



00347 5
91
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**EFFECTO ELECTORREOLOGICO EN
SUSPENSIONES DE GEL DE SILICE**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS
(CIENCIA DE MATERIALES)
P R E S E N T A
MARIA DEL ROCIO NAVA LARA

DIRECTOR DE TESIS: DR. CHUMIN WANG CHEN.

FACULTAD DE CIENCIAS



MEXICO. D.F.

1997

DIV. EST. POSGRADO

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

*A quienes me dieron la vida y me indicaron el
camino que lleva el conocimiento del universo*

Macario Nava Osornio

*y
Dolita Lara de Nava,*

Gracias.

Agradecimientos

**De una manera muy especial al
Dr. Chumin Wang Chen y al M. C. Marco Antonio Ponce Vález,
quienes me brindaron su apoyo y conocimientos para la obtención de este grado.**

**A los sinodales que con profesionalismo revisaron y
aportaron sus comentarios para la mejora de este trabajo:**

**Dr. Luis Felipe del Castillo
Dr. Rubén Gerardo Barrera Pérez
Dra. Judith María de Lourdes Cardoso Martínez
Dr. José Luis Aragón Vera
Dr. Victor Manuel Castaño Meneses
Dra. Hailin Zhao Hu.**

**A mis hermanos Luis, Eric, Marcos, Gabriela y en especial
a Alfredo por su ayuda y cariño.**

**Al Instituto de Investigación en Materiales y
a la Facultad de Ciencias de la UNAM,
por brindarme la formación académica.**

**Al Instituto de Investigaciones Eléctricas, por su
apoyo a proyectos de infraestructura, de los cuales se
obtuvieron los recursos humanos, técnicos y económicos
que me permitieron el desarrollo de este trabajo.**

**Finalmente a mis amigos, quienes con su alegría y optimismo me alientan para continuar mi
superación: Jorge Maza, Juan José López, Alberto Brito, Pedro Lagunas, Silvia Bahena, Alma
Morales, Evaristo Merino, Gustavo Regalado, Isafas Ramírez, Ramiro Hernández, Elizabeth
Cardenas, Luis Colorado, David Palacios, Jorge Mundo, Alicia Lara, Miguel Cruz y Raúl
Oviedo.**

Indice

Introducción	1
CAPITULO 1	3
Estado del Arte de los Fluidos Electrorreológicos (ER)	3
1.1 El concepto de la reología	4
1.2 Definición y propiedades de los fluidos ER	7
1.2.1 Microestructura	7
1.2.2 Comportamiento reológico	9
1.3 Modelos del efecto ER	13
1.4 Composición y materiales	15
1.4.1 Fluido Base	15
1.4.2 Partículas y aditivos	16
1.4.3 Forma de las partículas	17
1.4.4 Tamaño y concentración de partículas	20
1.5 Aplicaciones tecnológicas	20
CAPITULO 2	25
Procedimiento Experimental	25
2.1 Descripción del equipo	27
2.1.1 Diseño del electroviscosímetro	27
2.1.2 Calibración	29
2.2 Análisis de la dinámica del sistema de medición disco-fluido	30
2.2.1 Estado estacionario ($\Omega=0$)	31
2.2.2 Estado transitorio ($\Omega \neq 0$)	32
CAPITULO 3	34
Estructura Estática	34
3.1 Efecto de dielectroforesis en la estructura	36
3.2 Modelo de estructura de los fluidos ER	40
3.2.1 Configuración de 5 partículas	45
3.2.2 Configuración de 8 partículas	49

CAPITULO 4	53
Estado Dinámico Estacionario	53
4.1 Desarrollo Experimental	54
4.1.1 Preparación de fluidos ER	54
4.1.2 Método de medición	56
4.2 Suspensiones de gel de sílice en diferentes fluidos dieléctricos ($\phi=0.096$)	56
4.2.1 Resultados en DC	56
4.2.2 Resultados en AC (60Hz)	60
4.3 Suspensiones de gel de sílice con diferente concentración de partículas	62
4.3.1 ER-S100 ($\phi = 0.096, 0.122, 0.144$)	62
4.3.2 ER-DOP con gel de sílice ($\phi = 0.096, 0.122, 0.144$)	67
4.4. Discusión de los resultados	70
 CAPITULO 5	
 Estado Dinámico Transitorio	72
5.1 Método de evaluación	73
5.2 Resultados experimentales	73
5.2.1 ER-S100	76
5.2.2 ER-S1000	79
5.2.3 ER-DOP	80
5.3 Análisis de resultados	84
 Conclusiones	91
Referencias	94

