/3} / M\eta \quad \dots (43)$$

donde θ es el ángulo de la gota en función del tiempo. También se puede determinar la longitud de la gota:

$$\frac{L}{r_g} = \frac{1}{N^{1/3} M\eta} \quad \dots (44)$$

donde L es la longitud de la gota y r_g el radio de las partículas. La viscosidad de la suspensión también es función del número de Mason:

$$\eta = \phi_p \cdot \eta_c \cdot N^{1-2/3} \quad \dots (45)$$

donde ϕ_p es la fracción en volumen de las partículas y η_c es la viscosidad de la fase líquida.

El efecto de la concentración ha sido ampliamente estudiado, y se ha encontrado que existe un aumento en el EER al incrementar la concentración de un FER, mientras que el efecto del tamaño de la partícula y la distribución del tamaño no han sido ampliamente estudiados. El tamaño de la partícula que constituye la fase sólida en un FER, se encuentra entre 0.04 a 50 micras²³. Sin embargo, los tamaños en los cuales el EER funciona mejor no están claramente definidos. Si las partículas son muy pequeñas entonces las fuerzas térmicas se hacen considerables y pueden llegar a compararse con las de polarización en el EER; mientras que las grandes responden demasiado lento al campo eléctrico como para aplicarse en un dispositivo comercial. Además, las partículas grandes tienden a sedimentarse bajo campos gravitacionales y centrifugos, pero partículas del orden de 200 a 5000 micras aún tienen una respuesta ante la aplicación de un campo eléctrico.

Actualmente se acepta que solamente existirá una influencia del tamaño de partícula cuando dominen las fuerzas térmicas y no las de polarización durante el EER²⁴. Esta suposición necesita ser investigada y validada aún.

Nomenclatura Capítulo II

FER	Fluido Electro-Reológico.
η	Viscosidad de un fluido [Pa.s].
F	Fuerza aplicada.
A	Área de aplicación de la fuerza.
τ	Esfuerzo cortante (F/A) [Pa].
γ	Velocidad de corte [1/s].
τ_0	Esfuerzo de cedencia (parámetro de la ec. de Bingham).
η_p	Viscosidad plástica (parámetro de la ec. de Bingham).
K	Parámetro de la ec. de la Ley de Potencia.
n	Parámetro de la ec. de la Ley de Potencia.
η_∞	Viscosidad infinita, viscosidad de la suspensión a una velocidad de corte muy alta en ausencia de campo eléctrico.
η_0	Viscosidad del medio.
η_b	Parámetro de las ecuaciones de Tschiesner.
γ_b	Parámetro de las ecuaciones de Cross y Carreau.
τ_b	Parámetro de la ecuación de Meier.
K_1	Parámetro del modelo de Sisko.
E	Módulo de Young.
G	Módulo de Corte.
σ	Esfuerzo de tensión.
λ	Tiempo característico del material.
t	Tiempo del proceso.
N_{De}	Número de Deborah (λ/t).
J	Obediencia o "compliance".
J_0	Parte de la curva del modelo de Berger que representa una respuesta puramente elástica.
η_0	Parte lineal de la curva del modelo de Berger que representa una respuesta puramente viscosa.
δ	Ángulo de fase entre la onda aplicada y la de respuesta en una prueba oscilatoria.
G^*	Módulo Complejo.
G'	Módulo elástico o de almacenamiento.
G''	Módulo viscoso o de pérdida.
η^*	Viscosidad compleja.
η'	Componente de almacenamiento de la viscosidad compleja.
η''	Componente de pérdida de la viscosidad compleja.
ϕ	Fración en volumen de una suspensión.
η_r	Viscosidad relativa (η/η_0).
η	Viscosidad de la suspensión.
$ \eta $	Viscosidad intrínseca.
p	Fración de empaquetamiento.
ϕ_1	Fración en volumen falcin de Mooney.
ϕ_2	Fración en volumen complementaria de ϕ_1 .
FK	Factor de modificación de Mooney.
ϕ_{12}	Fración en volumen efectiva.
k	Inverso de la fracción de empaquetamiento: $1/p$
k_1, k_2, k_3	Parámetros de un polinomio de ajuste de tercer orden.
$\gamma(1)$	Viscosidad (1) de la demostración de Maron.
$\dot{\gamma}(1)$	Velocidad de corte (1) de la demostración de Maron.

m	Índice del comportamiento no newtoniano de Maron.
λ_j	Tiempo de relajación para cada una de las unidades de flujo (parámetro de la ec. de Ree-Eyring).
a_j	Parámetro de viscosidad (ec. de Ree-Eyring).
a_0	Parámetro de viscosidad con $\lambda=0$.
η_1	Límite de alto corte (ec. de Krieger).
η_2	Límite de corte igual a cero (ec. de Krieger).
τ_{11}	Esfuerzo de corte medio entre η_1 y η_2 .
k_B	Constante de Boltzmann.
T	Temperatura absoluta.
a	Radio de la partícula.
α	Constante cercana a uno.
$\tau(E)$	Esfuerzo de corte en función del campo eléctrico.
$\eta_p(E)$	Viscosidad plástica en función del campo eléctrico.
(μ_0, τ_0)	Parámetros de Casson en función del campo eléctrico.
K_m	Polarizabilidad de la doble capa.
Δ	Espesor de la región líquida en el modelo de zona de corte de Klingenberg & Zukoski.
L	Espaciamiento o GAP entre electrodos.
F_e	Fuerza eléctrica sobre las partículas en el modelo de zona de corte.
β	Polarización relativa de las partículas.
ϵ_0	permitividad dieléctrica del vacío.
ϵ_c	permitividad dieléctrica de la fase continua.
E_0	Magnitud del campo eléctrico aplicado.
F_v	Fuerza viscosa en el modelo de zona de corte.
b, r	Constantes independientes del campo eléctrico y de la fracción en volumen para la ec. del esfuerzo de cedencia del modelo de zona de corte.
ϕ_0	Fracción en volumen en el centro del GAP entre electrodos.
B	Constante para la ec. del modelo de zona de corte en función del N_{Mir} .
n	Constante para la suspensión en la ec del modelo de zona de corte en función del N_{Mir} .
$g(\phi, E_0)$	Factor función de la fracción en volumen y del campo eléctrico para la ec. del modelo de zona de corte en función del N_{Mir} .
EER	Efecto Electro-Reológico.
θ	Ángulo característico de una gota (modelo de la gota de Hasley).
L	Longitud de la gota (modelo de la gota de Hasley).
r_g	Radio de las partículas (modelo de la gota de Hasley).
ϕ_p	Fracción en volumen de las partículas (modelo de la gota de Hasley).
η_c	Viscosidad de la fase líquida.

Referencias Bibliográficas.

1. Byron Bird, Warren E. Stewart y Edwin Lighthfoot, Fenómenos de transporte, (México D. F.: Ediciones REPLA S.A. 1987) pág. 1-3 a 1-5
2. Gebhard Schramm, A practical Approach to Rheology and Rheometry, (Karlsruhe, República Federal alemana; Haake Rheometers 1994) pág. 9
3. Gebhard Schramm, A practical Approach to Rheology and Rheometry, (Karlsruhe, República Federal alemana; Haake Rheometers 1994) pp. 210 - 212
4. _____, Operations Manual for the CarriMed CSL Range of Rheometers using Version 5.0 Software, CarriMed Ltd. Glebelands Centre, Vincent Lane Dorking Surrey RH43YX pág. 28

5. _____, Operations Manual for the CarriMed CSL Range of Rheometers using Version 5.0 Software. CarriMed Ltd. Glebelands Centre. Vincent Lane Dorking Surrey RH43YX pág. 46
6. Gebhard Schramm, A practical Approach to Rheology and Rheometry. (Karlsruhe, República Federal alemana; Haake Rheometers 1994) pp. 98 - 106
7. _____, Operations Manual for the CarriMed CSL Range of Rheometers using Version 5.0 Software. CarriMed Ltd. Glebelands Centre. Vincent Lane Dorking Surrey RH43YX pág. 46
8. Irving M. Krieger "Rheology of Monodisperse Latices", en: Advanc. Colloid Interface Science, No. 3 (1972) pp. 114- 117
9. Irvin M. Krieger, "Rheology of Monodisperse Latices", en: Advanc. Colloid Interface Science, No. 3 (1972) pág. 114
10. R. Pal., Y. Yan, J. Masliyah "Rheology of Emulsions", en: American Chemical Society. Advances in Chemistry Series 231. Emulsions, Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry. (Washington, D.C. : Laurier L. Schramm, 1992) pp. 148-149
11. Irvin M. Krieger, "Rheology of Monodisperse Latices", en: Advanc. Colloid Interface Science, No. 3 (1972) pág. 117
12. R. Pal., Y. Yan, J. Masliyah "Rheology of Emulsions", en: American Chemical Society. Advances in Chemistry Series 231. Emulsions, Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry. (Washington, D.C. : Laurier L. Schramm, 1992) pp. 132-170
13. Irvin M. Krieger, "Rheology of Monodisperse Latices", en: Advanc. Colloid Interface Science, No. 3 (1972) pág. 119
14. J.S. Chong, E. B. Christiansen y A. D. Baer, "Rheology of Concentrated Suspensions", en : Journal of Applied Polymer Science Vol. 15 (1971) pág. 2017
15. Thomas C. Hasley, "Electrorheological Fluids", en: Science Vol. 258 No. 30 (octubre 1992) pág. 761
16. Keith D. Weiss, J. D. Carlson, J. P. Coulter, "Material Aspects of Electrorheological Systems", en : Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 4 (enero 1993) pág. 15
17. D.J. Klingenberg y C.F. Zukoski, "Studies on the Steady-Shear Behavior of ERF", en : Langmuir Vol. 6 (1990) pp.18
18. Donald L. Klass y Thomas W. Martinek, "Electroviscous fluids I. Rheological Properties", en: Journal of Applied Physics Vol. 38 No. 1 (enero 1967) pág. 72
19. D.J. Klingenberg y C.F. Zukoski, "Studies on the Steady-Shear Behavior of ERF", en : Langmuir Vol. 6 (1990) pp.15-24
20. D.J. Klingenberg y C.F. Zukoski, "Studies on the Steady-Shear Behavior of ERF", en : Langmuir Vol. 6 (1990) pp. 15-24
21. D.J. Klingenberg y C.F. Zukoski, "Studies on the Steady-Shear Behavior of ERF", en : Langmuir Vol. 6 (1990) pp.15-24
22. Thomas C. Hasley, "Electrorheological Fluids", en: Science Vol. 258 No. 30 (octubre 1992) pág. 765
23. Therese C. Jordan y M. T. Shaw, " Electrorheology", en: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24 No. 5 (octubre 1989) pág. 857
24. Therese C. Jordan y M. T. Shaw, " Electrorheology", en: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24 No. 5 (octubre 1989) pág. 857

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el desarrollo de la parte experimental, se presentan características tanto del equipo utilizado como de los materiales empleados para la preparación de las diferentes suspensiones. También se menciona el método de preparación de éstas y las técnicas empleadas para la evaluación reológica.

Una caracterización de cualquier substancia se basa en la modificación de variables que afectan su desempeño en algún ámbito, los fluidos electro-reológicos son materiales que se caracterizan por presentar distintas propiedades con variaciones en las características de la fase sólida, tales como: el tamaño de la partícula, la distribución del tamaño y la concentración.

La importancia de realizar una caracterización reológica de dichos fluidos tanto en presencia como en ausencia de un campo eléctrico radica en un mejor entendimiento de la relación entre el esfuerzo de cedencia, la viscosidad aparente, el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, con las variables mencionadas.

3.1. Materiales

Los fluidos empleados en este estudio, se formularon empleando aceite silicón y sílica gel. Este sistema es comúnmente utilizado debido a las propiedades que dichos materiales proporcionan a la suspensión¹. En esta sección se describen sus propiedades.

El tipo de partículas de la fase sólida utilizada (SiO_2) ha sido utilizada ampliamente en la literatura, encontrando en ella características electro-reológicas aceptables². En este trabajo se utilizan cuatro diferentes tamaños de partícula, dichas substancias fueron adquiridas directamente de los proveedores, y se les determinaron experimentalmente algunas de características mediante distintos métodos; en la tabla 3.1 se muestra un resumen de sus características.

Tabla 3.1 Características de la fase sólida.

Fase sólida Nombre comercial	Tamaño promedio de la partícula [μm] (1)	Distribución del tamaño de la partícula [μm] (2)	Distribuidor	Densidad de la partícula (3)
Silica	1.5	1.5 ± 1.19	Saxa, Sigma Chemical Co.	2.7406
Silica gel 60	21.2	21.2 ± 4.85	Merck	2.1003
Silica gel 60	25.6	25.6 ± 8.97	Merck	1.8677
Silica gel 60	65.2	65.2 ± 21.89	Macherey Nagel	1.9969

(1) Determinación por conteo de partículas de micrografías SEM.

(2) Determinación por conteo de partículas de micrografías SEM.

(3) Determinación experimental por medio de diferencia de pesos¹.

Las partículas de la fase sólida se muestran en la figura 3.1, estas micrografías fueron realizadas en un microscopio de barrido electrónico para poder vislumbrar la forma y tamaño de las partículas que se utilizan, en la parte inferior de cada una se encuentra una escala, con la cual se puede comparar el tamaño aparente de las partículas. En dicha figura se puede ver que las partículas de menor tamaño, en una escala de 10 micras, se encuentran partículas demasiado pequeñas, las partículas de 21.2 micras de tamaño promedio son muy regulares en cuanto a tamaño y de forma irregular tendiendo a la esfericidad. Así también, las partículas de 25.6 micras son irregulares pero con formas que tienden más a una figura elipsoidal. Las partículas de 65.2 micras de tamaño son demasiado grandes en la escala de 50 micras, de forma irregular y de tamaños semejantes.

Estas micrografías también se utilizaron para realizar conteos de partículas suficientes para obtener la distribución del tamaño de partícula. Para ello se realizaron mediciones del diámetro de las partículas sobre su eje mayor y el ortogonal a este, tomando al tamaño de estas como el promedio entre estas dos mediciones⁴. Dicha distribución se muestra en la figura 3.2, donde se puede apreciar la forma de la distribución del tamaño perteneciente a cada una de las especies analizadas.



Figura 3.1 Micrografía representativa de la fase sólida utilizada (sílica de 25.6 micras).

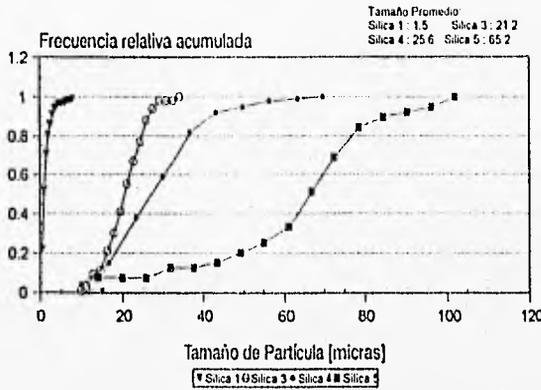


Figura 3.2 Distribución del tamaño de partícula de la fase sólida utilizada.

La fase líquida empleada en la preparación de las suspensiones fue el aceite silicón 1000, adquirido directamente del distribuidor Spectrum Chemical, en la tabla 3.2 se muestran algunas de sus características.

Tabla 3.2 Características de la fase líquida.

Fase Líquida	Constante Dieléctrica	Viscosidad [Pa.s]	Peso Especifico (25 °C)	Temperatura de ignición [°C]
Aceite Silicón 1000	2.791	0.98	0.97	326

3.2. Equipos Empleados

3.2.1. Dispersión de la Fase Sólida

Para la preparación de las suspensiones se utilizó un dispersor de laboratorio tipo Cowles Series 2000 modelo 84, Premier Mill Corp, propiedad del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Este dispersor tiene integrado un tacómetro que mide las revoluciones de la flecha en la cual se

encontraba montada la propela de dispersión, también posee un controlador de velocidad con el cual se pudieron alcanzar los requerimientos para la dispersión de las suspensiones.

3.2.2. Mediciones Reológicas

Para realizar las mediciones reológicas se utilizó un viscosímetro Sincroeléctrico Brookfield modelo RVT (figura 3.3), adaptado con una geometría de platos paralelos, los cuales funcionaron como electrodos en las pruebas en presencia de campo eléctrico. Las mediciones se pudieron realizar a ocho distintas velocidades que posee dicho viscosímetro. Su funcionamiento se basa en un resorte unido al plato de la escala y en el otro extremo al pivote indicador de medición. Cuando se sumerge el plato en el fluido, se opone un arrastre viscoso a la fuerza ejercida por el motor, el cual se registra por una deflexión de la pivote indicador en el plato de escala. Así, la lectura es un porcentaje de la deformación máxima del resorte (cuando se lee 100 es de 7187 dinas-cm).

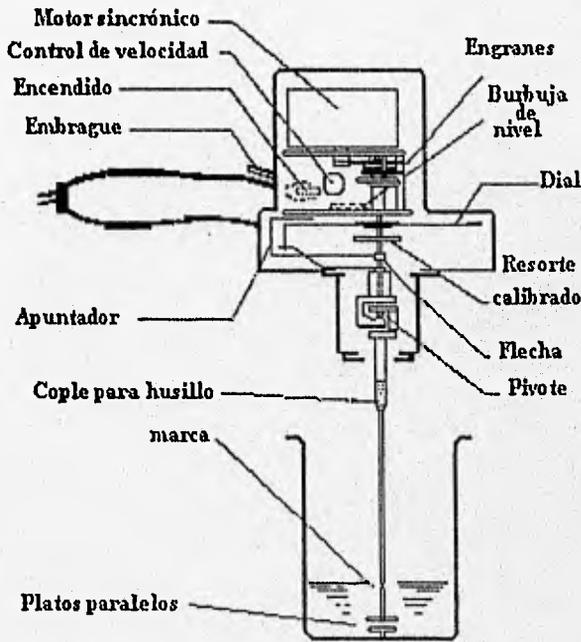


Figura 3.3 Viscosímetro Sincroeléctrico Brookfield RVT.

3.2.3. Mediciones Reológicas con Aplicación de Potencial Eléctrico

Para la aplicación de una diferencia de potencial a las suspensiones se utilizó una fuente de poder de alto voltaje marca Bertan Associates Inc. modelo 205B-10R con capacidad de hasta 10 kV. Con esta se pudo crear un campo eléctrico función de una diferencia de potencial elegida y un espaciamiento entre platos fijo de 3 mm.

3.3. Preparación de los Fluidos Electro-Reológicos

Las dispersiones fueron preparadas bajo un buen conocimiento del contenido de humedad en las partículas, la cual se consideró despreciable. Para la evaluar el efecto del tamaño de partícula se prepararon cuatro dispersiones al 20% en peso de cada tamaño de partícula, para el efecto de la concentración, seis suspensiones de 2, 5, 10, 15, 20 y 30 % en peso de la sílica de 25.6 micras de tamaño promedio y para el efecto de la distribución del tamaño, otras seis dispersiones de la sílica de 21.2 micras de tamaño promedio micras de 2, 5, 10, 15, 20, y 30 % en peso.

La preparación de las dispersiones se realizó de la siguiente manera: primero se integraron las dos fases, después se dispersaron a 4000 rpm durante 15 minutos⁶, luego la muestra preparada se desgasificó en una cámara de vacío para eliminar el aire ocluido en las muestras, así como el adquirido durante la dispersión. Una vez preparadas, se realizaron inmediatamente las pruebas reológicas para evitar problemas de sedimentación⁷.

3.4. Métodos Reológicos para la Caracterización de los FER

La metodología empleada en la caracterización reológica de los FER fue implementada para obtener los resultados más confiables de los distintos efectos analizados.

3.4.1. Geometría de medición

La elección de una geometría involucra la comparación entre varias ventajas y desventajas; la discusión de estas y la elección de la mejor geometría para el sistema se encuentran en manuales y folletos de soluciones comerciales de los fabricantes de instrumentos de medición reológica⁸.

La geometría seleccionada fue la de platos paralelos de 2 centímetros de diámetro⁹ ya que además de ser la propuesta por el diagrama de TA Instruments¹⁰, la aplicación del campo eléctrico a través del plato electrodo es uniforme a lo largo de toda la separación de los platos y se usa para mediciones reológicas de suspensiones y emulsiones.

Dicha geometría se representa esquemáticamente en la figura 3.5., las ecuaciones que definen las diversas cantidades reológicas se anotan a continuación¹¹:

$$\eta(\dot{\gamma}_R) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \dots (46)$$

$$\gamma_R = \frac{W_0 \cdot R}{H} \quad \dots (47)$$

$$\tau = \frac{T}{2 \cdot \pi R^3} \quad \dots (48)$$

donde :

- $\eta(\gamma_R)$: Viscosidad medida.
- γ_R : Velocidad de corte en el borde del sistema.
- T : Torque requerido para rotar el disco superior.
- R: Radio de los discos.
- W_0 : Velocidad angular del disco superior.
- H: Espaciamiento entre platos (GAP).
- N: Velocidad rotacional [rpm].
- τ : Esfuerzo de corte tangencial.