Introducción

Los fluidos electrorreológicos (ER) son mezclas compuestas de partículas polarizables suspendidas en un fluido dieléctrico, con concentración volumétrica de partículas entre 20% y 40%. Al aplicar un campo eléctrico intenso a la mezcla, del orden de 1-3 kV/mm, se incrementa la resistencia al flujo y el sistema retorna a su estado inicial al retirar el campo. Específicamente éstos presentan un comportamiento reológico del tipo Bingham, es decir, el material fluye después de que se excede un esfuerzo crítico, llamado esfuerzo de cedencia. El efecto electrorreológico se manifiesta como un fenómeno reversible y con tiempo de respuesta del orden de milisegundos [8,35,69]. Winslow, en el año de 1949, reportó sus primeros estudios referentes a los fluidos ER y patentó algunas de las aplicaciones tecnológicas [83-86], por lo que en un principio se denominó efecto de Winslow.

El efecto ER podría aprovecharse en múltiples aplicaciones tecnológicas, debido a que tiene la capacidad de graduación continua de la viscosidad aparente en función del campo eléctrico. Esto haría posible controlar por ejemplo: el flujo en una válvula, el amortiguamiento en un supresor de vibraciones, el enganche de un embrague o los frenos en un automóvil, etc. [19,42,48]. La potencialidad tecnológica que presentan los fluidos ER no ha sido comercializada todavía debido principalmente a que el esfuerzo de cedencia, del orden de 1-2 kPa, no es suficiente para diseñar dispositivos compactos [19], es decir, se requieren áreas grandes para generar la fuerza necesaria para su aplicación. Por ejemplo, el tamaño de un amortiguador ER para automóvil sería aproximadamente cuatro veces mayor que un amortiguador convencional.

Otro material con propiedades reológicas similares a los fluidos ER, son los fluidos magnetorreológicos (MR), que manifiestan un incremento en el esfuerzo de cedencia de 10-20 kPa, al aplicar un campo magnético del orden de kOe [11,47,48,67]. Sin embargo, el efecto MR generalmente no es reversible, debido a la remanencia de la magnetización en las partículas.

Durante los últimos años uno de los propósitos principales ha sido diseñar fluidos ER que desarrollen mayor esfuerzo de cedencia. Sin embargo, aún cuando existen algunas teorías que describen parcialmente el efecto ER, para suspensiones con baja concentración de partículas [1,23,25,37,52,54,67], no se ha podido desarrollar una teoría general que explique la cinética de formación de la estructura, el tiempo de respuesta y las propiedades reológicas. Parte del problema se debe a la complejidad del fenómeno, ya que se trata de un problema de muchos cuerpos y además se encuentran fuera de equilibrio.

Una de las propiedades más importantes para la aplicación tecnológica de los fluidos ER es su velocidad de respuesta. Sin embargo, existe todavía controversia en la literatura con respecto al tiempo de respuesta y su dependencia con respecto a las propiedades de la mezcla, tales como la viscosidad, polarizabilidad de las partículas y la intensidad del campo eléctrico.

El objetivo de esta tesis es contribuir a la comprensión del efecto electrorreológico aportando algunos resultados teóricos y experimentales, referentes a la estructura de los fluidos ER y al tiempo de respuesta de los mismos. Para ello la presente se divide en cinco capítulos; primeramente se presenta una revisión del estado del arte de los fluidos ER. En el segundo capítulo se describe en detalle el diseño del equipo experimental y la metodología del análisis de los resultados. En el tercero se presenta un modelo teórico que predice la estructura observada experimentalmente. En los capítulos cuarto y quinto se presentan los resultados experimentales del efecto ER correspondientes, respectivamente, al estado dinámico estacionario, es decir, la medición del esfuerzo de cedencia, y al estado dinámico transitorio con el que se evalúa el tiempo de respuesta. Finalmente, se presentan algunas conclusiones con respecto al efecto ER y el tiempo de respuesta en varias mezclas, como función de la viscosidad, la permitividad, la velocidad de corte y la intensidad del campo eléctrico.

CAPITULO 1

Estado del Arte de los Fluidos Electrorreológicos (ER)

En el año de 1949 Winslow reportó que ciertas sustancias compuestas de partículas polarizables suspendidas en un fluido dieléctrico modifican sus propiedades reológicas al aplicar un campo eléctrico intenso, del orden de kV/mm [84]. El fenómeno se conoce como efecto electrorreológico (ER) o de Winslow. La principal característica es el incremento reversible de la viscosidad aparente, siendo de uno a dos ordenes de magnitud. El origen del efecto ER se atribuye a la formación de cadenas de partículas orientadas en la dirección del campo eléctrico, las cuales oponen resistencia al flujo al aplicar un esfuerzo de corte. Para ayudar a la comprensión del efecto ER, en este capítulo se presentan algunos conceptos fundamentales de reología, una revisión de las propiedades de los fluidos ER partiendo de la microestructura, propiedades reológicas, las principales teorías del efecto ER, composición de materiales y aplicaciones tecnológicas.

1.1 El concepto de la reología

La reología es la ciencia que estudia las propiedades de deformación y de flujo de la materia [6,18,24]. Dentro de ella se define un líquido como aquel material cuya forma cambia continuamente, o fluye, al aplicar una fuerza, en contraste con un sólido rígido ideal. El esfuerzo en un fluido es proporcional a la fuerza aplicada por unidad de área ($\sigma = F/A$). La fuerza δF que actúa sobre un elemento de área δA puede descomponerse en un componente normal y otro tangencial al área, definiendo el esfuerzo normal σ_n y un esfuerzo de corte σ_t como:

$$\sigma_n = \frac{dF_n}{dA_n} \quad \dots(1.1)$$

y

$$\sigma_t = \frac{dF_t}{dA_n}$$

En general, el esfuerzo es un tensor, con los componentes σ_{xx} , σ_{yy} y σ_{zz} , donde el primer índice se refiere a la orientación de la superficie y el segundo a la dirección de la fuerza, como lo ilustra la Fig. 1.1. De esta forma, σ_{xx} , σ_{yy} y σ_{zz} son los esfuerzos normales y σ_{xy} , σ_{yx} y σ_{yz} los esfuerzos de corte, siendo $\sigma_{xx} = \sigma_{xx}$, $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ y $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$.

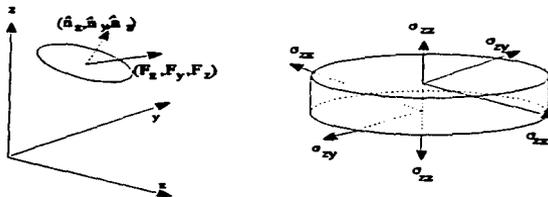


Fig. 1.1 Componentes del esfuerzo en las superficies planas de un elemento de volumen.

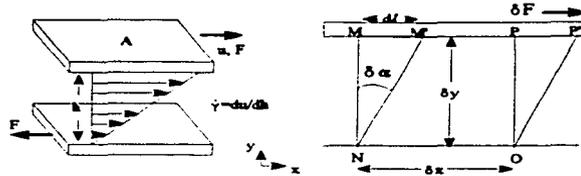


Fig. 1.2. Deformación de un elemento de fluido.

Al aplicar un esfuerzo a un fluido, éste se deforma de manera irreversible. La deformación es función del esfuerzo de corte y de la velocidad de corte, definida esta última como el gradiente de velocidades entre dos superficies $\dot{\gamma} = du/dy$, ver Fig. 1.2. Los fluidos se clasifican de acuerdo con la relación de esfuerzo de corte y velocidad de corte. De manera general, la viscosidad se define como la pendiente de la curva de esfuerzo de corte como función de la velocidad de corte (Fig. 1.3),

$$\frac{d\sigma}{d\dot{\gamma}} = \eta \quad \dots(1.2)$$

donde η se conoce como viscosidad dinámica o absoluta y es una medida de la fricción interna. La unidad de medida en el sistema MKS para la viscosidad es el Pascal-segundo (Pa-s) y en el cgs el poise, 1 Pa-s = 10 Poise. La viscosidad aparente se define como el cociente entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, como se muestra en la línea punteada de la Fig. 1.3.

En un fluido Newtoniano, el esfuerzo de corte es proporcional a la velocidad de corte

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}, \quad \dots(1.3)$$

en este caso la viscosidad aparente es igual a la viscosidad dinámica. Cuando la viscosidad dinámica decrece con la velocidad de corte se dice que se trata de un fluido pseudoplástico, cuando ocurre lo contrario se trata de un fluido dilatante. En general la viscosidad también es función de

la temperatura y de la presión. En los fluidos Newtonianos ésta decrece al aumentar la temperatura, aproximadamente en una relación de Arrhenius y es poco sensible a la presión. El comportamiento de un líquido Newtoniano a temperatura y presión constante se caracteriza por:

- 1) El único esfuerzo resultante es el de corte y los normales son ceros;
- 2) La viscosidad es independiente de la velocidad de corte y del tiempo;
- 3) El flujo cesa al quitar la fuerza.