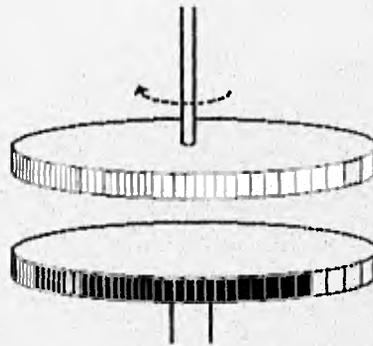


Figura 3.4 Representación esquemática de la geometría de platos paralelos.

para el caso de una medición con campo eléctrico la viscosidad relativa esta dada por la siguiente ecuación¹²:

$$\eta(E) = \frac{\tau(E)}{\gamma} \quad \dots (49)$$

aquí la viscosidad y el esfuerzo de corte están en función de la magnitud del campo eléctrico aplicado ($\tau(E)$ y $\eta(E)$).

3.4.2. Espaciamento entre platos (GAP)

El espaciamento entre platos o GAP fue determinado para conservarse por lo menos 20 veces más grande que la partícula mayor¹³ ajustando el viscosímetro Brookfield a 3000 micras, para evitar una caída de potencial muy cercana y poder realizar las mediciones.

3.4.3. Pruebas Reológicas

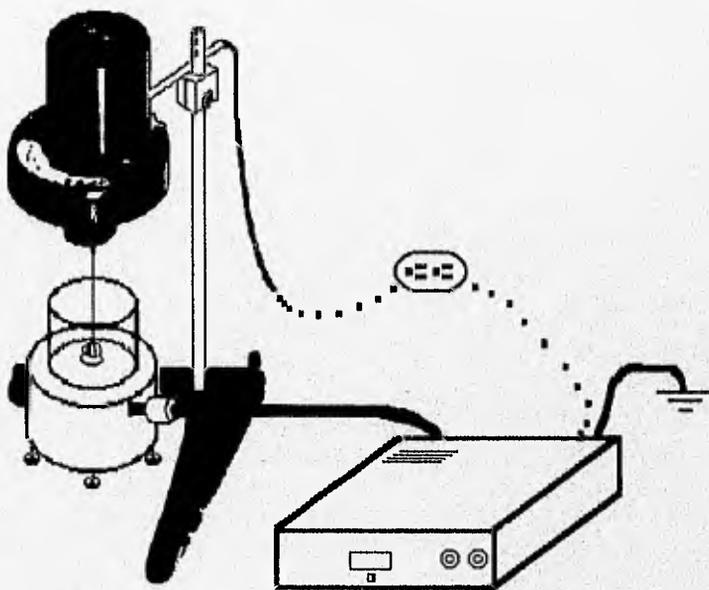


Figura 3.5 Representación esquemática del arreglo utilizado para las pruebas reológicas.

Para la determinación de las propiedades reológicas de las dispersiones sólido-líquido se utilizó el sistema descrito en la figura 3.5, en ella se puede ver que el husillo del viscosímetro se colocó sobre un recipiente que en su parte inferior posee un plato-electrodo, el cual se conectó a la fuente de poder de alto voltaje para proporcionar diferentes diferencias de potencial eléctrico a la dispersión sólido-líquido o FER en estudio contenido en el recipiente. Con dicho arreglo se pudieron obtener mediciones de torque para las ocho distintas velocidades del viscosímetro. A

partir de estos resultados se pudieron obtener las viscosidades de las diferentes muestras preparadas, evaluando los efectos del tamaño de partícula, su distribución y la concentración de la fase sólida.

Debido a que la estructura de estos materiales tiene una muy fuerte dependencia con el tiempo, es decir que son función de la "historia de corte"¹⁴ por la cual hayan pasado, se tuvo que evitar provocar cortes innecesarios como golpes, vibraciones así como tomar atención especial en la colocación de la suspensión sólido-líquido a evaluar, procurando que la velocidad de vaciado fuera lo mas lenta posible, también se estandarizó el procedimiento de mediciones para recabar datos comparables desde este punto de vista.

Inicialmente se realizó un barrido ascendente de las 8 velocidades del viscosímetro, sin la aplicación de potencial eléctrico, la lectura de la primera velocidad tuvo un tiempo de equilibrio de 3 minutos; mientras que las siguientes, de 1 minuto. Las pruebas realizadas en el caso de la aplicación de campo eléctrico se realizaron en incrementos de 0.25 kV/mm, hasta un máximo de 1.5 kV/mm¹⁵ cuando fue posible. A continuación se muestra un resumen de las condiciones experimentales para las distintas pruebas realizadas (tabla 3.3).

Tabla 3.3 Condiciones establecidas para las pruebas reológicas.

Condición	Valor designado
Tiempo de equilibrio	3 min
Temperatura de la prueba	25 °C
Intervalo de medición	1 min
Velocidades rotacionales	0.5, 1.0, 2.5, 5, 10, 20, 50 y 100 RPM
Diferencias de potencial aplicadas	0.75, 1.5, 2.25, 3.0, 3.75, 4.5, 5.25 y 6.0

Nomenclatura

$\eta(\dot{\gamma}_R)$	Viscosidad medida en la geometría de platos paralelos.
$\dot{\gamma}_R$	Velocidad de corte en el borde del sistema.
T	Torque requerido para rotar el disco superior.
R	Radio de los discos.
ω_0	Velocidad angular del disco superior.
H	Espaciamiento entre platos (GAP).
GAP	Espaciamiento entre platos.

Referencias Bibliográficas

1. Keith D. Weiss, J. D. Carlson, J. P. Coulter, "Material Aspects of Electrorheological Systems" en: Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 4 (enero 1993) pág. 19
2. Donald Klass y T. W. Martinek, "Electroviscous fluids I. Rheological Properties" en: Journal of Applied Physics Vol. 38 No. 1 (enero 1967) pág. 67
3. Density Determinations of Solids and Liquids. 1955 ASME (PCT 19, 16-65) pp. 1650-1945
4. R. Pal., Y. Yan, J. Masliyah "Rheology of Oil in Water Emulsions with Added Solids" en: Chemical Engineering Science Vol. 46 No. 4 (1991) pág. 986
5. J. R. Van Wazer, J. W. Lyons, K. Y. Kim y R. E. Colwell, Viscosity and Flow Measurement A Laboratory Handbook of Rheology. (Nueva York, E.U.A.: John Wiley & Sons, Inc. 1963) pp. 142 - 143
6. L. Rejón G., J. C. Chew, O. Manero y M. A. Ponce "Rheological Behavior of Silica Gel-Silicon Oil Suspension: Effect of the Concentration and Size of the Solid Phase" en: V Simposio Latinoamericano de Polímeros 1996. (Mar de Plata Argentina 1996 aceptado)
7. Y. Otsubo, M. Sekine, S. Katayama "Electrorheological Properties of Silica Suspensions" en: Journal of Rheology Vol. 36 No. 3 (abril 1992) pág. 480
8. L. Rejón G., "Relación entre Propiedades Reológicas y Estructurales en Materiales Electro-Reológicos. Reporte Doctoral No. 1" México: Facultad de Química, UNAM enero 1995. pág. 10
9. Louise Marshall, C.F. Zukoski, J. W. Goodwin, "Effects of Electric Fields on the Rheology of non-aqueous Concentrated Suspensions" en: Journal of Chemical Society Faraday Trans. Vol. 85 No. 9 (1989) pp. 2786
10. TA Instruments (Rheometers), Inc. Inglaterra, 1993
11. R. Pal., Y. Yan, J. Masliyah "Rheology of Emulsions", en: American Chemical Society. Advances in Chemistry Series 231. Emulsions, Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry. (Washington, D.C.: Laurier L. Schramm, 1992) pág. 168
12. L. Rejón, M.A. Ponce, C. De la Luz, R. Nava, V. M. Castaño "Effect of Dielectric Constant of the Liquid Phase of Electrorheological Fluids" en: Journal of Intelligent Materials Systems and Structures Vol. 6 No. 6 (noviembre 1995) pág. 841

-
13. Gebhard Schramm, A practical Approach to Rheology and Rheometry. (Karlsruhe, República Federal alemana; Haake Rheometers 1994) pp. 180-181
 14. _____, Operations Manual for the CarriMed CSI, Range of Rheometers using Version 5.0 Software. CarriMed Ltd. Glebelands Centre. Vincent Lane Dorking Surrey RH43YX pág. 19
 15. Paul M. Adriani y Alice P. Gast "A Microscopical Model of Electrothology" en: *Physics of Fluids* Vol. 31 No. 10 pág. 2758

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la experimentación para ello se emplean gráficas, tablas y representaciones esquemáticas, con la finalidad de mostrar el efecto de las variables seleccionadas sobre el comportamiento reológico de las dispersiones sólido-líquido analizadas. En la primera sección se analiza el comportamiento en flujo con que responden las diferentes muestras preparadas a las variables en estudio (tamaño, distribución del tamaño y concentración de la fase sólida) en ausencia de campo eléctrico, es decir simplemente como dispersiones sólido-líquido, mientras que en la segunda sección el análisis se realiza para el comportamiento de los fluidos electro-reológicos como función de las variables mencionadas, modificando la magnitud del efecto electro-reológico por la aplicación de distintos campos eléctricos.

Los resultados que se presentan se han realizado en base a observaciones experimentales anotadas en el anexo II. Dichas mediciones siguieron varios tratamientos para poder obtener series de datos con variables reológicas y unidades de medición adecuadas para su comparación bajo la influencia de las variables estudiadas. Se utiliza el sistema internacional de medidas y las variables de respuesta reológica utilizadas son: esfuerzo de corte, velocidad de corte, viscosidad relativa, que para el caso de las pruebas con campo eléctrico se llamará magnitud de respuesta electro-reológica. Así mismo se determinarán parámetros a partir de las series de datos tales como el esfuerzo de cedencia y la viscosidad aparente.

4.2. Comportamiento Reológico de las Dispersiones Sólido-Líquido Preparadas en Ausencia de un Campo Eléctrico

Las propiedades reológicas de un FER inician desde su comportamiento en ausencia de campo eléctrico, en este los FER's se comportan como suspensiones no-coloidales, con el comportamiento consecuente que tienen este tipo de materiales.

En esta sección se analiza el comportamiento en flujo que presentan las dispersiones preparadas considerando variables tales como tamaño, distribución del tamaño y concentración de la fase sólida. Este análisis se realizará a través de la comparación de las curvas de flujo (τ vs. $\dot{\gamma}$ y/o viscosidad vs. $\dot{\gamma}$) y de los esfuerzos de cedencia.

4.1.1. Efecto del tamaño de partícula sobre el comportamiento en flujo observado

En general se acepta que la adición de sólidos a un fluido resulta en el incremento de viscosidad de la dispersión sólido-líquido. Se involucran muchos parámetros que contribuyen al comportamiento de la viscosidad, las fuerzas de interacción entre partículas, la interacción partícula-medio, así como interacciones hidrodinámicas. El efecto que tiene el tamaño de dichos sólidos se ha analizado a través de distintas experimentaciones, las cuales se discuten a continuación.

a) Viscosidad Relativa

Se han comparado las viscosidades resultantes para los cuatro tamaños de partícula analizados. Debido a que las dispersiones sólido-líquido preparadas son del tipo no-newtonianas, la comparación debe hacerse siempre indicando la velocidad o el esfuerzo de corte a la cual se obtienen tales datos de viscosidad¹. Se ha elegido una concentración alta (20% en peso), ya que el efecto del tamaño de partícula es imperceptible a bajas concentraciones.

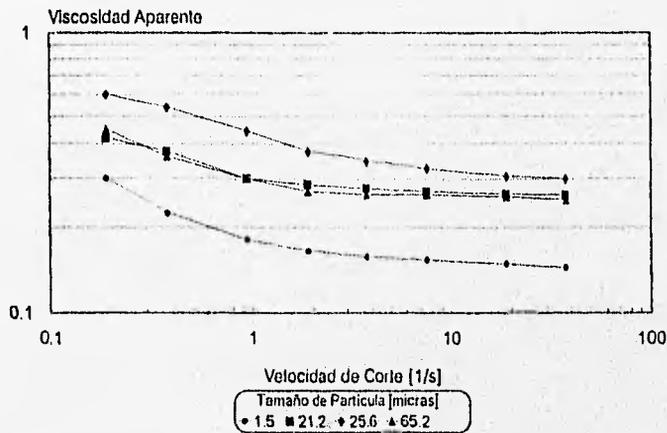


Figura 4.1 Efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad aparente de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto del tamaño de partícula sin la acción de un campo eléctrico.

En la figura 4.1 se grafica la viscosidad de las dispersiones como función de la velocidad de corte, se puede ver que la viscosidad decrece a medida que se incrementa la velocidad de corte, esto implica un comportamiento de adelgazamiento viscoso en las suspensiones, dicho decremento se relaciona posiblemente a un rompimiento de la estructura inicial.

En la figura 4.2a, se muestra la viscosidad relativa de las suspensiones contra el tamaño de partícula de su fase sólida a distintas velocidades de corte, aquí la viscosidad crece conforme se incrementa el tamaño de la partícula hasta un cierto valor, siendo este de 25.6 micras, luego del cual la viscosidad decrece. La magnitud del cambio en la viscosidad es muy pequeña, es decir que

la magnitud del efecto del tamaño de la partícula no es muy perceptible a estas velocidades de corte en la dispersiones al 20% en peso.

Los cambios aquí presentes están relacionados con efectos de volumen de las partículas en la suspensión, ya que al hacer una gráfica de la relación de densidades ρ_p/ρ_s (densidad de la partícula/densidad de la dispersión) contra el tamaño de partícula (figura 4.2b) se encuentra la misma tendencia que en la figura 4.2a.

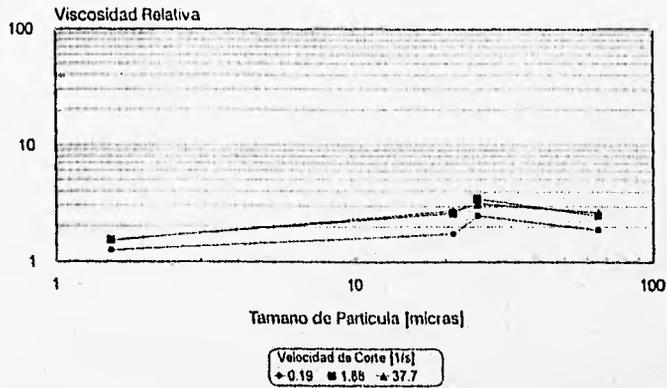


Figura 4.2a Efecto del tamaño de la partícula sobre la viscosidad relativa de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto del tamaño de partícula sin la acción de un campo eléctrico.

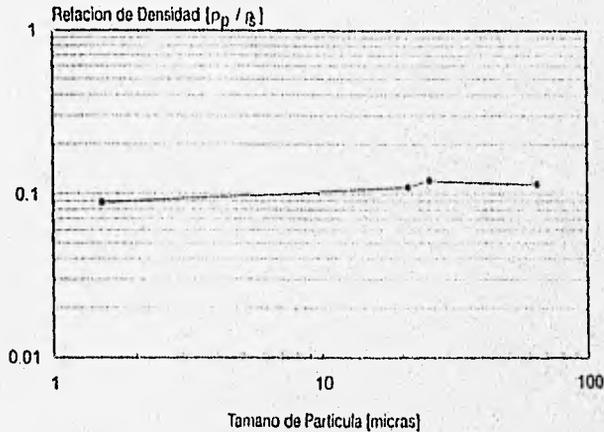


Figura 4.2b Efecto del tamaño de la partícula sobre la relación de densidades ρ_p/ρ_s de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto de la concentración de partículas sin la acción de un campo eléctrico.

Esto lleva a pensar que el efecto del tamaño radica en que tanto volumen de sólidos esté presente en la suspensión, ya que para una misma fracción en peso, la fracción en volumen para cada suspensión con distinto tamaño de partícula es diferente (anexo IV). Siendo que entre mayor volumen ocupado, las partículas disipan una mayor cantidad de energía y con ello aumenta la viscosidad. El decremento de viscosidad relativa en la gráfica 4.2a se puede explicar tal como lo señala S. C. Tsai²: el grado de difusión de las partículas en el sistema decrece a medida que el diámetro se incrementa, con lo que se disipa menos energía y por tanto la viscosidad es menor.

b) Esfuerzo de Cedencia

Al realizar una comparación de los reogramas para cada uno de los tamaños, es decir graficando el esfuerzo cortante contra la velocidad de corte (figura 4.3), es apenas perceptible la aparición de un esfuerzo de cedencia. Los comportamientos reológicos de las suspensiones se ajustan con éxito a un modelo lineal, como lo es el de Bingham.

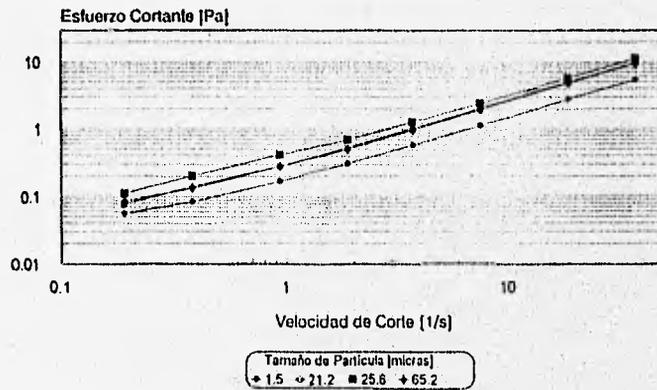


Figura 4.3 Curva del esfuerzo cortante contra la velocidad de corte de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto del tamaño de la partícula sin la acción de un campo eléctrico.

Tabla 4.1 Parámetros de ajuste al modelo de Bingham de los datos obtenidos para suspensiones preparadas para evaluar el efecto del tamaño de partícula.

Tamaño de Partícula [micras]	Coefficiente de Correlación en el ajuste	Esfuerzo de Cedencia τ_c [Pa]	Viscosidad Plástica η_p [Pa.s]
1.5	0.9999	0.04664	0.1440
21.2	0.9999	0.04809	0.2615
25.6	0.9999	0.14071	0.2976
65.2	0.9999	0.05229	0.2525

En la tabla 4.1 se muestran los valores de los esfuerzos de cedencia para las suspensiones en función del tamaño de la partícula de la fase sólida. Estos esfuerzos sugieren un comportamiento no Newtoniano de las dispersiones sin la influencia de un campo eléctrico (tabla 4.1).

Realmente estos valores obtenidos matemáticamente dan solo una idea de cual tamaño de partícula proporciona una mayor resistencia para iniciar el flujo, siendo el menor tamaño el que menor resistencia opone, esta se incrementa al aumentar el tamaño de partícula hasta el de 25.6 micras, luego de esta disminuye para el tamaño de 65.2 micras, comportándose de manera similar al de 21.2 micras.

Es importante resaltar que el efecto del tamaño de la partícula está influenciado por varias contribuciones, tales como la forma y la distribución del tamaño de la partícula principalmente. Por tanto los resultados aquí presentados quedan íntimamente unidos a los de la siguiente sección.

4.1.2. Efecto de la distribución del tamaño de partícula sobre el comportamiento en flujo observado

Para la caracterización del comportamiento en flujo atendiendo al efecto de la distribución del tamaño de la partícula, se realizaron comparaciones entre dos tipos de dispersiones sólido-líquido: una constituida por partículas con una distribución del tamaño de partícula "cerrada" (considerándola monodispersa) y otra constituida por partículas con una amplia distribución del tamaño de partícula (polidispersa) esto se ha logrado realizando un análisis a diámetros medidos a micrografías obtenidas por microscopía de barrido electrónico (ver anexo III). Las partículas de distribución 21.2 ± 4.85 micras se consideran monodispersas y las de distribución 25.6 ± 8.97 micras, como polidispersas. A continuación se presenta el análisis realizado.

a) Viscosidad Relativa

En la figuras 4.4 y 4.5 se muestran los resultados obtenidos para distintas comparaciones entre suspensiones monodispersas y la polidispersas en función de la velocidad de corte a distintas concentraciones.

La figura 4.4 muestra que a bajas concentraciones (2% en peso), el comportamiento del sistema monodisperso es distinto al polidisperso. En dicho gráfico, a bajas velocidades la viscosidad relativa del sistema monodisperso es parecida al del polidisperso, pero conforme se incrementa la velocidad de corte, la viscosidad del sistema polidisperso es menor que el del monodisperso.

En la figura 4.5 se muestra el comportamiento de las dispersiones de partículas monodispersas y polidispersas para un sistema moderadamente concentrado (15% en peso). Las partículas monodispersas se comportan de manera similar al sistema de 2% en peso, ya que la viscosidad relativa de la suspensión monodispersa muy semejante a la de la polidispersa a bajas velocidades de corte, pero a altas existe una separación entre las magnitudes de viscosidad entre los dos tipos de sistemas. Este comportamiento es congruente al mencionado en la literatura, donde se dice que a mayor polidispersidad, menor viscosidad³.