Un líquido que no cumple con estos atributos se dice que es un fluido no Newtoniano, donde frecuentemente la viscosidad es función de la velocidad de corte, como ocurre en los fluidos dilatantes y los seudoplásticos. Otro tipo de fluido no Newtoniano es el fluido de Bingham, el cual fluyen después de que se excede un esfuerzo crítico, llamado esfuerzo de cedencia σ_o . Esto implica que a velocidad de corte cero la viscosidad es infinita. La ecuación que describe un fluido de Bingham se expresa como:

$$\sigma = \sigma_o + \eta_p \dot{\gamma} \quad \dots(1.4)$$

donde σ_o es el esfuerzo de cedencia y η_p se conoce como viscosidad plástica.

En materiales tales como emulsiones, dispersiones y soluciones poliméricas se observa un comportamiento del tipo seudoplástico. En suspensiones y soluciones diluidas no se presenta un esfuerzo de cedencia, es decir, el material fluye al esfuerzo mínimo. Sistemas más concentrados -tales como geles, grasas lubricantes y pastas- presentan comportamiento de Bingham.

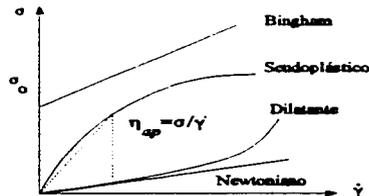


Fig. 1.3 Clasificación de los fluidos.

1.2 Definición y propiedades de los fluidos ER

Los fluidos ER son mezclas compuestas de partículas polarizable -con tamaño de partícula de orden de micras- suspendidas en un medio aislante (o fluido base). Dependiendo de la intensidad del campo eléctrico, la mezcla puede fluir como agua, como miel e incluso solidificarse como gelatina [35]. El fenómeno se manifiesta como un incremento en el esfuerzo de cedencia proporcional al campo eléctrico. Entre las principales características se encuentran: alineación de partículas en la dirección de campo eléctrico, fenómeno reversible, comportamiento reológico del tipo Bingham, dependencia cuadrática del esfuerzo de cedencia con el campo eléctrico y tiempo de respuesta del orden de milisegundos [8,33,42].

1.2.1 Microestructura

Observaciones en microscopio muestran que en un fluido ER las partículas están dispersas y se mueven independientemente, al aplicar el campo eléctrico éstas se alinean en la dirección del campo formando cadenas de partículas, como se muestra en la Fig. 1.4.

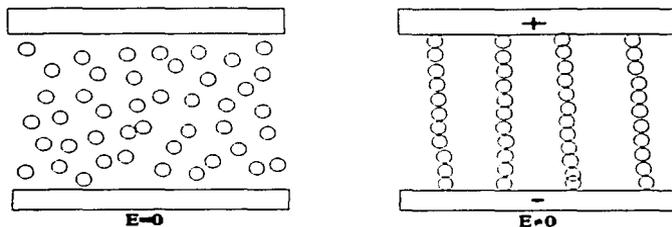


Fig.1.4. Alineamiento de partículas en un fluido ER.

Para determinar la estructura de las cadenas Tao [75] propone un modelo donde el medio se compone de partículas esféricas polarizables que se encuentran suspendidas en un fluido dieléctrico y considera el caso estático, es decir, sin esfuerzo de corte. Al aplicar el campo

eléctrico, la interacción de los momentos dipolares de las partículas da lugar a la formación cadenas orientadas en la dirección del campo y la interacción entre cadenas conforma una estructura ordenada. Tao calcula la energía de interacción de varias estructuras y sus resultados se muestran en la tabla 1.1 . Como puede apreciarse, la estructura más estable es la tetragonal centrada en el cuerpo (bct). Los vectores que define la estructura bct son: $\vec{a}_1 = \sqrt{6}R \hat{x}$, $\vec{a}_2 = \sqrt{6}R \hat{y}$ y $\vec{a}_3 = 2R \hat{z}$, donde R es el radio de la partícula, como se muestra en la figura 1.5.

Tabla 1.1. Energía de interacción en diferentes celdas unitarias.

Estructura	U (unidades de $p^2/a^3\epsilon_0$)
bct	-0.381268
fcc	-0.3702402
hcp	-0.3700289
cadenas separadas	-0.300514
cúbica simple	-0.261799

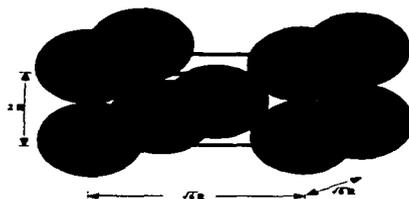


Fig. 1.5. Celda unitaria de la estructura bct.

La confirmación experimental [15] de la formación de la estructura bct se obtuvo mediante el análisis de difracción de Fraunhofer. Para ello se emplearon partículas de vidrio, con un diámetro de $40\mu\text{m}$, dispersas en aceite de silicón. Se encontró que inmediatamente después de aplicar el campo, no habiendo una velocidad de corte, se forman cadenas, después de algunos minutos las cadenas se agrupa en columnas gruesas, teniendo una estructura cristalina cuya celda unitaria es la bct.

Para analizar el crecimiento de las columnas [33] se efectúa un experimento similar -con partículas más pequeñas, del orden de nanómetro- haciendo incidir la luz en la dirección perpendicular a las columnas. Sin campo, la luz es difusa y abarca un radio grande, pero al aplicar el campo eléctrico disminuye la dispersión. La interpretación cualitativa que se le da a este hecho es que al aplicar el campo eléctrico inicia la formación de cadenas, permitiendo el paso de la luz con menos obstáculos. Conforme las cadenas se agrupan para formar columnas la dispersión disminuye, y con el tiempo se hace más brillante, debido a que se abren espacios permitiendo el paso de la luz.

1.2.2 Comportamiento reológico

El comportamiento de un fluido ER sin campo eléctrico es como de un fluido Newtoniano. Cuando se aplica un campo eléctrico la formación de cadenas de partículas incrementa la resistencia al flujo, dando como resultado un esfuerzo de cedencia diferente de cero. Marshall [52] deduce empíricamente que un fluido ER tiene un comportamiento reológico del tipo Bingham, partiendo de que existen dos fuerzas predominantes en el efecto ER, la fuerza de atracción dipolar y la fuerza viscosa, las cuales determinan la magnitud del efecto ER.

Considera que la fuerza de interacción entre dos dipolos es igual a

$$F_p = 12 \pi \epsilon_0 \epsilon_f (a \beta E)^2 \quad \dots(1.5)$$

donde a es radio de la partícula ϵ_0 y ϵ_f son la permitividad dieléctrica del vacío y del fluido base, respectivamente, E el campo eléctrico y β la polarización relativa que se expresa como:

$$\beta = \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{\epsilon_p + 2\epsilon_f} \quad \dots(1.6)$$

siendo ϵ_p la permitividad dieléctrica relativa de la partícula. Además, que la fuerza viscosa que

experimenta la partícula en el medio dispersante esta dada por,

$$F_{\eta} = 6\pi a^2 \dot{\gamma} \eta_f \quad \dots(1.7)$$

donde η_f es la viscosidad del fluido base. Una medida de estas dos fuerzas las define como el número de Mason (Mn):

$$Mn = \frac{F_{\eta}}{F_p} = \frac{\eta_f \dot{\gamma}}{2\epsilon_o \epsilon_f (\beta E)^2} \quad \dots(1.8)$$

Se considera que el movimiento Browniano por agitación térmica no tiene una contribución importante al comportamiento macroscópico del efecto ER, ya que el tamaño de las partículas (del orden de micras) es grande en comparación con las moléculas del fluido base.

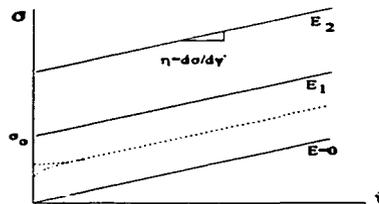


Fig. 1.6. Comportamiento reológico de un fluido ER.

Al suponer un comportamiento del tipo Bingham, Marshall encuentra que el esfuerzo de corte está dado por [52]:

$$\sigma = \sigma_0 + \eta \dot{\gamma} = \sigma_0 (1 + AMn) \quad \dots(1.9)$$

donde A es una constante numérica aproximadamente igual a 1 y el esfuerzo de cedencia (σ_0) está dado por

$$\sigma_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \phi (\alpha \beta E)^2 \quad \dots(1.10)$$

siendo ϕ la fracción volumétrica de partículas.

De esta manera, al aplicar el campo eléctrico y cuando $\sigma < \sigma_0$, el material se comporta como un sólido, es decir, a velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) cero experimentan un deslizamiento elástico en esta región [8]. A bajas velocidades de corte se ha observado experimentalmente un comportamiento reológico no lineal y en algunos casos se ha reportado una especie de histéresis, como se muestra en la figura 1.6 mediante la línea punteada. Asimismo, la viscosidad disminuye a muy altas velocidades de corte, del orden de 1000 s^{-1} , hecho que fue predicho teóricamente por Halsey [34].