Cuando la concentración de sólidos es moderada en un sistema monodisperso es probable la formación de un arreglo estructural que disipe mayor energía. Debido a que en el momento que las partículas se mueven hacia las líneas de flujo, existe una interacción partícula-partícula mayor, dando también una mayor resistencia al flujo.

En el caso del sistema monodisperso existen variaciones de la viscosidad relativa menores a 1 Pa, por lo que su comportamiento tiende a ser prácticamente newtoniano.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

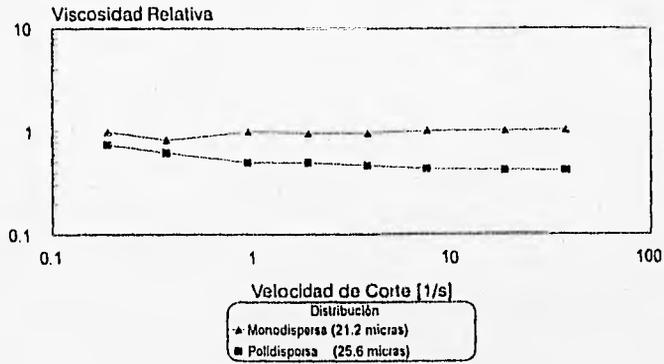


Figura 4.4 Comparación del efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad relativa de una suspensión monodispersa y una polidispersa sin la acción de un campo eléctrico, con una fracción en peso de 0.02.

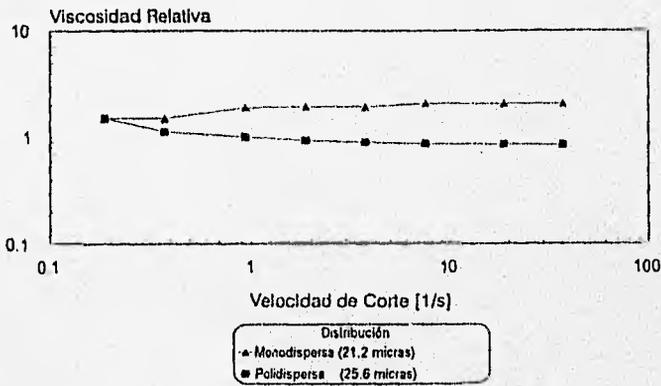


Figura 4.5 Comparación del efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad relativa de una suspensión monodispersa y una polidispersa sin la acción de un campo eléctrico, con una fracción en peso de 0.15.

Para altas velocidades de corte, se distingue un comportamiento claro de la suspensión monodispersa, con una viscosidad mayor que la polidispersa. Lo que sucede es que las partículas pequeñas se encuentran en el laberinto formado por las grandes, llevando a cabo la función de baleros en el flujo de la dispersión. En tanto más aumente el número de partículas pequeñas, tanto más disminuye la viscosidad⁴. Sin embargo, esta tendencia cambia en el momento en que la cantidad de sólidos pequeños comienza a gobernar, es decir que existe una mayoría de partículas pequeñas respecto de la totalidad de los sólidos, por tanto existe una concentración a la cual el cambio en la viscosidad relativa ante un aumento de la cantidad de sólidos pequeños es creciente (ver figura 2.8).

b) Esfuerzo de Cedencia

Los esfuerzos de cedencia no son apreciables, en ninguno de los dos tipos de dispersiones. A través de un análisis matemático se pueden establecer ajustes de tipo lineal (modelo de Bingham), para el caso de partículas monodispersas y para polidispersas. En la figura 4.6 se muestra a dicho esfuerzo contra la fracción en peso, comparando al sistema monodisperso con el polidisperso. Los esfuerzos del sistema monodisperso son muy parecidos a los del sistema polidisperso y ambos son de magnitud despreciable.

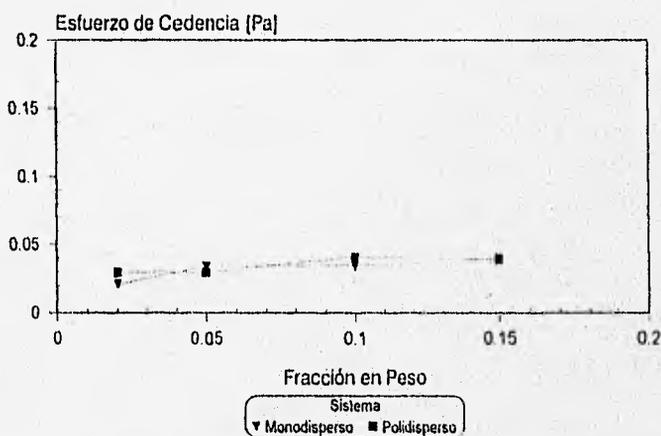


Figura 4.5 Curva del esfuerzo de cedencia contra la fracción en peso para una suspensión monodispersa y una polidispersa sin la acción de un campo eléctrico.

4.1.3. Efecto de la concentración de la fase sólida sobre el comportamiento en flujo observado

Los sólidos añadidos a un fluido, efectivamente producen un aumento en la viscosidad aparente de las dispersiones. Su concentración desempeña un papel muy importante sobre el comportamiento reológico. Se han realizado numerosos ensayos para clarificar el efecto que producen en suspensiones del 2, 5, 10, 15, 20 y 30 % en peso de las partículas de silica gel de 25.6 micras de tamaño promedio.

a) Viscosidad Relativa

Las viscosidades se determinaron como una función de la concentración de sólidos, haciendo uso de la ecuación 46 (mencionada en el capítulo III).

En la figura 4.7 se puede ver como disminuye la viscosidad de las suspensiones al incrementarse la velocidad de corte. Las partículas de la fase sólida se dirigen junto con el patrón de flujo determinado por la aplicación de un corte continuo, al principio tienen una mayor resistencia al flujo y después la interacción partícula-partícula disminuye, existiendo una tendencia a mantener un valor de viscosidad constante, en esta región la orientación debida al flujo es demasiado rápida, por lo que las partículas no pueden moverse lo suficientemente rápido como para interactuar entre ellas.

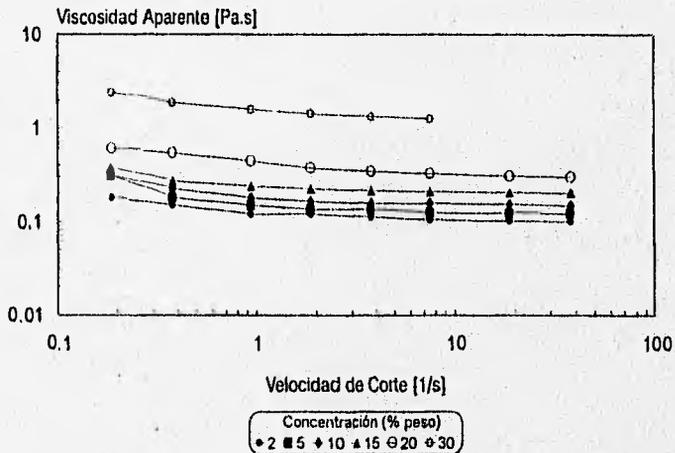


Figura 4.7 Efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto de la concentración de partículas sin la acción de un campo eléctrico.

Por otra parte, es claro como al aumentar la concentración de las partículas en dispersión, el comportamiento no-newtoniano se manifiesta con mayor intensidad. Asimismo la viscosidad

sufre un incremento al aumentar la concentración. En la figura 4.8 se puede ver este comportamiento para una velocidad de corte de 0.38 [1/s], realizando ajustes matemáticos a los datos obtenidos para modelar el comportamiento (tabla 4.2). Se ha encontrado que un ajuste polinomial de tercer orden representa mejor a los datos experimentales.

Tabla 4.2 Ajuste estadístico de series del efecto de la concentración de partículas sobre la viscosidad de las dispersiones preparadas.

Características	Ajuste exponencial $\eta_{rel} = K \cdot \exp(n \cdot \phi)$	Ajuste polinomial de tercer orden $\eta_{rel} = a + b \cdot \phi + c \cdot \phi^2 + d \cdot \phi^3$
Parámetros para una velocidad de corte de 0.38 [1/s]	<p>K = 0.5584</p> <p>n = 8.8279</p> <p>R² = 0.7683</p>	<p>a = 0.6061</p> <p>b = 14.5361</p> <p>c = -164.3438</p> <p>d = 749.9375</p> <p>R² = 0.9998</p>
Parámetros para una velocidad de corte de 7.54 [1/s]	<p>K = 0.2854</p> <p>n = 8.5837</p> <p>R² = 0.7573</p>	<p>a = 0.5119</p> <p>b = 30.2324</p> <p>c = -306.9531</p> <p>d = 1146.484</p> <p>R² = 0.9996</p>

En la figura 4.9 se puede ver el comportamiento de la viscosidad relativa de las dispersiones preparadas en función de la fracción en peso a distintas velocidades de corte, pudiéndose ver que a medida que se incrementa la velocidad de corte, la viscosidad aparente disminuye.

En el caso de sistemas concentrados, las partículas en la suspensión se encuentran empacadas aleatoriamente en cierto volumen, tal que a cierta concentración, la interacción entre las partículas se hace un factor importante y su resistencia al corte parece causar un incremento en la viscosidad, llegando a comportarse incluso como fluidos dilatantes.

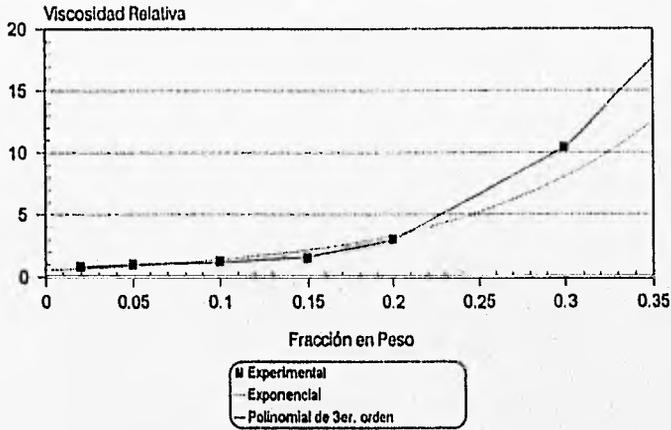


Figura 4.8 Efecto de la concentración de partículas sobre la viscosidad relativa de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto sin la acción de un campo eléctrico a una velocidad de corte de 0.38 [1/s] con curvas de regresión estadística.

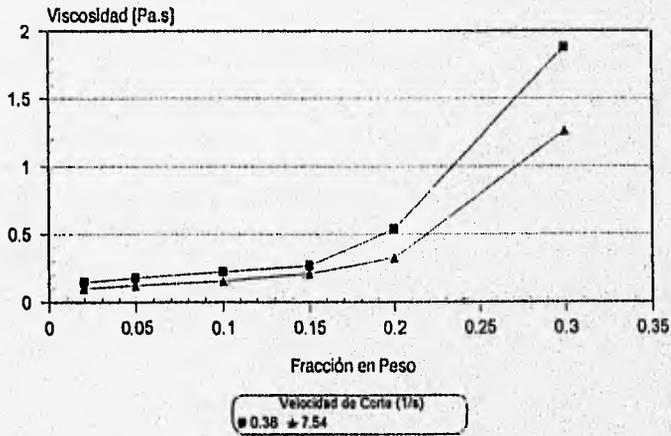


Figura 4.9 Efecto de la concentración de partículas sobre la viscosidad de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto sin la acción de un campo eléctrico.

Los presentes resultados dejan ver que es necesario realizar otro tipo de experimentaciones para poder encontrar una correlación empírica de viscosidad contra concentración.

b) Esfuerzo de Cedencia

El esfuerzo de cedencia según los resultados experimentales se obtiene ajustando éstos a un modelo lineal (anexo II) bajo la curva de esfuerzo cortante contra la velocidad de corte. En la figura 4.9 se muestra el comportamiento en flujo de las suspensiones preparadas con distintas concentraciones de partícula (2, 5, 10, 15, 20 y 30 % en peso), donde se puede apreciar la existencia de un esfuerzo de cedencia a altas concentraciones, mientras que a bajas éste es despreciable. El comportamiento en flujo se puede describir por el modelo de Bingham en el intervalo de velocidad de corte que se ha analizado, obteniendo altas coeficientes de correlación tal como se muestra en la tabla 4.3.

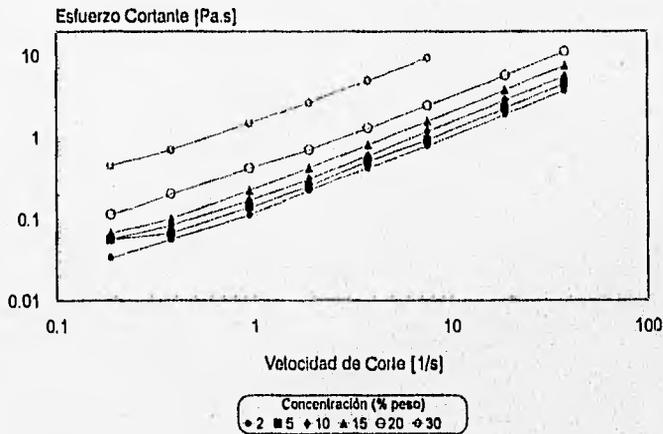


Figura 4.10 Efecto de la velocidad de corte sobre el esfuerzo cortante de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto de la concentración sin la acción de un campo eléctrico.

Estos resultados demuestran que a medida que se incrementa la concentración (la fracción en peso), la pendiente aumenta, el cual corresponde a un alejamiento del comportamiento newtoniano, asimismo la existencia de un punto de cedencia indica que entre más concentradas sean las dispersiones sólido-líquido preparadas, son más no newtonianas.

Es importante tener en cuenta que dicho modelo de ajuste es válido únicamente en este intervalo de velocidades de corte estudiado y para poder hacerlo general se requiere de un amplio estudio considerando un gran intervalo de velocidades de corte.

Tabla 4.3 Parámetros de ajuste al modelo de Bingham de los datos obtenidos para suspensiones preparadas para evaluar el efecto de la concentración.

Concentración [% en Peso]	Coefficiente de Correlación en el ajuste	Esfuerzo de cedencia τ_c [Pa]	Viscosidad Plástica η_p [Pa.s]
2	0.99995	0.0297	0.1003
5	0.99998	0.0296	0.1218
10	0.99991	0.0410	0.1487
15	0.99999	0.0395	0.2036
20	0.99990	0.1407	0.2976
30	0.99997	0.3025	1.2334

4.2. Comportamiento reológico de los fluidos electro-reológicos preparados en presencia de un campo eléctrico

La presencia de un campo eléctrico en una dispersión sólido-líquido ocasiona la polarización de las partículas de la fase sólida. Éstas se alinean en la dirección del campo formando columnas o fibrillas⁵. La estructura formada entre los electrodos mediante los cuales se aplica el campo ocasiona un aumento reversible considerable en las propiedades de flujo de la dispersión⁶. Este fenómeno tiene una fuerte dependencia de las características de las fases que lo integran, para el caso del presente estudio, se analizan los efectos provocados por las modificaciones en las características de la fase sólida. En seguida se denotan los resultados obtenidos en función de la magnitud de la respuesta electro-reológica (MRER) y el esfuerzo de cedencia (τ_c) de los fluidos estudiados. La magnitud de respuesta electro-reológica se puede definir como el cociente de la viscosidad aparente del fluido obtenida al aplicar un cierto campo eléctrico entre la viscosidad de la suspensión sin aplicar un campo eléctrico. El análisis de estos resultados se hace enfocado a la influencia que tiene el cambio de la estructura sobre las propiedades reológicas observadas⁷, ya que los cambios en las propiedades reológicas de los FER que ocurren durante su deformación, se deben a cambios en la estructura debido a la orientación, destrucción y reformación de las fibrillas formadas.

4.2.1. Efecto del tamaño de la fase sólida sobre el comportamiento en flujo observado

Una característica importante de la fase sólida que integra este tipo de fluidos es el tamaño de las partículas de su fase sólida. Hay que recordar que al aplicar un campo eléctrico⁸, la partícula modifica su doble capa debido a una polarización ejercida por la presencia de un campo eléctrico externo, con lo que se lleva a cabo inmediatamente un cambio substancial en la viscosidad.

Esto provoca una interacción entre partículas originada por su polarización dentro del campo, lo cual se relaciona directamente a condiciones de la superficie de las partículas y no al propio material que constituye la partícula⁹.

a) Magnitud de la Respuesta Electro-Reológica

El comportamiento en flujo observado en todas las suspensiones con distinto tamaño de partícula en el intervalo de velocidades de corte estudiado fue claramente de adelgazamiento viscoso (Shear thinning), tal como se muestra en la figura 4.11 y 4.12 en las cuales se grafica la viscosidad real de las suspensiones contra la velocidad de corte. La figura 4.11 muestra el comportamiento reológico a bajos campos eléctricos (0.25 kV/mm), puede verse que las viscosidades registradas más altas fueron las pertenecientes al mayor tamaño de partícula, también existe una tendencia para cualquier tamaño de mantener un valor de viscosidad único a altas velocidades de corte, esto es de alcanzar un régimen newtoniano. En la figura 4.12, se muestra el comportamiento aplicando altos campos eléctricos (1 kV/mm), al igual que en la figura anterior se ve que la viscosidad se incrementa al incrementar el tamaño de partícula. La estructura formada en las suspensiones es mucho más difícil de romper, ya que no existe una tendencia marcada de alcanzar un régimen newtoniano. Para romper dicha estructura y poder alcanzar un valor único de viscosidad es necesario aplicar mayores velocidades de corte.

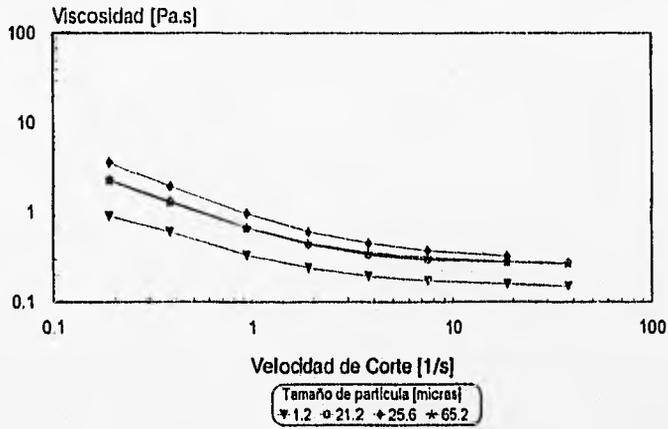


Figura 4.11 Gráfica del comportamiento en flujo de las diversas suspensiones preparadas para evaluar el efecto del tamaño de la partícula aplicando un campo eléctrico de 0.25 kV/mm.

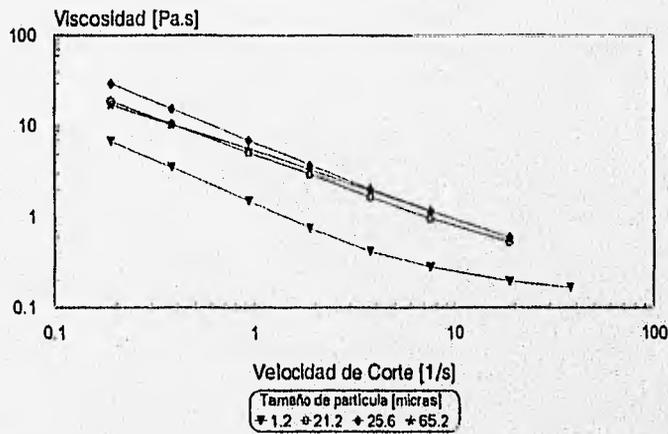


Figura 4.12 Gráfica del comportamiento en flujo de las diversas suspensiones preparadas para evaluar el efecto del tamaño de la partícula aplicando un campo eléctrico de 1.0 kV/mm.

Al relacionar la viscosidad obtenida al aplicar un campo eléctrico con la viscosidad en ausencia de éste se encuentra la MRER. En la figura 4.13 se puede ver la curva de magnitud de respuesta contra el tamaño de partícula. La magnitud aumenta al aumentar el campo eléctrico en otras palabras, la polarización inducida a las partículas es mayor en la medida que existe un campo externo de inducción de mayor fuerza.

En el caso (a) se muestra el efecto del tamaño de la partícula sobre la MRER a una velocidad de corte baja (0.19 1/s), la MRER aquí es alta debido a que las fuerzas de polarización dominan el comportamiento¹⁰ y esto es en general a cualquier campo eléctrico. Los FER's se encuentran altamente ordenados en cadenas, no existen muchos rompimientos de los mismos y su reformatión es casi inmediata.

La MRER en este caso tiende a incrementarse en los primeros tres tamaños de partícula, para después disminuir un poco en el tamaño mayor. Esta última observación es resultado de que la relación de densidades suspensión-partícula no es igual para todas las suspensiones. Dicho efecto parece no influenciarse por la presencia de un campo eléctrico pequeño e incrementarse ante un campo eléctrico considerable (1 kV/mm).