Se ha propuesto [45,34] que el origen del esfuerzo de cedencia se debe a que se requiere de una fuerza mínima necesaria para romper las cadenas de partículas y que existe un ángulo crítico entre partículas para el cual se mantienen unidas, éste se puede calcular a partir de la energía de interacción entre dos dipolos [38]:

$$W_{12} = \frac{\overline{P_1} \cdot \overline{P_2} - 3(\hat{n} \cdot \overline{P_1})(\hat{n} \cdot \overline{P_2})}{|\overline{x_1} - \overline{x_2}|^3}, \quad \dots(1.11)$$

siendo $\overline{P_1}$ y $\overline{P_2}$ los momentos dipolares de las partículas 1 y 2 localizadas en las posiciones $\overline{x_1}$ y $\overline{x_2}$,

respectivamente, y \hat{n} un vector unitario definido como:

$$\hat{n} = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{|\overline{x_1} - \overline{x_2}|} \quad \dots (1.12)$$

como se indica en la figura 1.7. Al aplicar un campo eléctrico uniforme, ambos dipolos están orientados en la dirección del campo, entonces,

$$W_{12} = \frac{P^2 (1 - 3 \cos^2 \theta)}{r^3} \quad \dots (1.13)$$

donde r es la separación entre los dipolos y θ es el ángulo formado por \hat{n} y \overline{P} .

Al igualar a cero la ecuación 1.11 se obtiene $\theta_c = 54.7^\circ$. Es decir, la interacción dipolo-dipolo puede ser atractiva o repulsiva, dependiendo de la orientación de éstos. Existe un ángulo crítico (θ_c), para el cual la interacción es repulsiva $\theta > \theta_c$. Por lo tanto, en una cadena formada por dipolos, cuando su inclinación respecto al campo eléctrico es mayor que θ_c , la estructura se desintegra debido a que la fuerza dipolar se torna repulsiva.

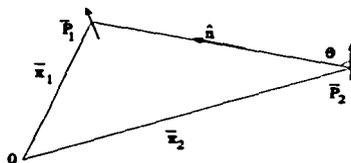


Fig. 1.7. Posición relativa de dos dipolos.

1.3 Modelos del efecto ER

Hasta el momento no existe una teoría general que explique el efecto ER, debido a que el modelar una concentración alta de partículas polarizables bajo un campo eléctrico o en condiciones de flujo es un problema complejo de reología. Sin embargo, existen algunas teorías que explican parcialmente el efecto ER para bajas concentraciones de partículas. En todas ellas existe un consenso general en que el primer paso es la polarización bajo la influencia de un campo eléctrico. Esto induce una interacción atractiva entre las partículas formando cúmulos (o cadenas) que sometidas a un campo de esfuerzos que da como resultado el efecto ER.

La primer teoría del efecto ER la postuló Winslow quien demostró que la formación de cadenas al aplicar un campo eléctrico es una consecuencia directa de la atracción entre partículas. Cuando las partículas -cuya permitividad dieléctrica difiere de la del líquido- se someten a un campo eléctrico, se polarizan dando lugar a la distorsión del campo eléctrico local. El efecto de un campo eléctrico no uniforme sobre partículas polares, con carga neta igual a cero, da como resultado una fuerza mecánica, provocando la formación de cadenas de partículas entre electrodos. Las partículas se mantienen unidas por fuerzas electrostáticas y son capaces de evitar el flujo. Cuando éstas se someten a un esfuerzo de corte, mayor que el esfuerzo de cedencia, se establece un equilibrio entre formación y rompimiento de cadenas. Cuando se retira el campo eléctrico las partículas retornan a una distribución aleatoria, permitiendo el flujo.

A pesar de que el modelo de Winslow cualitativamente es correcto, existen varios aspectos que no están incluidos en el modelo, tales como la complejidad de la geometría de las partículas y de la estructura de las cadenas. Por lo que han surgido varios modelos complementarios, que se describen a continuación.

Los experimentos indican que algunas mezclas sólo manifiestan efecto ER cuando está presente una pequeña cantidad de agua o algún aditivo polar. Para explicar el papel del agua en el efecto ER Stangroom [71] propone que el agua actúa como un puente entre partículas (Fig. 1.8) por un proceso de electroosmosis. Se sugiere que el requerimiento mínimo para que se produzca el efecto ER es la presencia de un líquido hidrofóbico y partículas porosas hidrofílicas, de manera

que el agua presente en el compuesto sea absorbida por las partículas. Además, se supone que existen iones móviles dentro de los poros de las partículas. Así, al aplicar el campo eléctrico los iones son atraídos por el electrodo de carga opuesta llevando consigo el agua y formando una película entre las partículas. Al aplicar un esfuerzo, las partículas se mantiene unidas por la película de agua que se deforma debido a la tensión superficial. Al quitar el campo eléctrico se despolarizan y el agua retorna a los poros.

En muchos sistemas, por ejemplo los que contienen sílice, se ha visto que el efecto ER decrece al evaporarse el agua. Aunque es posible la existencia de este mecanismo, no es obvio que al quitar el campo eléctrico se rompa el enlace y el agua retorne hacia cada partícula. Además, algunos sistemas libres de agua presentan efecto ER, tales como: partículas semiconductoras y aluminio silicatos anhidros, lo que sugiere que no es necesaria el agua para que se manifieste el efecto ER.



Fig. 1.8. Modelo de Stangroom: puentes de agua entre partículas.

Una de las teorías más importantes del efecto ER desarrollada por Mason [13,14,26,55-57] considera suspensiones con una fracción volumétrica < 0.02 , sometidas a la influencia simultánea del campo eléctrico y del esfuerzo de corte. Se predice un pequeño incremento en la viscosidad intrínseca de una suspensión debido al alineamiento de partículas en la dirección del campo. La magnitud de la viscosidad de la suspensión se obtiene como la suma de esfuerzos; los debidos al medio suspendido y los originados por el efecto del campo eléctrico en las partículas. Se encuentra que la razón entre la viscosidad de la suspensión sin campo y la correspondiente al aplicar el campo se expresa como el cociente de la fuerza viscosa y la fuerza de polarización, denominado número de Mason, ecuación 1.8.

Posteriormente, Adriani y Gast [1] presentan un modelo del efecto ER en sistemas con alta concentración de partículas. Consideran que la interacción dipolar provoca la aglomeración de las partículas en una suspensión anisotrópica, caracterizada por una distribución de probabilidad. A partir de una perturbación en la distribución de partículas originada por un flujo oscilatorio de alta frecuencia y baja amplitud, ellos calculan el módulo elástico y la viscosidad dinámica en función de la concentración y la intensidad del campo eléctrico. Encuentran que tanto el módulo elástico como la viscosidad dinámica se incrementan con la concentración de partículas. Sin embargo, la viscosidad dinámica es independiente del campo eléctrico. Este modelo está limitado a un flujo oscilatorio de alta frecuencia, donde sólo se consideran la interacción entre dos dipolos, es decir, no considera interacciones múltiples.

1.4 Composición y materiales

Un fluido ER se compone principalmente de partículas polarizables suspendidas en un líquido dieléctrico (fluido base). Son múltiples las formulaciones que presentan el efecto ER y la característica común entre ellas es que inducen una polarización dentro o en la interfase de las partículas que da origen al efecto ER, siendo consecuencia de las propiedades físicas y químicas de los componentes. En la tabla 1.2 se muestran algunas de las formulaciones, considerando los elementos más representativos.

1.4.1 Fluido Base

En teoría se predice el efecto ER para un sistema bifásico donde hay una diferencia sustancial en permitividades. Normalmente la fase líquida es el componente de baja permitividad. En este caso es deseable una baja conductividad eléctrica para evitar un excesivo consumo de potencia, recordando que se requieren campos mayores a 1 kV/mm. Entre otras características deseables del medio dispersante se encuentran: baja viscosidad, hidrofóbicos, alto punto de ebullición, bajo punto de congelamiento y alta rigidez dieléctrica.

En general, en las formulaciones se emplean casi cualquier tipo de aceites lubricantes o grasas como fase dispersante y éstas en combinación con la partícula juega un papel importante para hacer efectiva la polarización. Los fluidos base tradicionalmente empleados son aceite de transformador, aceite de silicon, aceite mineral de tipo nafténico y parafínico, etc., caracterizados por una baja permitividad relativa (2-2.5) y alta resistividad eléctrica (10^{13} - 10^{14} Ω -cm).

1.4.2 Partículas y aditivos

Existe una gran diversidad de partículas empleadas en la composición de los fluidos ER. Estas pueden ser aislantes tales como gel de sílice, arcillas, almidón, alumina y aluminosilicatos. La mayoría de estos sistemas se activan con agua u otros fluidos polares como glicerina y alcohol [61,72,85]. También la adición de surfactantes o de sales activan el efecto ER [40,64]. El factor común en estos sistemas es la conducción iónica, como lo es en los polielectrolitos, polianfolitos o medios porosos que soportan la adición de medios acuosos u otros líquidos conductores. Son numerosos los estudios que reportan la necesidad de agua para activar el efecto ER. La cantidad requerida para optimizar el efecto ER es del 5-10% en peso. El exceso de agua provoca un decaimiento en el esfuerzo de corte precedido por el incremento en la conducción eléctrica. Por otro lado, debido a la viscosidad y al flujo de corriente eléctrica, la mezcla tiende a calentarse. Esto trae consigo que el agua se evapore y consecuentemente disminuye el efecto ER y la reproductibilidad de sus propiedades. Esto limita la temperatura de operación de los fluidos ER. La presencia de aditivos polares es aún objeto de polémica, ya que algunos autores la consideran como indispensable para que se manifieste el efecto ER. La teoría de los puentes de agua predice que el agua tiene un papel específico en el efecto ER [71].