Cabe resaltar que a bajas velocidades de corte la MRER se ve influenciada apreciablemente por la magnitud del campo eléctrico aplicado, sobre todo para el tamaño de partícula más pequeño. Por el contrario a altas velocidades (caso b) esta influencia no es apreciable para el tamaño mencionado.

Por otra parte en el caso (b) se muestra el comportamiento a una velocidad de corte mayor (18.85 1/s), la magnitud de respuesta ha disminuido, lo cual indica que las fuerzas hidrodinámicas dominan el comportamiento a altas velocidades de corte. Esto puede entenderse de la forma en que lo hace Yu F. Deinega¹¹, quien dice que en un FER existen dos tipos de orientaciones, una hidrodinámica y otra eléctrica las cuales existen en todo momento y son función de la magnitud de las fuerzas que las producen. En este caso la orientación por el corte aplicado es la que tiene mayor peso, se ha roto la estructura.

La magnitud de la respuesta electro-reológica a altas velocidades de corte al igual que a bajas velocidades de corte no parece ser influenciada por el tamaño de partícula a bajos campos eléctricos. Sin embargo, bajo la aplicación de altos campos eléctricos (1 kV/mm) el efecto de la relación de densidades suspensión-partícula ya no es significativo y existe una tendencia a incrementar la MRER ante un incremento en el tamaño de partícula.

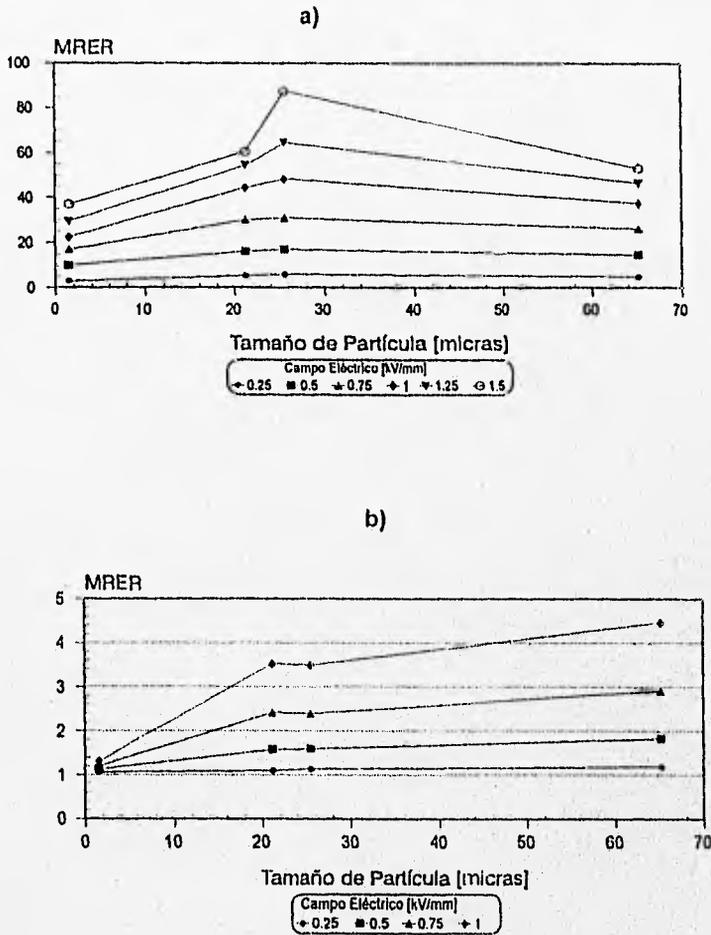


Figura 4.13 Efecto del tamaño de partícula sobre la magnitud de respuesta electro-reológica. a) Velocidad de corte= 0.19 [1/s]; b) Velocidad de corte= 18.85 [1/s].

b) Esfuerzo de Cedencia

El esfuerzo necesario para iniciar el flujo en los FER's se puede determinar por medio de un ajuste al modelo de Bingham, tal como varios autores lo han propuesto^{12, 13, 14, 15}. Sin embargo el ajuste estadístico muestra que este comportamiento es válido completamente para el tamaño más pequeño (1.5 micras), para el tamaño de 21.2 y el de 25.6, mientras que para el tamaño más grande (65.2 micras), existe una tendencia marcada a comportarse de forma potencial (ver tablas de resultados experimentales anexo II).

En la figura 4.14 se muestra el efecto del tamaño de la partícula sobre el esfuerzo de cedencia para las suspensiones. En ella se puede observar posiblemente un efecto de la relación de densidades suspensión-partícula sobre el esfuerzo necesario para fluir.

Al relacionar el esfuerzo de cedencia con el campo eléctrico se observa que ante un incremento en el campo eléctrico se obtiene un incremento en el esfuerzo de cedencia para cualquier tamaño de partícula (figura 4.15). El tamaño más pequeño lo hace casi linealmente, mientras que los demás lo hacen en forma potencial. En la tabla 4.4 se anotan los ajustes matemáticos al modelo potencial para el crecimiento del esfuerzo de cedencia contra campo eléctrico:

Tabla 4.4 Ajuste estadístico para el crecimiento del esfuerzo de cedencia con el campo eléctrico de las dispersiones preparadas con distintos tamaños de partícula (regresión lineal $\tau_c = K \cdot E^n$).

Tamaño de partícula	R ²	K	n
1.5	0.9995	1.1707	1.2626
21.2	0.9945	4.3298	1.7278
25.6	0.9944	5.9529	1.5891
65.2	0.9944	4.1735	1.8878

Al graficar el esfuerzo de cedencia contra el cuadrado del campo eléctrico, se observa una línea recta para cada curva; esta dependencia cuadrática, ha sido estudiada por varios autores^{16, 17} y han encontrado que todos los puntos se pueden colocar muy bien en una línea recta de pendiente 1.0 (función identidad), sin embargo esta pendiente se modifica al cambiar el tamaño de partícula, tal como se muestra en la figura 4.16 en la cual se observa dicha curva para los datos experimentales de las evaluaciones a suspensiones con distinto tamaño de partícula.

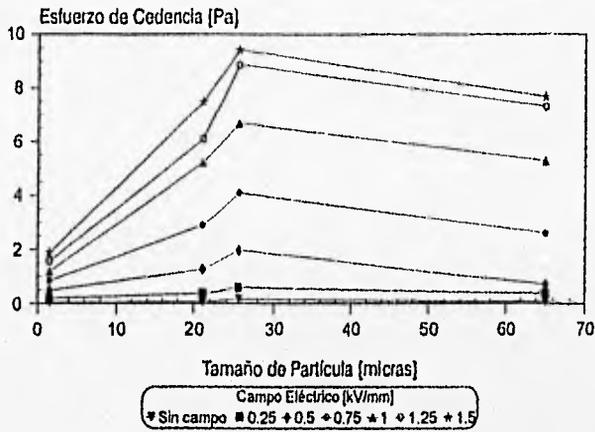


Figura 4.14 Efecto del tamaño de partícula sobre el esfuerzo de cedencia de las suspensiones preparadas.

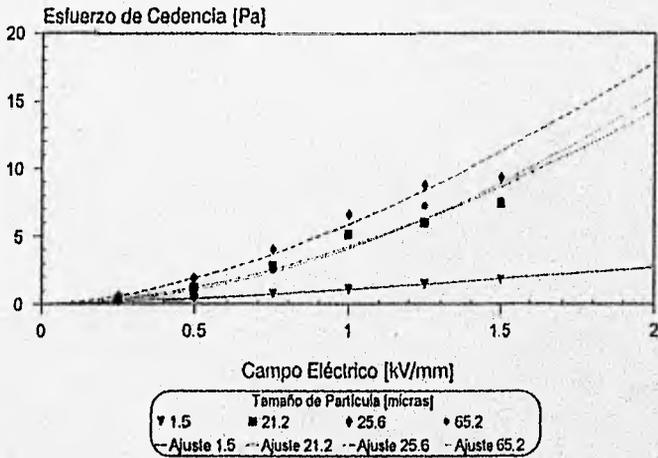


Figura 4.15 Efecto de la intensidad del campo eléctrico sobre el esfuerzo de cedencia de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto del tamaño de partícula.

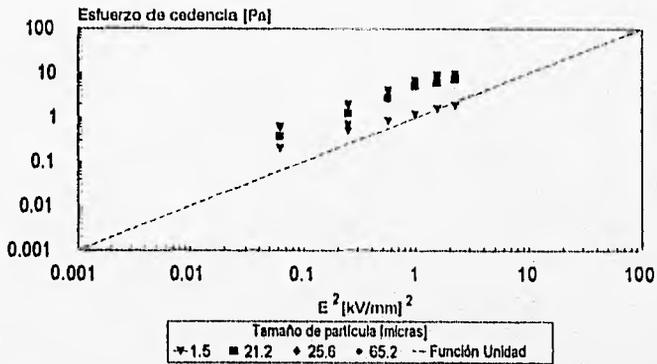


Figura 4.16 Curva del esfuerzo de cedencia contra el cuadrado del campo eléctrico para las suspensiones preparadas para evaluar el efecto del tamaño de partícula.

La dependencia lineal del esfuerzo de cedencia de las suspensiones con distintos tamaños de partícula respecto del cuadrado del campo eléctrico se puede verificar al graficar el esfuerzo de cedencia contra el cuadrado del campo eléctrico en una escala logarítmica (figura 4.16), las pendientes varían en un intervalo entre 0.63 y 0.94, a medida que crece la pendiente puede observar mejor el efecto de la cedencia.

4.2.2. Efecto de la distribución del tamaño de la fase sólida sobre el comportamiento en flujo observado

La distribución del tamaño de partícula es otra variable importante, es una característica de la fase sólida que indica que tanto influyen en la respuesta electro-reológica la presencia de una cantidad apreciable tanto de partículas muy grandes, como de muy pequeñas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para evaluar el efecto de la polidispersidad de la fase sólida en suspensiones bajo la aplicación de un campo eléctrico.

a) Magnitud de la Respuesta Electro-Reológica

En las figuras 4.17 y 4.18 se puede observar el efecto de la velocidad de corte sobre la magnitud de la respuesta electro-reológica comparando una suspensión monodispersa y una polidispersa a distintas concentraciones, aplicando un campo eléctrico bajo (0.25 kV/mm). En ambas figuras se puede ver que no existe dependencia alguna de la polidispersidad de las suspensiones sobre el comportamiento en flujo observado, lo que la hace independiente de la concentración a bajos campos eléctricos.

Por el contrario al aplicar una intensidad de campo eléctrico de 1.5 kV/mm las suspensiones electro-reológicas de 2 y 10 % en peso, figuras 4.18 y 4.19 respectivamente, es evidente la existencia del efecto de la polidispersidad sobre la magnitud de respuesta electro-reológica, ya que tanto a bajas como a altas concentraciones se puede apreciar una separación entre las suspensiones con partículas polidispersas a las suspensiones con partículas monodispersas. A una fracción en peso de 0.02 la diferencia no es muy grande, mientras que a una fracción de 0.1, esta ya es considerable. Esto demuestra que existe una tendencia del sistema polidisperso a estructurarse más a altas concentraciones y altos campos eléctricos. Dicha separación no es muy grande a altas velocidades de corte, por lo que el efecto de la polidispersidad no es apreciable cuando dominan las fuerzas hidrodinámicas, es decir, cuando las partículas se mueven de una forma tal que la dirección del campo eléctrico cambia tan rápido, que la polarizabilidad efectiva es pequeña y la magnitud de respuesta es menor¹⁸.

También se puede resaltar que al aplicar campos eléctricos bajos (0.25 kV/mm) la MRER tiende a conservar un valor único, lo cual indica una relación recíproca de las viscosidades registradas bajo la aplicación de un cierto campo a las registradas sin la aplicación de éste. A campos eléctricos altos (1.5 kV/mm) las suspensiones tienden a comportarse de una manera no newtoniana, haciendo disminuir la MRER al incrementar la velocidad de corte en todo el intervalo de velocidades de corte analizado.

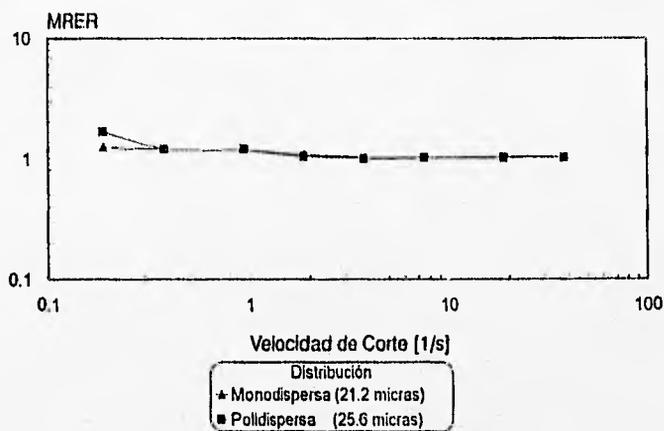


Figura 4.17 Comparación del efecto de la velocidad de corte sobre la magnitud de respuesta electroreológica de una suspensión monodispersa y una polidispersa, con una fracción en peso de 0.02 aplicando un campo eléctrico de 0.25 [kV/mm]

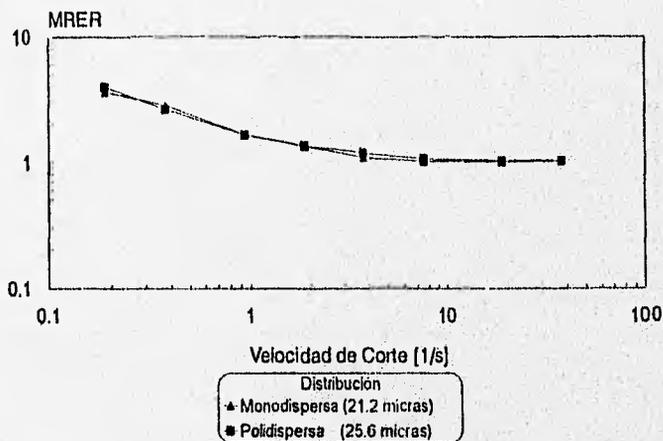


Figura 4.18 Comparación del efecto de la velocidad de corte sobre la magnitud de respuesta electroreológica de una suspensión monodispersa y una polidispersa, con una fracción en peso de 0.1 aplicando un campo eléctrico de 0.25 [kV/mm]

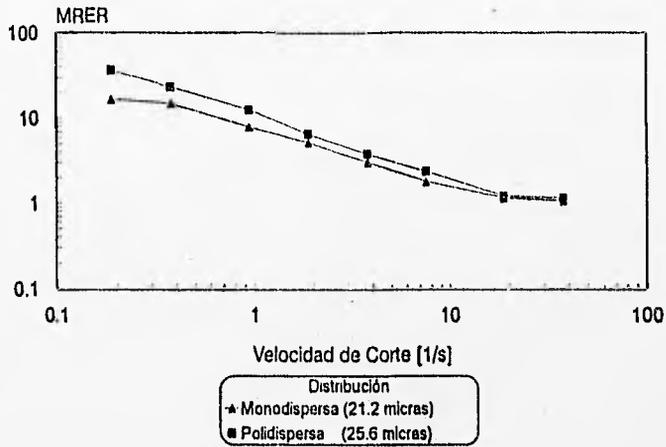


Figura 4.19 Comparación del efecto de la velocidad de corte sobre la magnitud de respuesta electroreológica de una suspensión monodispersa y una polidispersa, con una fracción en peso de 0.02 aplicando un campo eléctrico de 1.5 [kV/mm]

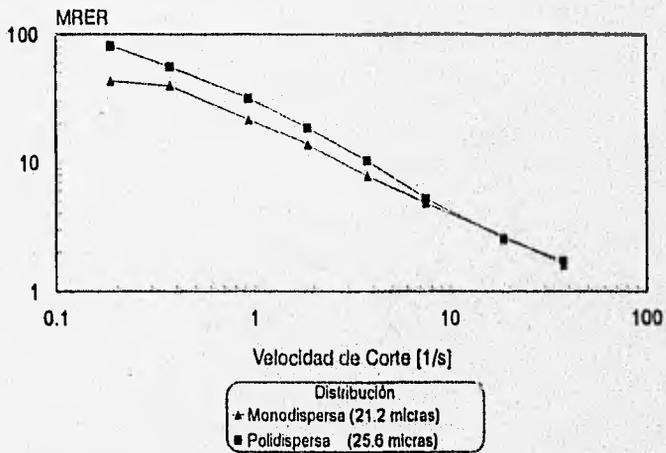
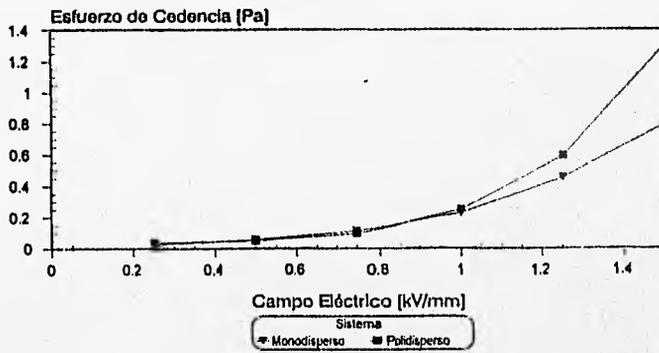


Figura 4.20 Comparación del efecto de la velocidad de corte sobre la magnitud de respuesta electroreológica de una suspensión monodispersa y una polidispersa, con una fracción en peso de 0.1 aplicando un campo eléctrico de 1.5 [kV/mm]

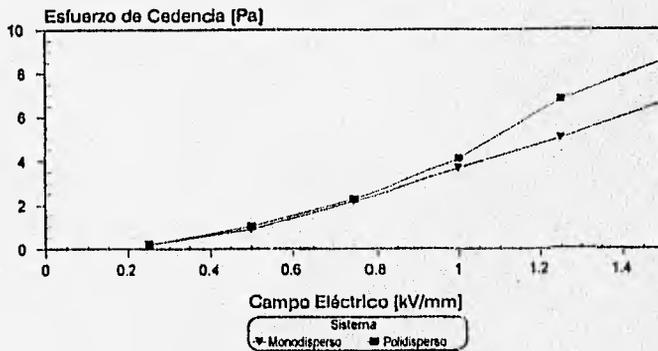
b) Esfuerzo de Cedencia

El esfuerzo de cedencia se calculó para varias concentraciones tanto para las partículas monodispersas como para las polidispersas, haciendo uso del modelo de Bingham (anexo II).

a)



b)



En la figura 4.21 se muestra el efecto de la intensidad del campo eléctrico aplicado sobre el esfuerzo de cedencia calculado de las suspensiones preparadas a distintas fracciones en peso. En dicha figura se puede apreciar una comparación entre el comportamiento de sistemas monodispersos y polidispersos. En el caso (a) se muestran dos suspensiones al 2% en peso, una monodispersa y otra polidispersa, el esfuerzo de cedencia crece en forma exponencial respecto del campo eléctrico para ambas suspensiones. A campos eléctricos pequeños, ambos sistemas poseen un comportamiento similar mientras que al aumentar la intensidad de campo eléctrico, el sistema polidisperso tiene un mayor esfuerzo de cedencia que el monodisperso, indicando que el sistema polidisperso tiende a estructurarse más que el polidisperso al aplicar altos campos eléctricos. Lo mismo sucede en el caso (b), donde la concentración es mayor (15% en peso) y por tanto los esfuerzos de cedencia son de mayor magnitud.

Al realizar la gráfica de esfuerzo de cedencia contra el cuadrado del campo eléctrico para todas las suspensiones analizadas en el efecto de la distribución del tamaño de partícula (figura 4.22), se hallaron tendencias de línea recta sobre una escala logarítmica, con pendientes en el intervalo de 0.79 a 1.55, los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea de pendiente igual a uno (función unidad).

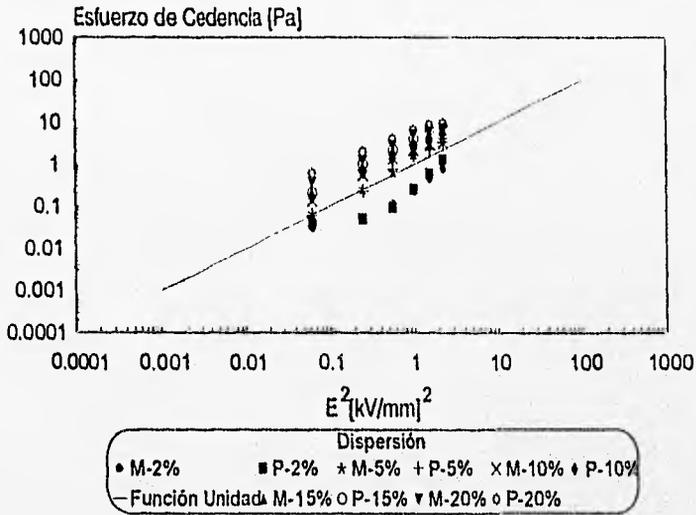


Figura 4.22 Curva del esfuerzo de cedencia contra el cuadrado del campo eléctrico para las suspensiones preparadas para evaluar el efecto de la distribución del tamaño de partícula (M= Monodisperso; P= Polidisperso) a distintas concentraciones.

4.2.3. Efecto de la concentración de la fase sólida sobre el comportamiento en flujo observado

Este efecto es muy importante respecto de todos los analizados, debido a que al aumentar la concentración, se aumenta el número de partículas que serán polarizadas se espera que la estructura que forman tenga mayor fuerza dando lugar a un cambio mayor en la viscosidad. A continuación se presentan los resultados obtenidos para las suspensiones preparadas a varias concentraciones: 2, 5, 10, 15, 20 y 30% en peso de las partículas de sílica gel de 25.6 micras de tamaño promedio.

a) Magnitud de la Respuesta Electro-Reológica

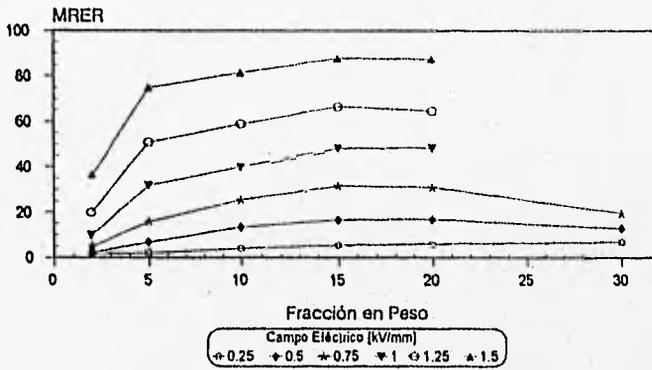
En un FER la magnitud de respuesta electro-reológica es función principalmente de la concentración de partículas y de la intensidad del campo eléctrico^{19, 20}. Al aplicar un campo eléctrico a un FER, las partículas polarizadas se alinean en la dirección del vector del campo eléctrico formando estructuras en forma de cadenas, las cuales son función de la concentración de partículas es decir, que a mayor concentración, mayor número de cadenas formadas²¹.

Este fenómeno se manifiesta en un incremento de la magnitud de respuesta, tal como se muestra en la figura 4.22. En el caso (a) se grafica la MRER contra la fracción en peso a una baja velocidad de corte (0.19 [1/s]), se puede ver que a medida que aumenta la concentración, la magnitud de respuesta también lo hace, debido a que el número de cadenas es mayor, es decir que entre más concentrado sea un sistema, éste puede estructurarse más y la magnitud de respuesta electro-reológica es dominada a bajas velocidades de corte por su estructura, donde a pesar del movimiento ejercido y la consecuente ruptura de cadenas, la reformación de éstas sucede inmediatamente, logrando conservar la red fibrilar. Sin embargo, a altas velocidades de corte, tal como se muestra en el caso (b), la magnitud de respuesta es pobre, lo cual indica que las fuerzas hidrodinámicas dominan a la magnitud de respuesta principalmente y obstaculizan el proceso de reformación estructural.

El comportamiento en flujo de las suspensiones a distintas concentraciones se muestra en la figura 4.23. En esta se puede ver la dependencia de la MRER sobre la velocidad de corte a dos campos eléctricos distintos. En el caso (a), el campo eléctrico es de 0.25 kV/mm y la MRER tiene valores pequeños, mientras que en el (b), el campo es grande (1.5 kV/mm) y la magnitud también lo es. Existe una tendencia en ambos casos de adelgazamiento viscoso, es decir que la magnitud de respuesta electro-reológica (viscosidad relativa) disminuye a medida que aumenta la velocidad de corte. Además, al aplicar campos eléctricos pequeños, la MRER posee una tendencia a mantener un valor fijo de MRER a altas velocidades de corte, dando origen a una reciprocidad entre la viscosidad registrada bajo un campo eléctrico y la registrada en ausencia de éste.

También se puede ver que bajo campos eléctricos pequeños, el efecto de la concentración es más pronunciado a bajas velocidades de corte. Esto quiere decir que existe una influencia de la fracción en peso sobre la magnitud de respuesta electro-reológica en estas condiciones, mientras que a campos eléctricos mayores, el efecto de la fracción en peso aparentemente no es tan grande, solamente en suspensiones muy diluidas se puede notar un cambio. Probablemente existe un error de medición dado que existe una tendencia a obtener el mismo valor de MRER a una cierta velocidad de corte, lo cual no es congruente con los resultados de la literatura.

a)



b)

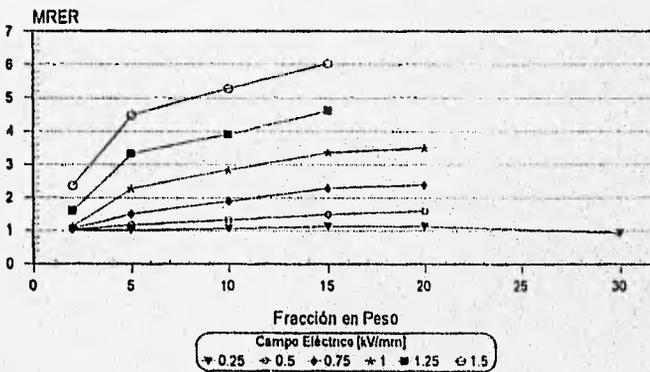


Figura 4.22 Efecto de la concentración de partículas sobre la magnitud de respuesta electro-reológica. a) Velocidad de corte= 0.19 [1/s]; b) Velocidad de corte= 18.85 [1/s].

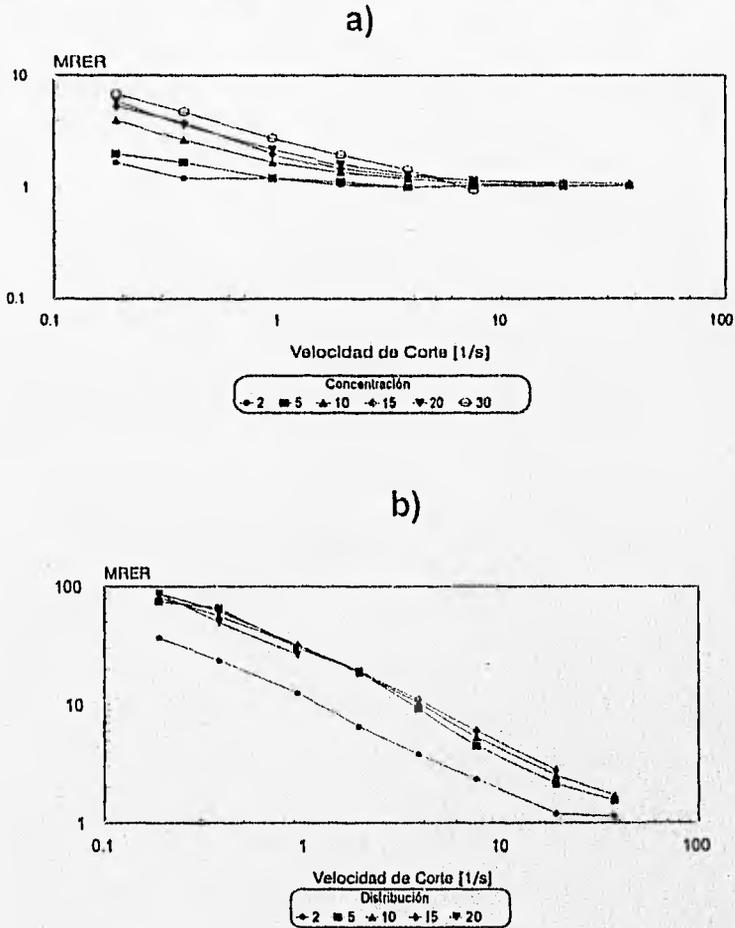


Figura 4.23 Efecto de la velocidad de corte sobre la magnitud de la respuesta electro-reológica de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto de la concentración de partículas: a) 0.25 kV/mm; b) 1.5 kV/mm

b) Esfuerzo de Cedencia

La determinación de los esfuerzos de cedencia de las suspensiones evaluadas se realizaron conforme al modelo de Bingham (anexo II). Es notable como la concentración influye en esta región de cedencia siempre en forma creciente. Por ejemplo ante un incremento en la concentración, se incrementa el esfuerzo de cedencia, tal como se muestra en la figura 4.24, donde puede verse también que al incrementar el campo para una misma fracción en peso, aumenta el valor del esfuerzo de cedencia y al incrementar la concentración, el esfuerzo también lo hace, tal como ocurre en algunos reportes en la literatura²², indicando que las partículas forman una estructura a través del espaciamiento entre platos en forma de cadenas, la atracción de cadenas adyacentes es responsable de la cedencia de los fluidos²³. Sin embargo, el número de cadenas no se ve afectado por el campo eléctrico, sino que se incrementa linealmente con la concentración²⁴, estas se rompen en el centro con la velocidad de corte y buscan reformarse con la cadena más cercana anclada en el electrodo opuesto. Por ello los incrementos son mucho mayores a altas concentraciones y altas intensidades de campo eléctrico.

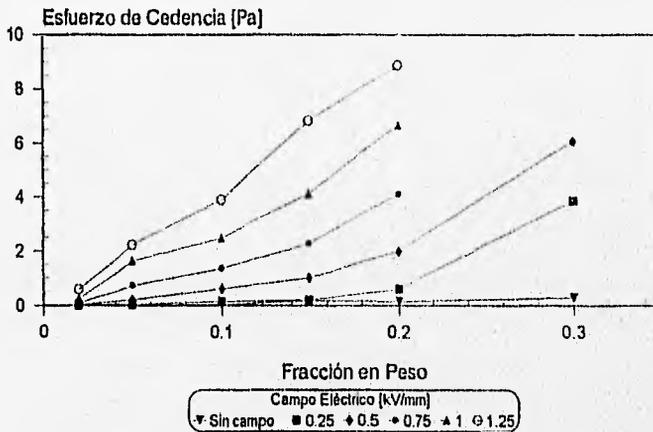


Figura 4.24 Efecto de la intensidad de campo eléctrico sobre el esfuerzo de cedencia de las suspensiones preparadas para evaluar el efecto de la concentración de partículas.

El punto de cedencia de las suspensiones preparadas a distintas concentraciones es proporcional a la fracción en volumen y al cuadrado del campo eléctrico, en la figura 4.25 se puede ver la linealidad de las suspensiones preparadas bajo la curva logarítmica de esfuerzo de cedencia contra velocidad de corte.

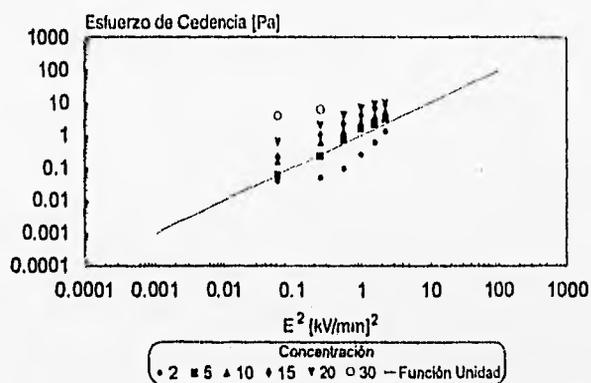


Figura 4.25 Curva del esfuerzo de cedencia contra el cuadrado del campo eléctrico para las suspensiones preparadas para evaluar el efecto de la concentración de partículas.

Nomenclatura

FER	Fluido Electro-Reológico.
η_{rel}	Viscosidad relativa (Viscosidad aparente/viscosidad aceite silicón)
K	Parámetro de ajuste al modelo exponencial.
n	Parámetro de ajuste al modelo exponencial.
a	Parámetro de ajuste al modelo polinomial de tercer orden.
b	Parámetro de ajuste al modelo polinomial de tercer orden.
c	Parámetro de ajuste al modelo polinomial de tercer orden.
d	Parámetro de ajuste al modelo polinomial de tercer orden.
R2	Coefficiente de correlación.
η_p	Viscosidad plástica del Modelo de Bingham.
τ_c	Esfuerzo de Cedencia del Modelo de Bingham.
MRER	Magnitud de Respuesta Electro-Reológica (Viscosidad aparente de la suspensión a un campo eléctrico E / Viscosidad sin campo eléctrico de la misma suspensión).
E	Intensidad del campo eléctrico.

Referencias Bibliográficas

1. Yuhua Yan, Rajinder Pal y Jacob Masliyah, "Rheology of Oil-in-Water Emulsions with Added Solids", en : Chemical Engineering Science Vol. 46 No. 4 (1991) pág. 989
2. S.C. Tsai, D. Botts y J. Plouff, "Effects of Particle Properties on the Rheology of Concentrated Non-Colloidal Suspensions", en : Journal of Rheology Vol. 36 No. 7 (octubre 1992) pág. 1303
3. J. S. Chong, E. B. Christiansen y A. D. Baer, "Rheology of Concentrated Suspensions", en : Journal of Applied Polymer Science Vol. 15 (1971) pág. 2017
4. J. S. Chong, E. B. Christiansen y A. D. Baer, "Rheology of Concentrated Suspensions", en : Journal of Applied Polymer Science Vol. 15 (1971) pág. 2017
5. Keith D. Weiss, J. D. Carlson, J. P. Coulter, "Material Aspects of Electrorheological Systems", en : Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 4 (enero 1993) pp. 13-14
6. Louise Marshall, C.F. Zukoski, J. W. Goodwin, " Effects of Electric Fields on the Rheology of non.aqueous Concentrated Suspensions" en: Journal of Chemical Society Faraday Trans. Vol. 85 No. 9 (1989) pp. 2785
7. Yu F. Deinega y V. Vinogradov, "Electric Fields in the Rheology of Disperse Systems", en: Rheological Acta, No. 23 (1984) pág. 636
8. Irvin M. Krieger, "Rheology of Monodisperse Latices", en: Advanc. Colloid Interface Science, No. 3 (1972) pág. 133
9. Yasufumi Otsubo, Masahiro sekine y Shingo Katayama, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions", en: Journal of Rheology, Vol. 36 No. 3 (abril 1992) pág. 479
10. Yasufumi Otsubo, Masahiro sekine y Shingo Katayama, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions", en: Journal of Rheology, Vol. 36 No. 3 (abril 1992) pág. 488
11. Yu F. Deinega y V. Vinogradov, "Electric Fields in the Rheology of Disperse Systems", en: Rheological Acta, No. 23 (1984) pág. 638
12. Louise Marshall, C.F. Zukoski, J. W. Goodwin, " Effects of Electric Fields on the Rheology of non.aqueous Concentrated Suspensions" en: Journal of Chemical Society Faraday Trans. Vol. 85 No. 9 (1989) pp. 2791

13. R. T. Bonnecaze y J. F. Brady, "Yield Stresses in Electrorheological Fluids", en: Journal of Rheology, Vol. 36 No. 1 (enero 1992) pág. 74
14. Keith D. Weiss, J. D. Carlson, J. P. Coulter, "Material Aspects of Electrorheological Systems", en : Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 4 (enero 1993) pág. 14
15. Yasufumi Otsubo, Masahiro sekine y Shingo Katayama, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions", en: Journal of Rheology, Vol. 36 No. 3 (abril 1992) pág. 483
16. Yasufumi Otsubo, Masahiro sekine y Shingo Katayama, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions", en: Journal of Rheology, Vol. 36 No. 3 (abril 1992) pág. 479
17. Louise Marshall, C.F. Zukoski, J. W. Goodwin, " Effects of Electric Fields on the Rheology of non.aqueous Concentrated Suspensions" en: Journal of Chemical Society Faraday Trans. Vol. 85 No. 9 (1989) pp. 2793
18. Keith D. Weiss, J. D. Carlson, J. P. Coulter, "Material Aspects of Electrorheological Systems", en : Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 4 (enero 1993) pág. 17
19. Paul M. Adriani y Alice P. Gast, "A microscopic model of electrorheology", en: Physics of Fluids, Vol. 31 No. 10 (octubre 1988) pág. 2758
20. Yasufumi Otsubo, Masahiro sekine y Shingo Katayama, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions", en: Journal of Rheology, Vol. 36 No. 3 (abril 1992) pág. 479
21. Yasufumi Otsubo, Masahiro sekine y Shingo Katayama, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions", en: Journal of Rheology, Vol. 36 No. 3 (abril 1992) pág. 479
22. Yasufumi Otsubo, Masahiro sekine y Shingo Katayama, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions", en: Journal of Rheology, Vol. 36 No. 3 (abril 1992) pág. 486
23. Yasufumi Otsubo, Masahiro sekine y Shingo Katayama, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions", en: Journal of Rheology, Vol. 36 No. 3 (abril 1992) pág. 480
24. Yasufumi Otsubo, Masahiro sekine y Shingo Katayama, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions", en: Journal of Rheology, Vol. 36 No. 3 (abril 1992) pág. 487

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se ha analizado el comportamiento en flujo de los fluidos electro-reológicos estudiados a través de mediciones de torque en un viscosímetro Brookfield RVT. La caracterización se realizó como función de algunas características de la fase sólida (tamaño, distribución del tamaño y concentración), evaluando las propiedades reológicas en ausencia y bajo la influencia de un campo eléctrico. Dicha experimentación acredita los objetivos propuestos e implica ciertas conclusiones importantes a partir de los resultados obtenidos, las cuales se citan a continuación:

Evaluaciones sin campo eléctrico

Todas las suspensiones evaluadas tuvieron un comportamiento de adelgazamiento viscoso y se pudieron describir con éxito por medio del modelo de Bingham. Los esfuerzos de cedencia fueron de magnitud despreciable, solo se manifestaron en suspensiones moderadamente concentradas.

Efecto del tamaño de la partícula

- Los resultados obtenidos de la influencia del tamaño de partícula en la viscosidad relativa indican que la ésta se incrementa, sin embargo, existe un máximo que se relaciona posiblemente a un efecto de la densidad de las partículas.

Efecto de la distribución del tamaño de la partícula

- El efecto se evaluó comparando dos suspensiones de tamaño promedio de partícula muy semejante, pero una monodispersa y otra polidispersa.
- Bajo concentraciones moderadas de partículas (2-15% en peso) un sistema monodisperso posee un arreglo estructural que disipa una mayor cantidad de energía a altas velocidades de corte, lo cual resulta en una mayor viscosidad de la suspensión monodispersa.

Efecto de la concentración de la fase sólida

- La viscosidad relativa se incrementó al aumentarse la fracción en peso de las suspensiones. Los datos obtenidos se ajustaron con éxito a un polinomio de tercer orden.
- A medida que se incrementa la concentración de las suspensiones se halló un comportamiento cada vez más no newtoniano, manifestándose en la aparición de un esfuerzo de cedencia a altas concentraciones.

Evaluaciones aplicando un campo eléctrico

Todos los FER's evaluados mostraron un comportamiento en flujo de adelgazamiento viscoso.

Efecto del tamaño de la partícula

- Todos los FER estudiados mostraron un comportamiento en flujo de adelgazamiento viscoso.
- Este efecto se manifiesta mejor a bajas velocidades de corte y altos campos eléctricos. Al incrementar el tamaño, se incrementa la viscosidad de los FER's.
- Existe una tendencia de acentuar el comportamiento no-newtoniano a medida que el campo eléctrico se incrementa, manifestándose en un incremento mayor en la viscosidad de los FER's.
- A bajas velocidades de corte y bajos campos eléctricos el efecto del tamaño de la partícula no parece tener una influencia apreciable, mientras que al incrementar el campo eléctrico aplicado a bajas velocidades de corte, existe un máximo en el incremento de la MRER debido probablemente a un efecto de la densidad de las partículas.
- A altas velocidades de corte la MRER se incrementa al aumentar el tamaño de partícula. Este efecto se intensifica al incrementar el campo eléctrico aplicado.
- Las suspensiones preparadas a concentraciones moderadas presentan un comportamiento en flujo descrito por el modelo de Ley de potencia a excepción de la preparada con la sílica de 1.5 micras.
- Los esfuerzos de cedencia de los FER evaluados posiblemente tuvieron un efecto de la densidad de las partículas.
- Existe una dependencia lineal del esfuerzo de cedencia τ_c respecto del cuadrado del campo eléctrico, las pendientes se encuentran en el intervalo comprendido entre 0.63 y 0.94.

Efecto de la distribución del tamaño de la partícula

- La influencia de éste efecto es despreciable a bajos campos eléctricos, independientemente de la concentración de la suspensión.

- Los FER's polidispersos parecen formar una estructura que disipa mayor energía que los monodispersos a bajas velocidades de corte y altos campos eléctricos, reflejándose en la necesidad de un mayor esfuerzo para iniciar el flujo (τ_c), principalmente a altos campos eléctricos.
- Existe una dependencia lineal del esfuerzo de cedencia respecto del cuadrado del campo eléctrico, las pendientes se encuentran en el intervalo comprendido entre 0.79 a 1.55

Efecto de la concentración de la fase sólida

- Los FER's evaluados el comportamiento en flujo de adelgazamiento viscoso.
- La MRER aumenta a medida que aumenta la concentración de partículas.
- El efecto de la concentración tiene mayor influencia a bajas velocidades de corte.
- El esfuerzo de cedencia de las suspensiones preparadas aumenta al incrementar la concentración de partículas y el campo eléctrico.

RECOMENDACIONES

Los resultados presentados en este trabajo pueden integrarse junto con otro tipo de experimentos para determinar la influencia de las características de la fase sólida de las suspensiones sílica gel-aceite silicón estudiadas sobre su comportamiento reológico. A continuación se exponen algunas recomendaciones para continuar el trabajo:

- ⇒ Realizar las presentes determinaciones sobre un intervalo de esfuerzos o velocidades de corte mucho más amplio para poder generalizar los resultados. Esto puede realizarse con un reómetro ya sea de esfuerzo o velocidad controlada.
- ⇒ Para un mejor entendimiento del comportamiento reológico de suspensiones concentradas es necesario considerar la fracción máxima de empaquetamiento "p", así como realizar un estudio de suspensiones mucho más concentradas para determinar el comportamiento de los parámetros reológicos estudiados (viscosidad relativa, MRER y esfuerzo de cedencia).
- ⇒ Realizar experimentos para determinar la influencia del tamaño de partícula en base a una misma concentración en volumen.
- ⇒ Determinar la influencia que tiene la forma de la partícula en el comportamiento reológico de FER's por medio de esferas de vidrio y arena sílica.
- ⇒ Determinar los parámetros reológicos estudiados para dispersiones que contengan estabilizadores para prevenir la sedimentación en el sistema aceite silicón- sílica gel, encontrando su influencia en el comportamiento en flujo de los FER's.

ANEXO I: CONCEPTOS REOLÓGICOS IMPORTANTES

Viscosidad

La viscosidad es una variable de comparación entre fluidos que mide la resistencia que estos presentan a fluir. Los fluidos presentan diversas formas de resistencia, el caso más sencillo es el flujo Newtoniano, en el cual se puede obtener un valor de esta para caracterizar a la muestra en análisis pudiendo ser comparada con el de otras. De este modelo se puede obtener la *viscosidad dinámica* η que se mide en [Pa.s], este parámetro de medición se utiliza para obtener valores correspondientes a cierta velocidad de corte.

Existe otra viscosidad que es la *viscosidad cinemática* (ν), esta proviene de las mediciones realizadas con viscosímetros de capilaridad. La fuerza de gravedad actúa como la fuerza que impulsa al líquido muestra a través del capilar. La densidad de la muestra es otro parámetro adicional, que relaciona a esta con la viscosidad dinámica:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \text{con } \nu = [\text{cSt}] \quad \dots (A1)$$

Viscosidad Aparente y Viscosidad Real

Debido a que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte en una curva de flujo, donde $\tan \alpha = \eta$

$$\tau = \tan \alpha \cdot \gamma = \eta \cdot \gamma \quad \dots (A2)$$

Cuando se realizan pruebas en fluidos no Newtonianos, se puede calcular para un cierto esfuerzo y velocidad de corte un cierto valor de viscosidad, pero debido a la relación no lineal que se observa en la curva de flujo, se tiene una serie infinita de valores de viscosidad.

De todos estos valores de viscosidad solo existe uno que corresponde a la viscosidad Newtoniana a una cierta velocidad de corte, tal valor es la llamada viscosidad aparente, define el comportamiento en flujo, mas no así la descripción de los cambios de viscosidad a bajas y altas velocidades de corte.

La viscosidad real es aquella que corresponde a una cierta pareja de velocidad y esfuerzo de corte, es la medición puntual de la viscosidad en una curva de flujo para un fluido con comportamiento no Newtoniano.

Líquidos Pseudoplásticos

Son aquellos que muestran un decremento en su viscosidad a medida que aumenta la velocidad de corte de bajo a altos niveles, es decir sufren un adelgazamiento viscoso. Un ejemplo de estos líquidos sería que entre más rápido se atomizan las pinturas de la pistola atomizadora o se apliquen sobre una superficie, mayor será el decremento en la viscosidad de estos materiales. A este grupo de fluidos pertenecen muchas sustancias, tales como suspensiones, emulsiones y algunos productos que parecen ser homogéneos aparentemente, se componen de varios ingredientes: partículas de forma irregular o gotas de un líquido son dispersas en otro líquido. Lo que sucede en este adelgazamiento es que las partículas se alinean en la dirección del flujo.

Líquidos Dilatantes

Dichos líquidos muestran un incremento en su viscosidad con un aumento en la velocidad de corte. Este comportamiento se halla en suspensiones concentradas en las cuales las partículas sólidas (sea una emulsión-PVC) se mezclan con otros líquidos, como puede ser un plastificante, para formar un "plastisol". Las partículas sólidas se encuentran densamente empacadas y si la cantidad de plastificante añadido es suficiente para llenar el espacio vacío que se encuentra entre ellas se podrá observar lo siguiente: a bajas velocidades, el plastificante lubricará totalmente la superficie de las partículas, presentándose una baja resistencia al flujo, pero a altas velocidades las partículas se apelmazarán unas con otras incrementando su volumen dentro del plastisol, con lo que el volumen de plastificante se ve disminuido respecto al volumen total del plastisol siéndole imposible llenar los espacios vacíos entre las partículas sólidas y mantener lubricadas por completo a sus superficies lo que provoca un aumento en la viscosidad del plastisol.

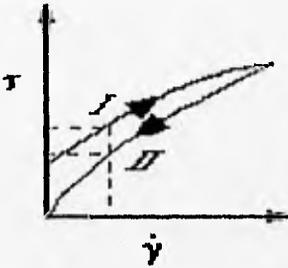
Plasticidad

Este concepto describe líquidos pseudoplásticos que poseen un punto de cedencia. Existen muchas dispersiones que en reposo pueden formar una red estructural intermolecular/interparticular de fuerzas de atracción (Van Der Waals y de la doble capa eléctrica) las cuales restringen el cambio de posición de elementos de volumen y dan a la sustancia un carácter de sólido con una viscosidad infinita. Si se aplica una fuerza a esta dispersión y esta es de magnitud menor a la de las fuerzas de la red estructural, existirá una deformación elástica del sólido, mientras que una de magnitud mayor (sobrepasa el esfuerzo cortante llamado punto de cedencia) colapsará la red estructural, con lo que dejará de comportarse como sólido para comportarse como líquido de una cierta viscosidad (viscosidad plástica). En esta región la red estructural ha desaparecido y el comportamiento en flujo se encuentra gobernada por las fuerzas viscosas.

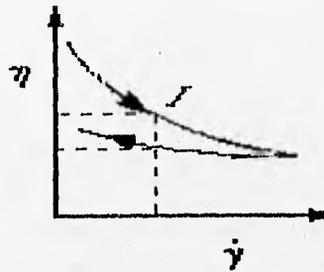
Tixotropía

Algunas dispersiones sólido-líquido que pueden orientar sus partículas con el tiempo debido a las interacciones partícula/molécula. Estas crean enlaces que forman una red de estructura tridimensional llamada "gel". Dichos enlaces pueden ser puentes de hidrógeno o enlaces iónicos, siendo más débiles que las fuerzas entre partículas. Esto hace que puedan romperse fácilmente al someter la dispersión a un corte continuo durante un largo periodo de tiempo. Al deshacer la red, la viscosidad disminuye, al dejar reposar por un tiempo a la dispersión, esta puede formar nuevamente la estructura de gel (figura a-1). En la figura a-1, la curva de flujo muestra una histeresis formada entre la curva ascendente (curva I) y la descendente (curva II), estas envuelven un área de tixotropía de magnitud A. Dicha área tiene dimensiones de energía en relación al volumen de la muestra, la cual indica la energía necesaria para romper la estructura tixotrópica.

Curva de Flujo



Curva de viscosidad



Curva de viscosidad-tiempo



Figura A.1 Diferentes curvas que representan el comportamiento de un material tixotrópico.

Reopectividad

Los líquidos que poseen esta propiedad se caracterizan por incrementar su viscosidad ante un incremento en la velocidad de corte. Al dejarlos reposar recobran su viscosidad original. Esta es una propiedad opuesta a la tixotropía, también se puede analizar en forma gráfica a través de una curva de flujo, solo que aquí la curva descendente estará por encima a la curva ascendente.

Viscoelasticidad

Solo unas cuantas suspensiones sólido-líquido importantes tecnológica y prácticamente, se acercan al comportamiento ideal de sólidos o líquidos, la mayoría muestra un comportamiento reológico que los clasifica en una región entre los líquidos y los sólidos por las características que presentan, a estos se les conoce como materiales viscoelásticos.

Al considerar el tiempo en el proceso de deformación se puede determinar un factor λ , que es un tiempo característico del material, tiene un valor infinito para sólidos elásticos ideales y casi cero para líquidos tales como el agua ($\lambda=1 \times 10^{-12}$). Por otro lado existe otro factor relacionado con los procesos de deformación llamado tiempo característico "t" (tiempo característico del fenómeno que se observa). Relacionando adimensionalmente los factores del tiempo en un proceso de deformación se puede obtener un número adimensional, el número de Deborah (λ/t). Si tal número es mayor que 1, determina un comportamiento de sólido elástico que sigue la ley de Hooke; si es menor que 1, un comportamiento de líquido viscoso que sigue la ley de Newton y si es igual a 1 se refiere entonces de un comportamiento viscoelástico.

Por ejemplo, si a través de una boquilla pasa agua a una alta velocidad y las gotitas golpean contra una pared dura, estas se aplanarán en el momento del impacto, recuperando inmediatamente su forma esférica. En este proceso de deformación extremadamente rápido, "t" es pequeño, lo cual hace que el número de Deborah sea alto, y aún siendo agua, con sus bajos valores de λ la reacción es elástica. Otro ejemplo puede ser el de los famosos vitrales de la Catedral de Chartres en Francia, los cuales han fluido desde que fueron fabricados hace 600 años. Estos vidrios tenían un espesor uniforme en todos sus extremos en la época medioeval, pero hoy las moléculas del vidrio han fluido debido a la fuerza de la gravedad, de manera que el espesor en la parte superior es semejante al de una hoja de papel, mientras que en la parte inferior tiene poco más del doble del espesor original. El tiempo "t" es muy grande para estos procesos de flujo, lo cual resulta en un número de Deborah pequeño. Por tanto uno puede decir que el vidrio es un sólido en base a lo comentado, pero pertenece a los fluidos... ¡Si se espera lo suficiente!

Con esto se puede decir que un material puede reaccionar en forma viscosa o elástica al someterlo a un esfuerzo determinado.

En un fluido viscoelástico (mezclas o soluciones en disolventes de líquidos poliméricos) existen cadenas moleculares largas, las cuales se doblan sobre sí mismas y sobre otras moléculas. Estas moléculas mantienen un estado de energía mínimo al estar en reposo. Al aplicar una deformación, las moléculas se compactarán, o al menos segmentos de dicha molécula, en la dirección de la fuerza aplicada. Este compactamiento, eleva el estado de energía de las moléculas. Al remover el esfuerzo aplicado, las moléculas intentarán relajarse y retornar al estado inicial

mínimo de energía. En la literatura existen muchos modelos moleculares para explicar la viscoelasticidad lineal o no lineal, Maxwell, Kelvin, Rouse-Zim, Voigt etc., en los cuales se combinan los componentes elásticos y viscosos, formando distintos arreglos que modelan la absorción temporal y el almacenamiento de la energía de deformación.

Esfuerzo de Cedencia

Tal como sucede con el vidrio, (los cristales de la catedral de Chartres) que puede fluir después de un largo tiempo, la idea del esfuerzo de cedencia o punto de cedencia se refiere a la existencia de un esfuerzo límite, debajo del cual un fluido se comporta como un sólido (el esfuerzo deforma al fluido elásticamente) y al remover el esfuerzo, la deformación desaparecerá totalmente. Debajo de este punto, existe una proporción lineal entre el esfuerzo aplicado y la deformación. Los elementos de volumen que constituyen a un fluido no cambian de lugar irreversiblemente.

Por encima de este punto, el material comienza de hecho a fluir, el esfuerzo aplicado lleva a una deformación irreversible y éste se relaciona a la velocidad de deformación a través de la viscosidad como factor de correlación.

Por ejemplo, al untar pasta de dientes en un cepillo dental, uno espera que permanezca en su forma cilíndrica hasta antes de comenzar a cepillar los dientes; que la pintura aplicada sobre una pared no se deslice hasta que seque completamente etc. Algunos materiales permiten la formación de enlaces intermoleculares y/o interfaciales en dispersiones que provocan redes estructurales temporales que resisten a fuerzas de corte por debajo de un nivel de esfuerzo crítico. Este esfuerzo puede medirse y es común llamarlo "valor de cedencia".

ANEXO II: DATOS EXPERIMENTALES

Dispersión: Silica gel (1.5 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0567	0.1702 •	0.5675 •	0.9648 •	1.2769 •	1.6742 •	2.0998 •
0.3769	0.0851	0.2270	0.6526	1.0215	1.3337	1.7252	2.0430
0.9425	0.1702	0.3121	0.7094	1.0782	1.4188	1.7139	2.1282
1.8849	0.3121	0.4540	0.6810	0.9931	1.4188	1.7877	2.2133
3.7699	0.5936	0.7378	0.9364	1.2202	1.589	2.0147	2.3268
7.5378	1.1611	1.3053	1.4755	1.7309	2.1282	2.5254	2.5538
18.8475	2.8092	3.0078	3.1781	3.3767	3.6888	4.0577	4.5968
37.6991	5.4481	5.6751	5.7884	6.0440	6.3278	6.6399	7.1223
Regresión Lineal							
τ_c	0.0466	0.1990	0.4924	0.8405	1.1855	1.5650	1.8758
η_{pl}	0.1440	0.1393	0.1404	0.1312	0.1352	0.1338	0.1387
R^2	0.9998	0.9998	0.9983	0.9966	0.9980	0.9989	0.9915

• Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.3011	0.9029	3.0106	5.1183	6.7740	8.8817	11.1395
0.3769	0.2259	0.6023	1.7315	2.7103	3.5386	4.5773	5.4205
0.9425	0.1806	0.3311	0.7527	1.1440	1.5053	1.8185	2.2580
1.8849	0.1656	0.2409	0.3613	0.5267	0.7527	0.9484	1.1742
3.7699	0.1575	0.1957	0.2484	0.3237	0.4215	0.5344	0.6172
7.5378	0.1540	0.1732	0.1957	0.2296	0.2823	0.3350	0.3388
18.8475	0.1490	0.1596	0.1686	0.1792	0.1957	0.2153	0.2439
37.6991	0.1445	0.1505	0.1535	0.1603	0.1678	0.1761	0.1889

Dispersión: Sílica gel (1.5 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.2500	2.9990	9.9998	17.0001	22.5	29.5008	37.0002
0.3769	1.2500	2.6666	7.6662	11.9997	15.6672	20.2662	23.9994
0.9425	1.4996	1.8337	4.1680	6.3349	8.3361	10.0699	12.5041
1.8849	1.5277	1.4547	2.1820	3.1820	4.5460	5.7280	7.0916
3.7699	1.4943	1.2429	1.5775	2.0556	2.6769	3.3940	3.9198
7.5378	1.5738	1.1242	1.2708	1.4907	1.8329	2.1750	2.1995
18.8475	1.5469	1.0707	1.1313	1.2020	1.3131	1.4444	1.6363
37.6991	1.5238	1.0416	1.0625	1.1094	1.1615	1.2188	1.3073

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Sílica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0794	0.4313 •	1.2769 •	2.4063 •	3.5470 •	4.3415 •	4.8239 •
0.3769	0.1419	0.4991	1.3620 •	2.6106 •	3.9726 •	5.1076 •	5.7886 •
0.9425	0.2838	0.6243	1.5890	3.0078 •	4.8239 •	6.3562 •	7.4912 •
1.8849	0.5391	0.8229	1.8160	3.4335	5.5616	6.9804	9.1653
3.7699	1.0442	1.2769	2.2700	3.9442	6.2426	8.0019	10.8395
7.5378	2.0430	2.2417	3.2348	4.9374	7.2074	9.4207	
18.8475	4.9941	5.2779	6.1575	8.0871	9.9587		
37.6991	9.8974	10.2720	11.1800				
Regresión Lineal							
τ_c	0.0481	0.3711	1.2799	2.9007	5.2076	6.0795	7.4913
η_{pl}	0.2616	0.2539	0.2618	0.2746	0.2541	0.4557	0.8881
R^2	0.9999	0.9997	0.9999	0.9999	0.9973	0.9859	0.9999

- Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.4215	2.2881	6.7740	12.7653	18.8168	23.0317	25.5908
0.3769	0.3764	1.3250	3.6138	6.9264	10.5402	13.5517	15.3586
0.9425	0.3010	0.6223	1.6860	3.1913	5.1182	6.7439	7.9482
1.8849	0.2860	0.4366	0.9635	1.8216	2.9506	3.7033	4.8625
3.7699	0.2770	0.3387	0.6021	1.0462	1.6559	2.1226	2.8753
7.5378	0.2710	0.2974	0.4291	0.6550	0.9562	1.2498	
18.8475	0.2650	0.2800	0.3267	0.4291	0.5284		
37.6991	0.2625	0.2725	0.2966				

Dispersión: Sílica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.7500	5.4286	16.0714	30.2857	44.6429	54.6429	60.7143
0.3769	2.0834	3.5200	9.5999	18.4000	28.0000	35.9999	40.7999
0.9425	2.5000	2.2000	5.6000	10.6000	17.0000	22.4000	26.4000
1.8849	2.6389	1.5263	3.3684	6.3684	10.3158	12.9474	17.0000
3.7699	2.6286	1.2228	2.1739	3.7772	5.9808	7.6630	10.3804
7.5378	2.7693	1.0972	1.5833	2.4167	3.5278	4.6111	
18.8475	2.7500	1.0568	1.2329	1.6193	1.9943		
37.6991	2.7683	1.0378	1.1296				

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Silica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.1135	0.6810	1.9181 •	3.5185 •	5.5047 •	7.3491 •	9.9312 •
0.3769	0.2043	0.7377	1.9579 •	3.7171 •	5.8452 •	7.7180 •	10.1015
0.9425	0.4199	0.9080	2.2700	4.1711 •	6.5262 •	8.56925	11.1230
1.8849	0.7094	1.1350	2.5254	4.5967	7.0370	9.3637	
3.7699	1.3052	1.7025	2.9510	5.0791	7.6612	10.3285	
7.5378	2.4686	2.8091	3.9441	5.9020	8.6260		
18.8475	5.7885	6.1290	7.0086	8.7962	11.2592		
37.6991	11.3216						
Regresión Lineal							
τ_c	0.1600	0.6142	1.9911	4.1115	6.6864	8.0869	9.4208
η_{pl}	0.2969	0.2922	0.2651	0.2474	0.2446	0.6064	1.8060
R^2	0.9999	0.9999	0.9996	0.9993	0.9975	0.9909	0.9999

• Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.6021	3.6127	10.1759	18.6638	29.2029	38.9874	52.6857
0.3769	0.5420	1.9574	5.1947	9.8624	15.5088	20.4776	26.8015
0.9425	0.4456	0.9634	2.4085	4.4256	6.9244	9.0920	11.8016
1.8849	0.3763	0.6021	1.3398	2.4387	3.7333	4.9677	
3.7699	0.3462	0.4516	0.7828	1.3473	2.0322	2.7397	
7.5378	0.3275	0.3727	0.5232	0.7830	1.1444		
18.8475	0.3071	0.3252	0.3719	0.4667	0.5974		
37.6991	0.3003						

Dispersión: Sílica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	2.5000	6.0000	16.9000	31.0000	48.5000	64.7500	87.5000
0.3769	3.0000	3.6111	9.5833	18.1944	28.6111	37.7778	49.4444
0.9425	3.7000	2.1622	5.4054	9.9324	15.5405	20.4054	26.4865
1.8849	3.4722	1.6000	3.5600	6.4800	9.9200	13.2000	
3.7699	3.2857	1.3043	2.2609	3.8913	5.8696	7.9130	
7.5378	3.3462	1.1379	1.5977	2.3908	3.4942		
18.8475	3.1875	1.0588	1.2108	1.5196	1.9451		
37.6991	3.1667						

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Sílica gel (65.2 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0851	0.4256	1.2485 •	2.2417 •	3.2064 •	3.9726 •	4.5401 •
0.3769	0.1362	0.4824	1.3904 •	2.5822 •	3.8875 •	4.8239 •	5.2211
0.9425	0.2837	0.6243	1.7025 •	3.3483 •	5.3062 •	7.0939	7.2642
1.8849	0.5108	0.8513	2.0714	3.8874	6.2426	9.1370	9.9315
3.7699	0.9931	1.3336	2.6389	4.5685	7.3209	11.0665	
7.5378	1.9863	2.3552	3.6321	5.7886	8.8816		
18.8475	4.8806	5.2778	6.4697	8.7397			
37.6991	9.5342	10.1585	11.0949				
Regresión Lineal							
τ_c	0.0524	0.3765	1.6864	3.1289	4.8759	4.4652	4.0474
η_{pl}	0.2525	0.2569	0.2506	0.2082	0.7068	1.9240	3.1736
R^2	0.9998	0.9999	0.9997	0.7779	0.8747	0.9123	0.9959
Regresión Potencial							
τ_c				2.5928	5.2830	7.3045	7.6785
n				0.4106	0.2544	0.3208	0.3427
R^2				0.9974	0.9984	0.9968	0.9792

• Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.4516	2.2580	6.6235	11.8922	17.0104	21.0748	24.0855
0.3769	0.3614	1.2798	3.6890	6.8511	10.3143	12.7988	13.8528
0.9425	0.3011	0.6623	1.8064	3.5526	5.6300	7.5267	7.7073
1.8849	0.2710	0.4516	1.0990	2.0624	3.3119	7.5267	5.2690
3.7699	0.2634	0.3538	0.7000	1.2118	1.9419	4.8475	
7.5378	0.2635	0.3124	0.4818	0.7679	1.1783	2.9355	
18.8475	0.2589	0.2800	0.3433	0.4637			
37.6991	0.2529	0.2695	0.2943				

Dispersión: Sílica gel (65.2 micras)-aceite silicón 1000, 20% en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.8750	5.0000	14.6666	26.3333	37.6667	46.6667	53.3334
0.3769	2.0000	3.5417	10.2083	18.9583	28.5417	35.4167	38.3333
0.9425	2.5000	2.2000	6.0000	11.8000	18.7000	25	25.6000
1.8849	2.5000	1.6666	4.0555	7.61111	12.2222	17.8889	19.4444
3.7699	2.5000	1.3429	2.6571	4.5999	7.3714	11.1429	
7.5378	2.6924	1.1857	1.8286	2.9143	4.4714		
18.8475	2.6876	1.0814	1.3256	1.7907			
37.6991	2.6667	1.0655	1.1637				

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Silica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 2 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0454	0.0567	0.0908	0.1702	0.2837	0.4767	0.7604
0.3769	0.0567	0.0681	0.1135	0.1929	0.3291	0.5561	0.8512
0.9425	0.1135	0.1362	0.1702	0.2156	0.3518	0.5959	0.8966
1.8849	0.1986	0.2156	0.2270	0.2837	0.4199	0.6810	1.0215
3.7699	0.3859	0.3972	0.4086	0.4540	0.5675	0.7945	1.1634
7.5378	0.7661	0.7945	0.7945	0.8172	0.8626	1.0499	1.3620
18.8475	1.8727	1.9578	1.9579	1.9579	1.9862	2.0430	2.1565
37.6991	3.7171	3.8590	3.8590	3.8590	3.8590	3.9157	3.9441
Regresión Lineal							
τ_c	0.0208	0.0303	0.0553	0.1140	0.2360	0.4556	0.7956
η_{pl}	0.0981	0.1017	0.1008	0.0988	0.0950	0.8990	0.0813
R^2	0.9999	0.9999	0.9998	0.9994	0.9985	0.9967	0.9937

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.2408	0.3011	0.4817	0.9032	1.5053	2.5289	4.0342
0.3769	0.1506	0.1807	0.3011	0.5119	0.8733	1.4756	2.2586
0.9425	0.1204	0.1445	0.1806	0.2288	0.3733	0.6322	0.9513
1.8849	0.1054	0.1144	0.1204	0.1505	0.2228	0.3613	0.5419
3.7699	0.1024	0.1054	0.1084	0.1204	0.1505	0.2107	0.3086
7.5378	0.1016	0.1054	0.1054	0.1084	0.1144	0.1393	0.1807
18.8475	0.0994	0.1039	0.1039	0.1039	0.1054	0.1084	0.1144
37.6991	0.0986	0.1024	0.1024	0.1024	0.1024		

Dispersión: Sílica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 2 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.0000	1.2500	2.0000	3.7500	6.2500	10.5000	16.7500
0.3769	0.8333	1.2000	2.0000	3.4000	5.8000	9.8000	15.0000
0.9425	1.0000	1.2000	1.5000	1.9000	3.1000	5.2500	7.9000
1.8849	0.9722	1.0857	1.1429	1.4286	2.1143	3.4286	5.1429
3.7699	0.9714	1.0294	1.0588	1.1765	1.4706	2.0588	3.0147
7.5378	1.0384	1.0370	1.0370	1.0667	1.1259	1.3704	1.7778
18.8475	1.0312	1.0454	1.0454	0.0454	1.0606	1.0909	1.1515
37.6991	1.0397	1.0382	1.0382	1.0382	1.0382		

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Sílica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 5 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0567	0.1248	0.3689 •	0.6810 •	1.2598 •	1.9862 •	3.2347 •
0.3769	0.0681	0.1419	0.3972	0.7661 •	1.4755 •	2.0997 •	3.6320 •
0.9425	0.1419	0.1702	0.4313	0.8512	1.6741 •	2.6105 •	4.1995 •
1.8849	0.2497	0.2724	0.5107	0.9364	1.9295	2.9510 •	4.9940
3.7699	0.4540	0.4880	0.5959	1.1066	2.1565	3.3199	5.2210
7.5378	0.9080	0.9193	0.9647	1.2769	2.3835	3.8022	5.5047
18.8475	2.2132	0.2416	2.3267	2.4402	3.3482	4.6648	6.5830
37.6991	4.3414	4.4832	4.5400	4.6819	4.9372	6.157	7.6045
Regresión Lineal							
τ_c	0.0340	0.0663	0.2560	0.6592	1.7891	3.1020	4.9162
η_{pl}	0.1145	0.1167	0.1122	0.1038	0.0833	0.816	0.0731
R^2	0.9999	0.9997	0.9967	0.9920	0.9993	0.9960	0.9825

- Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.3011	0.6623	1.9569	3.6127	6.6835	10.5371	17.1605
0.3769	0.1807	0.3764	1.5399	2.0327	3.9148	5.5711	9.6365
0.9425	0.1505	0.1806	0.4576	0.9032	1.7763	2.7698	4.4557
1.8849	0.1325	0.1445	0.2710	0.4968	1.0237	1.5656	2.6495
3.7699	0.1205	0.1295	0.1581	0.2935	0.5720	0.8806	1.3849
7.5378	0.1204	0.1220	0.1280	0.1694	0.3162	0.5044	0.7303
18.8475	0.1174	0.1189	0.1234	0.1295	0.1776	0.2475	0.3493
37.6991	0.1152	0.1189	0.1204	0.1242	0.1310	0.1633	0.2017

Dispersión: Sílica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 5 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.2500	2.2000	6.5000	12.0000	22.2	35.0000	57.0000
0.3769	1.0000	2.0833	5.8333	11.2500	21.6667	30.8333	53.3333
0.9425	1.2500	1.2000	5.6000	6.0000	11.8000	18.4000	29.6000
1.8849	1.2222	1.0909	3.0400	3.7499	7.7273	11.8182	19.9999
3.7699	1.1429	1.0750	2.0454	2.4375	4.7500	7.3125	11.5000
7.5378	1.2308	1.0125	1.3125	1.4062	2.6249	4.1875	6.0625
18.8475	1.2187	1.0128	1.0625	1.1026	1.5128	2.1077	2.9753
37.6991	1.2143	1.0327	1.0513	1.0784	1.1372	1.3908	1.7178

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Silica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 10 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0590	0.2156	0.5675 •	1.0782 •	1.589 •	2.0997 •	2.5537 •
0.3769	0.0794	0.2270	0.6242	1.1804 •	1.7309 •	2.3721 •	3.1496 •
0.9425	0.1702	0.2837	0.7264	1.4074 •	2.1565 •	2.7807 •	3.6887 •
1.8849	0.2951	0.3972	0.8512	1.6117	2.3835	3.1780 •	4.0860 •
3.7699	0.5675	0.6242	1.1066	1.9011	2.7240	3.5469	4.4832
7.5378	1.1066	1.1350	1.5606	2.3835	3.2915	4.2562	5.3912
18.8475	2.7240	2.7694	2.9510	3.5469	4.4532	5.7034	7.1505
37.6991	5.3345	5.4480	5.6466	5.9857	6.6965	7.6612	8.6827
Regresión Lineal							
τ_c	0.0347	0.1384	0.5750	1.4156	2.2731	3.2778	3.0339
η_p	0.1406	0.1403	0.1329	0.1194	0.1778	0.1187	0.2899
R^2	0.9999	0.9996	0.9988	0.9982	0.9975	0.9917	0.9992

• Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.3131	1.1440	3.0106	5.7202	8.4297	11.1393	13.5477
0.3769	0.2108	0.6023	1.6563	3.1319	4.5924	6.2938	8.3567
0.9425	0.1806	0.3011	0.7707	1.4933	2.2881	2.9504	3.9138
1.8849	0.1566	0.2107	0.4516	0.8551	1.2645	1.6860	2.1677
3.7699	0.1505	0.1656	0.2935	0.5043	0.7226	0.9408	1.1892
7.5378	0.1468	0.1506	0.2070	0.3162	0.4366	0.5646	0.7152
18.8475	0.1445	0.1469	0.1566	0.1882	0.2379	0.3026	0.3794
37.6991	0.1415	0.1445	0.1498	0.1581	0.1776	0.2032	0.2303

Dispersión: Sílica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 10 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_r/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.3000	3.6538	9.6154	18.2692	26.9231	35.5769	43.2692
0.3769	1.1667	2.8571	7.8571	14.8571	21.7857	29.8571	39.6429
0.9425	1.5000	1.6667	4.2667	8.2669	12.6667	16.3333	21.6667
1.8849	1.4444	1.3461	2.8846	5.4615	8.0769	10.7692	13.8461
3.7699	1.4286	1.1000	1.9500	3.3500	4.8000	6.2500	7.9000
7.5378	1.5000	1.0256	1.4103	2.1538	2.9743	3.8461	4.8718
18.8475	1.5000	1.0167	1.0833	1.3020	1.6458	2.0937	2.6250
37.6991	1.4921	1.0213	1.0585	1.1170	1.2553	1.4061	1.5936

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Sílica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 15 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0681	0.3121	0.7945 •	1.3620 •	2.2700 •	3.2347 •	3.8022 •
0.3769	0.1021	0.3518	0.8739 •	1.5322 •	2.4686 •	3.8590 •	4.9940 •
0.9425	0.2156	0.4426	1.0782	1.9011 •	3.1212 •	4.7670 •	6.5830 •
1.8849	0.3972	0.5675	1.2769	2.2416 •	3.6320 •	5.3912	7.0937
3.7699	0.7661	0.8796	1.5890	2.7240	4.1427	5.7317	7.3207
7.5378	1.5322	1.5890	2.2984	3.5752	4.9940	6.4420	8.2855
18.8475	3.7455	3.8022	4.3697	5.4196	6.9802	8.4274	10.6122
37.6991	7.3491	7.5477	7.9450	8.6827	9.8745		
Regresión Lineal							
τ_c	0.0397	0.2162	0.8969	2.1625	3.6681	5.0658	6.6348
η_{pl}	0.1945	0.1932	0.1864	0.1732	0.1668	0.1788	0.2114
R^2	0.9999	0.9994	0.9999	0.9999	0.9967	0.9998	0.9975

• Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.3613	1.6558	4.2148	7.2255	12.0424	17.1605	20.1711
0.3769	0.2710	0.9335	2.3188	4.0654	6.5498	10.2388	13.2502
0.9425	0.2288	0.4696	1.1440	2.0171	3.3117	5.0578	6.9846
1.8849	0.2107	0.3011	0.6774	1.1892	1.9269	2.8602	3.7635
3.7699	0.2032	0.2333	0.4215	0.7226	1.0989	1.5204	1.9419
7.5378	0.2032	0.2108	0.3049	0.4743	0.6625	0.8546	1.0992
18.8475	0.1987	0.2017	0.2318	0.2875	0.3703	0.4471	0.5631
37.6991	0.1949	0.2002	0.2107	0.2303	0.2619		

Dispersión: Sílica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 15 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.5000	4.5833	11.6667	20.0000	33.3333	47.5000	55.8333
0.3769	1.5000	3.4444	8.5556	15.0000	24.1667	37.7778	48.8889
0.9425	1.9000	2.0526	5.0000	8.8158	14.4737	22.1053	30.5263
1.8849	1.9444	1.4286	3.2143	5.6429	9.1429	13.5714	17.8571
3.7699	1.9285	1.1481	2.0741	3.5555	5.4074	7.4815	9.5555
7.5378	2.0769	1.0370	1.5000	2.3333	3.2592	4.2043	5.4074
18.8475	2.0625	1.0151	1.1667	1.4470	1.8636	2.2500	2.8333
37.6991	2.0556	1.0270	1.0811	1.1815	1.3436		

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Silica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0794	0.4313 •	1.2769 •	2.4063 •	3.5470 •	4.3415 •	4.8239 •
0.3769	0.1419	0.4991	1.3620 •	2.6106 •	3.9726 •	5.1076 •	5.7886 •
0.9425	0.2838	0.6243	1.5890	3.0078 •	4.8239 •	6.3562 •	7.4912 •
1.8849	0.5391	0.8229	1.8160	3.4335	5.5616	6.9804	9.1653
3.7699	1.0442	1.2769	2.2700	3.9442	6.2426	8.0019	10.8395
7.5378	2.0430	2.2417	3.2348	4.9374	7.2074	9.4207	
18.8475	4.9941	5.2779	6.1575	8.0871	9.9587		
37.6991	9.8974	10.2720	11.1800				
Regresión Lineal							
τ_c	0.0481	0.3711	1.2799	2.9007	5.2076	6.0795	7.4913
η_p	0.2616	0.2539	0.2618	0.2746	0.2541	0.4557	0.8881
R^2	0.9999	0.9997	0.9999	0.9999	0.9973	0.9859	0.9999

- Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.4215	2.2881	6.7740	12.7653	18.8168	23.0317	25.5908
0.3769	0.3764	1.3250	3.6138	6.9264	10.5402	13.5517	15.3586
0.9425	0.3010	0.6223	1.6860	3.1913	5.1182	6.7439	7.9482
1.8849	0.2860	0.4366	0.9635	1.8216	2.9506	3.7033	4.8625
3.7699	0.2770	0.3387	0.6021	1.0462	1.6559	2.1226	2.8753
7.5378	0.2710	0.2974	0.4291	0.6550	0.9562	1.2498	
18.8475	0.2650	0.2800	0.3267	0.4291	0.5284		
37.6991	0.2625	0.2725	0.2966				

Dispersión: Sílica gel (21.2 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.7500	5.4286	16.0714	30.2857	44.6429	54.6429	60.7143
0.3769	2.0834	3.5200	9.5999	18.4000	28.0000	35.9999	40.7999
0.9425	2.5000	2.2000	5.6000	10.6000	17.0000	22.4000	26.4000
1.8849	2.6389	1.5263	3.3684	6.3684	10.3158	12.9474	17.0000
3.7699	2.6286	1.2228	2.1739	3.7772	5.9808	7.6630	10.3804
7.5378	2.7693	1.0972	1.5833	2.4167	3.5278	4.6111	
18.8475	2.7500	1.0568	1.2329	1.6193	1.9943		
37.6991	2.7683	1.0378	1.1296				

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión. Sílica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 2 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0340	0.0567	0.0738	0.1702	0.3405	0.6810	1.2485
0.3769	0.0567	0.0681	0.0908	0.1702	0.3405	0.7378	1.3336
0.9425	0.1135	0.1362	0.1419	0.1816	0.3405	0.7378	1.4188
1.8849	0.2270	0.2383	0.2497	0.2610	0.4256	0.7945	1.4755
3.7699	0.4256	0.4256	0.4427	0.4540	0.5959	0.9364	1.6174
7.5378	0.7945	0.8172	0.8229	0.8513	0.9080	1.2769	1.8728
18.8475	1.9295	1.9863	2.0317	2.0430	2.0998	2.2133	2.6673
37.6991	3.8023	3.9158	3.9726	4.0293	4.0577	4.1485	4.3131
Regresión	Lineal						
τ_c	0.0297	0.0382	0.0494	0.0940	0.2496	0.5944	1.3056
η_l	0.1003	0.1030	0.1042	0.1040	0.1004	0.0923	0.0782
R^2	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9983	0.9973	0.9970

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.1806	0.3011	0.3914	0.9032	1.8064	3.6128	6.6235
0.3769	0.1506	0.1807	0.2409	0.4517	0.9034	1.9575	3.5385
0.9425	0.1204	0.1445	0.1505	0.1927	0.3613	0.7828	1.5053
1.8849	0.1204	0.1264	0.1325	0.1385	0.2258	0.4215	0.7828
3.7699	0.1129	0.1129	0.1174	0.1204	0.1581	0.2484	0.4290
7.5378	0.1054	0.1084	0.1092	0.1129	0.1204	0.1694	0.2484
18.8475	0.1024	0.1054	0.1078	0.1084	0.1114	0.1174	0.1415
37.6991	0.1009	0.1039	0.1054	0.1069	0.1076	0.1099	0.1144

Dispersión: Sílica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 2 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.7500	1.6666	2.1667	5.0000	10.0000	20.0000	36.6667
0.3769	0.8300	1.2000	1.6000	3.0000	6.0000	13.0000	23.5000
0.9425	1.0000	1.1999	1.2500	1.6000	2.9999	6.5000	12.5000
1.8849	1.1111	1.0500	1.0999	1.1500	1.8750	3.5000	6.5000
3.7699	1.0714	1.0000	1.0400	1.0667	1.4000	2.2000	3.8000
7.5378	1.0769	1.0286	1.0357	1.0714	1.1429	1.6071	2.3571
18.8475	1.0625	1.0294	1.0229	1.0056	1.0278	1.0540	1.2051
37.6991	1.0635	1.0298	1.0448	1.0597	1.0672	1.0895	1.1343

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Sílica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 5 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0567	0.1135	0.3973	0.9080	1.8160 •	2.8943 •	4.2563 •
0.3769	0.0681	0.1135	0.3973	0.9080	1.9295 •	3.1213 •	4.4834 •
0.9425	0.1419	0.1702	0.3973	0.9080	1.9863	3.2916 •	4.2563 •
1.8849	0.2554	0.2838	0.4824	0.9648	1.9579	3.4051 •	4.9090 •
3.7699	0.5108	0.5108	0.6810	1.0783	1.9863	3.2348 •	4.7104
7.5378	0.9364	0.9648	1.1066	1.4188	2.1282	3.1213	4.1996
18.8475	2.3269	2.3836	2.4971	2.7524	3.3483	4.0293	4.9941
37.6991	4.6252	4.7104	4.9090	5.1076	5.5843	6.2426	7.2074
Regresión Lineal							
τ_c	0.0297	0.0586	0.2277	0.7516	1.6465	2.2234	3.2982
η_{pl}	0.1218	0.1233	0.1213	0.1127	0.1006	0.1049	0.1015
R^2	0.9999	0.9998	0.9981	0.9934	0.9799	0.9956	0.9925

- Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.3011	0.6021	2.1075	4.8171	9.6342	15.3545	22.5801
0.3769	0.1807	0.3011	1.0540	2.4092	5.1195	8.2816	11.8954
0.9425	0.1505	0.1806	0.4215	0.9634	2.1075	3.4924	4.5160
1.8849	0.1355	0.1505	0.2559	0.5118	1.0387	1.8065	2.6044
3.7699	0.1355	0.1355	0.1806	0.2860	0.5269	0.8581	1.2495
7.5378	0.1242	0.1280	0.1468	0.1882	0.2823	0.4141	0.5571
18.8475	0.1235	0.1265	0.1325	0.1460	0.1776	0.2138	0.2650
37.6991	0.1227	0.1249	0.1302	0.1355	0.1481	0.1656	0.1912

Dispersión: Sílica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 5 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_r/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.2500	2.0000	7.0000	16.0000	32.0000	51.0000	75.0001
0.3769	1.0000	1.6667	5.8333	13.3333	28.3333	45.8333	65.8334
0.9425	1.2500	1.2000	2.8000	6.4000	14.0000	23.2000	29.9999
1.8849	1.2500	1.1111	1.8889	3.7778	7.6666	13.3333	19.2222
3.7699	1.2857	1.0000	1.3333	2.1111	3.8889	6.3333	9.2222
7.5378	1.2692	1.0303	1.1818	1.5151	2.2727	3.3333	4.4848
18.8475	1.2813	1.0244	1.0732	1.1829	1.4390	1.7317	2.1463
37.6991	1.2937	1.0184	1.0613	1.1043	1.2074	1.3497	1.5583

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Silica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 10 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0567	0.2270	0.7661	1.4472 •	2.2701 •	3.3483 •	4.6252 •
0.3769	0.0851	0.2270	0.7661	1.5039 •	2.4971 •	3.5186 •	4.7671 •
0.9425	0.1702	0.2837	0.7945	1.6458	2.6673 •	4.0861 •	5.3914 •
1.8849	0.3121	0.4256	0.8796	1.7025	2.8376	4.2563	5.8454
3.7699	0.5959	0.7094	1.0783	1.8728	3.0078	4.4550	6.1859
7.5378	1.1918	1.2769	1.5890	2.2701	3.3767	4.6536	6.2994
18.8475	2.8943	2.9794	3.3483	3.8023	4.6536	5.8454	7.3209
37.6991	5.6184	5.7886	6.1291	6.6399	7.2925	8.5127	9.5910
Regresión Lineal							
τ_c	0.0410	0.1604	0.6291	1.3748	2.4945	3.8881	5.6222
η_{pl}	0.1487	0.1493	0.1448	0.1370	0.1247	0.1188	0.1023
R^2	0.9998	0.9999	0.9981	0.9960	0.9954	0.9878	0.9885

• Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.3011	1.2043	4.0644	7.6772	12.0427	17.7630	24.5371
0.3769	0.2259	0.6023	2.0327	3.9902	6.6253	9.3356	12.6482
0.9425	0.1806	0.3011	0.8430	1.7462	2.8300	4.3354	5.7203
1.8849	0.1656	0.2258	0.4667	0.9032	1.5054	2.2581	3.1012
3.7699	0.1581	0.1881	0.2860	0.4968	0.7978	1.1817	1.6409
7.5378	0.1581	0.1694	0.2108	0.3011	0.4480	0.6174	0.8357
18.8475	0.1536	0.1581	0.1776	0.2018	0.2469	0.3101	0.3884
37.6991	0.1490	0.1535	0.1626	0.1761	0.1934	0.2258	0.2544

Dispersión: Silica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 10 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.2500	4.0000	13.5000	25.5000	40.0000	59.0000	81.5000
0.3769	1.2500	2.6667	9.0000	17.6667	29.3334	41.3334	56.0000
0.9425	1.5000	1.6667	4.6666	9.6667	15.6667	23.9999	31.6666
1.8849	1.5278	1.3636	2.8182	5.4545	9.0909	13.6364	18.7273
3.7699	1.5000	1.1905	1.8095	3.1429	5.0476	7.4762	10.3809
7.5378	1.6154	1.0714	1.3333	1.9048	2.8333	3.9048	5.2857
18.8475	1.5938	1.0294	1.1569	1.3137	1.6078	2.0197	2.5294
37.6991	1.5715	1.0303	1.0909	1.1818	1.2980	1.5151	1.7070

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Sílica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 15 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.0681	0.3689	1.1350 •	2.1565 •	3.2915 •	4.5400 •	5.9871 •
0.3769	0.1021	0.3859	1.1917	2.2132 •	3.3482 •	4.7670 •	6.3560 •
0.9425	0.2270	0.4540	1.3052	2.4686 •	3.8590 •	4.7556 •	7.2072 •
1.8849	0.4256	0.6242	1.4187	2.7240	4.4265	6.2425	8.1720 •
3.7699	0.8172	1.0215	1.7025	3.0361	4.7670	6.8100	8.9665
7.5378	1.589	1.8160	2.3835	3.632	5.3345	7.3207	9.5907
18.8475	3.8874	4.2279	4.6535	5.1642	7.0086	8.7962	10.8960
37.6991	7.7066	8.2004	8.5125	9.1935	10.2434		
Regresión Lineal							
τ_c	0.0395	0.2655	1.0266	2.2629	4.1086	6.0835	8.5606
η_{pl}	0.2036	0.2102	0.1968	0.1783	0.1611	0.0713	0.1251
R ²	0.9999	0.9994	0.9989	0.9900	0.9989	0.9834	0.9968

- Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.3613	1.9569	6.0212	11.4403	17.4615	24.0849	31.7619
0.3769	0.2710	1.0239	3.1620	5.8722	8.8837	12.6479	16.8639
0.9425	0.2408	0.4817	1.3850	2.6192	4.0944	5.0458	7.6469
1.8849	0.2258	0.3312	0.7527	1.4452	2.3484	3.3118	4.3355
3.7699	0.2168	0.2710	0.4516	0.8053	1.2645	1.8064	2.3784
7.5378	0.2108	0.2409	0.3162	0.4818	0.7077	0.9712	1.2723
18.8475	0.2062	0.2243	0.2469	0.2740	0.3719	0.4671	0.5781
37.6991	0.2044	0.2175	0.2258	0.2439	0.2717		

Dispersión: Sílica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 15 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	1.5000	5.4167	16.6667	31.6667	48.3333	66.6667	87.9167
0.3769	1.5000	3.7778	11.6667	21.6667	32.7778	46.6667	62.2222
0.9425	2.0000	2.0000	5.7500	10.8750	17.0000	20.9500	31.7500
1.8849	2.8033	1.4667	3.3333	6.4000	10.4000	14.6667	19.2000
3.7699	2.0571	1.2500	2.0833	3.7153	5.8333	8.3333	10.9722
7.5378	2.1538	1.1429	1.5000	2.2857	3.3571	4.6071	6.0357
18.8475	2.1406	1.0876	1.1971	1.3285	1.8029	2.2628	2.8029
37.6991	2.1556	1.0641	1.1046	1.1929	1.3292		

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Sílica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.1135	0.6810	1.9181 •	3.5185 •	5.5047 •	7.3491 •	9.9312 •
0.3769	0.2043	0.7377	1.9579 •	3.7171 •	5.8452 •	7.7180 •	10.1015
0.9425	0.4199	0.9080	2.2700	4.1711 •	6.5262 •	8.56925	11.1230
1.8849	0.7094	1.1350	2.5254	4.5967	7.0370	9.3637	
3.7699	1.3052	1.7025	2.9510	5.0791	7.6612	10.3285	
7.5378	2.4686	2.8091	3.9441	5.9020	8.6260		
18.8475	5.7885	6.1290	7.0086	8.7962	11.2592		
37.6991	11.3216						
Regresión Lineal							
τ_c	0.1600	0.6142	1.9911	4.1115	6.6864	8.0869	9.4208
η_{pl}	0.2969	0.2922	0.2651	0.2474	0.2446	0.6064	1.8060
R ²	0.9999	0.9999	0.9996	0.9993	0.9975	0.9909	0.9999

- Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.6021	3.6127	10.1759	18.6658	29.2029	38.9874	52.6857
0.3769	0.5420	1.9574	5.1947	9.8624	15.5088	20.4776	26.8015
0.9425	0.4456	0.9634	2.4085	4.4256	6.9244	9.0920	11.8016
1.8849	0.3763	0.6021	1.3398	2.4387	3.7333	4.9677	
3.7699	0.3462	0.4516	0.7828	1.3473	2.0322	2.7397	
7.5378	0.3275	0.3727	0.5232	0.7830	1.1444		
18.8475	0.3071	0.3252	0.3719	0.4667	0.5974		
37.6991	0.3003						

Dispersión: Sílica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 20 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	2.5000	6.0000	16.9000	31.0000	48.5000	64.7500	87.5000
0.3769	3.0000	3.6111	9.5833	18.1944	28.6111	37.7778	49.4444
0.9425	3.7000	2.1622	5.4054	9.9324	15.5405	20.4054	26.4865
1.8849	3.4722	1.6000	3.5600	6.4800	9.9200	13.2000	
3.7699	3.2857	1.3043	2.2609	3.8913	5.8696	7.9130	
7.5378	3.3462	1.1379	1.5977	2.3908	3.4942		
18.8475	3.1875	1.0588	1.2108	1.5196	1.9451		
37.6991	3.1667						

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

Dispersión: Silica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 30 % en peso

Tabla de esfuerzos cortantes y esfuerzos de cedencia [Pa]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	0.4540	3.1212	5.8736	8.8530	11.1230		
0.3769	0.7094	3.3482	6.0639	9.8177			
0.9425	1.5039	4.1144	8.3706				
1.8849	2.6956	5.2210	9.3637				
3.7699	5.0507	7.2072					
7.5378	9.534	8.9097					
18.8475							
37.6991							
Regresión Lineal							
τ_c	0.3025	3.8548	6.072				
η_{pl}	1.2335	0.2953	0.1506				
R^2	0.9995	0.8802	0.9999				

- Datos suprimidos para realizar la regresión.

Tabla de Viscosidades Aparentes [Pa.s]

Velocidad de corte	Sin campo	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	2.4085	16.5584	31.1598	46.9655	59.0080		
0.3769	1.8821	8.8837	16.0357	26.0487			
0.9425	1.5956	4.3654	8.8813				
1.8849	1.4301	2.7699	4.9678				
3.7699	1.3398	1.9118					
7.5378	1.2648	1.1820					
18.8475							
37.6991							

Dispersión: Silica gel (25.6 micras)-aceite silicón 1000, 30 % en peso

Tabla de Viscosidades Relativas [η_E/η_0]

Velocidad de corte	Sin campo *	0.25 kV/mm	0.50 kV/mm	0.75 kV/mm	1.0 kV/mm	1.25 kV/mm	1.5 kV/mm
0.1885	10.0000	6.8750	12.9375	19.5000	24.5000		
0.3769	10.4167	4.7200	8.5200	13.8400			
0.9425	13.2500	2.7358	5.5660				
1.8849	13.1944	1.9368	3.4737				
3.7699	12.7143	1.4270					
7.5378	12.9231	0.9345					
18.8475							
37.6991							

* Relativas a las viscosidades del aceite silicón

ANEXO III: COMPARACIÓN ENTRE DISPERSIONES POLIDISPERSAS Y SU RELACIÓN CON SISTEMAS MONODISPERSOS.

En la tabla A.3 se muestran los resultados del análisis expuesto por Krieger², ya que este análisis permite saber que tan alejada se encuentra la distribución de la polidispersidad. Primero se obtiene el promedio en número D_n , con la siguiente expresión:

$$D_n = \frac{\sum n_i \cdot D_i}{\sum n_i} \quad \dots (a3.1)$$

Luego se obtiene el promedio en peso, dado por $D_w = \sqrt[3]{(D^6)/(D^3)}$, así como el promedio volumen-superficie, dado por $D_s = [D^3]/[D^2]$. Los índices de polidispersidad son la desviación estándar, dada por $\sigma_D = \sqrt{[D^2] \cdot [D]^2}$ y el índice de uniformidad $U = D_w/D_n$. Las distribuciones cerradas tienen índices de uniformidad debajo de 1.01 y su correspondiente desviación estándar relativa menor a 5%.

Tabla A.3 Promedios de tamaño e índices obtenidos para las distintas fases sólidas preparadas para evaluar la distribución del tamaño de partícula.

Tamaño de Partícula Promedio [micras]	Promedio en número D_n	Promedio en peso D_w	Promedio Volumen/Superficie D_s	Desviación Estándar $(\sigma_D)^2$	Índice de Polidispersidad U	Desviación Estándar Relativa σ_D/D_n
1.5	1.5195	5.7465	3.7437	1.4194	1.53	0.78
21.2	21.1972	25.0506	23.3121	23.5468	1.07	0.23
25.6	27.2718	35.8419	32.3307	76.9201	1.11	0.32
65.2	65.3615	81.6188	76.2518	458.5217	1.07	0.33

Como resultado de dichos cálculos, la sílica de 21.2 micras de tamaño promedio es la que tiene un índice U más cercano a 1.01 (6.4% mayor) y más cercana al 5% (lo supera en 18%). Por lo que se puede establecer la comparación con la sílica de 25.6 micras de tamaño promedio, la cual supera a la monodispersa en un 3.7% en su índice de polidispersidad, teniendo un tamaño de partícula promedio muy semejante (4.4 micras). (Otros autores han tomado esta consideración para sus comparaciones)³.

Nomenclatura

η	Viscosidad dinámica [Pa.s].
ν	Viscosidad cinemática [cSt].
λ	Tiempo característico del material en el proceso de deformación.
t	Tiempo característico del fenómeno que se observa.
N_{De}	Número de Deborah (λ/t) [adimensional].
D_n	Promedio en número del tamaño de partícula.
D_w	Promedio en peso del tamaño de partícula.
D_s	Promedio volumen-superficie del tamaño de partícula.
σ_D	Índice de polidispersidad (desviación estándar).
U	Índice de polidispersidad (D_w/D_n).

Referencias Bibliográficas

1. Gebhard Schranun, A practical Approach to Rheology and Rheometry. (Karlsruhe, República Federal alemana; Haake Rheometers 1994) pp. 7
2. Irvin M. Krieger, "Rheology of Monodisperse Latexes", en: Advanc. Colloid Interface Science, No. 3 (1972) pág. 121
3. R. Pal., Y. Yan, J. Masliyah "Rheology of Oil in Water Emulsions with Added Solids" en: Chemical Engineering Science Vol. 46 No. 4 (1991) pág. 989

ANEXO IV: DETERMINACIÓN DE DENSIDADES DE LAS SUSPENSIONES ELECTRO-REOLÓGICAS

La determinación de las densidades de las suspensiones se realizaron por el siguiente método, apegado a la normatividad internacional:

1. Medición del volumen del matraz de bola por lo menos 5 veces para obtener el volumen promedio, V_m .
2. Llevar a peso constante el matraz (a 20°C) y registrar éste, W_{ma} .
3. Agregar la suspensión al matraz, cuidando de no sobrepasar la mitad, desgasificar la suspensión y pesar de nuevo, W_s .
4. Aforar el matraz con agua y pesarlo, W_{s+l} .
5. Calcular la densidad del sólido ρ_s con la ecuación citada a continuación:

$$\rho_s = \left(\frac{W_s - W_{ma}}{V_m \cdot \rho_f - (W_{s+l} - W_s)} \right) \rho_f$$

Donde:

- ρ_s : Densidad de la suspensión.
- V_m : Volumen del matraz.
- W_{ma} : Peso constante del matraz seco.
- W_s : Peso del matraz con la suspensión.
- W_{s+l} : Peso del matraz con la suspensión y el líquido.
- ρ_f : Densidad del fluido de referencia (agua)

En la siguiente tabla (tabla A.4 se muestran las densidades determinadas para las suspensiones mencionadas:

Tabla A.4 Determinación de densidades para las suspensiones indicadas

Suspensión	Concentración [% Peso]	V _m [cm ³]	W _{ma} [g]	W _s [g]	W _{s+l} [g]	Densidad de la suspensión [g/cm ³]
silica 1.2 μ - aceite silicón 1000	20	99.9366	56.2133	86.2010	159.0918	1.1209
silica 21.2 μ - aceite silicón 1000	20	99.9065	64.1511	85.0122	162.5867	1.0836
silica 25.6 μ - aceite silicón 1000	20	49.8409	36.5366	50.0531	87.2484	1.0817
silica 65.2 μ - aceite silicón 1000	20	24.9373	23.8888	29.3225	49.1603	1.0825
silica 25.6 μ - aceite silicón 1000	2	24.9373	23.8896	30.1599	48.5135	0.9632
silica 25.6 μ - aceite silicón 1000	5	49.8409	36.5373	55.7284	86.1524	0.9946
silica 25.6 μ - aceite silicón 1000	10	99.9065	61.1455	84.9157	161.2136	1.0204
silica 25.6 μ - aceite silicón 1000	15	99.9366	56.2083	78.6646	156.9741	1.0537
silica 25.6 μ - aceite silicón 1000	30	49.9373	23.8888	28.4900	87.8492	1.1454

Nomenclatura

η	Viscosidad dinámica [Pa.s].
ν	Viscosidad cinemática [cSt].
λ	Tiempo característico del material en el proceso de deformación.
t	Tiempo característico del fenómeno que se observa.
N_{De}	Número de Deborah (λ/t) [adimensional].
D_n	Promedio en número del tamaño de partícula.
D_w	Promedio en peso del tamaño de partícula.
D_s	Promedio volumen-superficie del tamaño de partícula.
σ_D	Índice de polidispersidad (desviación estándar).
U	Índice de polidispersidad (D_w/D_n).
ρ_s	Densidad de la suspensión [g/cc].
V_{mat}	Volúmen del matraz [cc].
W_{mat}	Peso constante del matraz seco [g].
W_s	Peso del matraz con la suspensión [g].
W_{s+l}	Peso del matraz con la suspensión y el líquido [g].
ρ_f	Densidad del fluido de referencia (agua) [g/cc].

Referencias Bibliográficas

1. Gebhard Schramm, A practical Approach to Rheology and Rheometry. (Karlsruhe, República Federal alemana; Haake Rheometers 1994) pp. ?
2. Irvin M. Krieger, "Rheology of Monodisperse Latices", en: Advanc. Colloid Interface Science, No. 3 (1972) pág. 121
3. R. Pal., Y. Yan, J. Masliyah "Rheology of Oil in Water Emulsions with Added Solids" en: Chemical Engineering Science Vol. 46 No. 4 (1991) pág. 989
4. Density Determinations of Solids and Liquids. 1955 ASME (PCT 19, 16-65) pp. 1650-1945

1. Adriani, Paul M. y Alice P. Gast, "A microscopic model of electrorheology". En: *Phys. Fluids*, Vol. 31 No. 10, (octubre 1988) pp. 2757-2768
2. Bakker, André y L.E. Gates, "Properly Choose Mechanical Agitators for Viscous Liquids" en: *Chemical Engineering Progress*, Vol. 91 No. 12 (diciembre 1991) pp. 25-34
3. Bird, Byron; Warren E. Stewart y Edwin Lighthooth. Fenómenos de transporte. México D. F.: Ediciones REPLA S.A. c1987
4. Block, H. y L. Kelly, "Electro-rheology". En *Journal of Physical Design. Applied Physics*, Vol. 21 (1988) pp. 1661-1677
5. Bonnecaze, R. T. y J. F. Brady, "Yield Stresses in Electrorheological Fluids". En: *Journal of Rheology*, Vol. 36 No. 1 (enero 1992) pp. 73-115
6. Chong, J. S.; E. B. Christiansen y A. D. Baer, "Rheology of Concentrated Suspensions". En: *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 15 (1971) pp.2007-2021
7. Deinega, Yu F. and G.V. Vinogradov, " Electric Fields in the rheology of disperse systems ". En: *Rheological Acta*, 23, (1984), pp. 636-651
8. Gast, Alice P. and Charles Zukoski, " Electrorheological fluids as colloidal suspensions ". En: *Advances in Colloid and Interface Science*, 30 (1989), pp.153-202
9. Goodwin, J.W. Colloidal Dispersions. The Royal Society of Chemistry; Dorchester, Great Britain: Dorset Press, 1982, 217 p.
10. Hartsock, D. L.; R. F. Novak y G. J. Chaundy, "ER Fluid Requirements for Automotive Devices". En: *Journal of Rheology*, Vol. 35 No. 7, (octubre 1991) pp.1305-1326
11. Hasley, Thomas C., "Electrorheological Fluids". En *Science*, Vol. 258 No. 30 (octubre 1992) pp.761-766
12. Hasley, Thomas C. y James E. Martin, "Electrorheological Fluids". En: *Scientific American* (octubre 1993) pp. 42-48
13. Jordan, Therese C. y M. T. Shaw, " Electrorheology". En: *IEEE Transactions on Electrical insulation*, Vol. 24 No. 5 (octubre 1989) pp. 849-873
14. Klass, Donald L. and Thomas W. Martinek, " Electroviscous Fluids. Rheological Properties ". En: *Journal of Applied Physics*, Vol. 38 No. 1, (enero 1967), pp. 67-74
15. Korovko, Evgeniya V., "The Main Properties of ERF's and their Application". *Conference on Recent Advances in Adaptive and Sensory Materials and Their Application*. (abril 1992) Vol. 1 pp. 3-56
16. Klingengerg, D. J. y C. F. Zukoski, "Studies on the Steady-Shear Behavior of ERF" En: *Langmuir* Vol. 6 (1990) pp. 15-24
17. Krieger, I.M., "Rheology of Monodisperse Latices". En: *Advances in Colloid Interface Science*, No. 3 (1972) pp. 111-136
18. Krieger, I.M. et al, Electro-Rheological Fluids, A Research Needs Assessment. Final Report. U.S. Department of Energy, Office of Energy Research. Office of Program Analysis; Washington D.C.: U.S. Government Printing Office may 1993, DE - AC02 91ER30172
19. Marshall, Louis, Charles Zukoski and James W. Goodwin, " Effects of Electric Fields on the Rheology of Non-aqueous Concentrated Suspensions ". En: *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, Vol. 85 No. 9 (1989), pp. 2785-2795
20. Otsubo, Yasufumi; Masahiro Sekine y Shingo Katayama, "Electrorheological Properties of Silica Suspensions". En: *Journal of Rheology*. Vol. 36 No. 3 (abril 1992), pp.479-496
21. Pal, R.; Y. Yan y J. Mastiyah, "Rheology of Oil in Water Emulsions with added Solids". En: *Chemical Engineering Science*, Vol. 46 No. 4 (1991), pp. 985-994
22. Pal, R.; Y. Yan and J. Mastiyah, "Rheology of Emulsions" En: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry, pp. 132-170, Ed. by Laurier L. Schramm. Washington D.C.: American Chemical Society, 1992.