Para evitar el uso de aditivos polares se han usado desde partículas semiconductoras (Si, Ge), hasta partículas conductoras como Al, Fe, Ag, Na, K, Mg, Zn, etc., recubiertas de una película aislante para reducir la corriente eléctrica e inducir la polarización en la interfase. Otra forma de limitar la corriente podría ser por medio de la frecuencia del campo eléctrico, de modo que el tiempo de relajación dieléctrica sea menor que la frecuencia del campo, sin embargo el

intervalo de frecuencia puede estar limitado por el tiempo de respuesta del fluido ER, como se discutirá en los capítulos 4 y 5. Se ha manifestado el efecto ER en otro tipo de sistemas tales como con titanato de calcio, titanato de bario y algunos tipos de polvos de materiales piezoeléctricos, en los que no se reporta la presencia de aditivos iónicos [61]. Para éste tipo de partículas se añade comúnmente un surfactante para reducir la sedimentación y conservar homogénea la mezcla. La función de surfactante es la de estabilizar la suspensión mediante un agente químico, como por ejemplo un detergente, que actúa como un puente entre la partícula y el fluido base (o medio dispersante), aumentando la tensión superficial.

Se ha propuesto que la conductividad eléctrica de las partículas tiene un papel específico en el efecto ER. Se piensa que los materiales de conductividad eléctrica muy baja (menor a 10^{-5} S·m⁻¹) no pueden dar una polarización efectiva debido a que el flujo tiende a rotar las partículas y que la movilidad de las cargas es tan baja que no puede haber polarización. Probablemente una alternativa sean los polímeros semiconductores [8], además que se evitaría el uso de aditivos polares y la sedimentación de las partículas al ser estos normalmente de menor densidad. En particular se propone el uso de dos clases de polímeros: las poli-(aceno-quinona) [69] y la polianilina [53]. La conductividad de estos polímeros se puede controlar mediante la elección del aceno en el caso de las poliacenoquinonas y por el tratamiento con una solución buffer para generar la forma de emeraldina en la polianilina para reducir la fracción de residuos ácidos.

Existen otros parámetros que afectan la respuesta electroreológica, tales como: el tamaño, forma y concentración de partículas que se discutirán a continuación.

1.4.3 Forma de las partículas

Gast y Zukoski [25] establecen que partículas anisotrópicas tienden a alinearse más fácilmente. En la práctica, las partículas usadas presentan una forma irregular, donde no existe una orientación hidrodinámica dominante. Sin embargo, se encuentra poca información en la literatura que permita una discusión profunda en este aspecto.

Tabla. 1.2. Elementos representativos de formulaciones de fluidos ER

Partícula	Fluido	Surfactante	Aditivo	Ref.
Gel de sílice	Gasolina blanca, aceite de transformador, dibutil sebacato, di-2-ethyl-hexyl adipato.	-sorbitol sesquiolato, oleato:ferroso, de sodio, naftenato de plomo, naftenato de sodio, borax ,hidrato metálico polioxialkileno derivado del oleato de sorbitol.	- Agua, glicerina, dietilenglicol monoetil ester	[85]
	Aceites mineral , kerosina.	-Diesteato de Al, triesteato de Al, esteato de Li, ricinoleato de Li ,fenil-alfa-naftil amina, cloruro de lauril piridinio, óxido de estaño.	---	[86]
	-Aceite de silicón	-Polisiloxanos con grupos funcionales Hidroxi-, acetoxi-, amino- y alkoxi-.	---	[28]
	- Hidrocarburos líquidos, parafinas, olefinas, aromáticos	-Polímeros conteniendo grupos nitrógeno e hidroxilo.	---	[29]
-Alumino silicatos (superficie Al/Si = 0.15-0.8).	-Todos los fluidos anteriores, aceite de silicon, isododecano.	-Polisiloxanos con grupos funcionales Hidroxi-, acetoxi-, amino- y alkoxi- sesquiolato de sorbitan, tetradecilamina, 2-heptadecenil-4, 4 (5H)-oxazol dimetanol.	---	[30]
-Zeolitas conteniendo cation metálico.	-Todos los anteriores.	---	---	[22]

<p>-Celulosa microcristalina</p>	<p>-Aceite hidráulico, parafina líquida, aceite de silicón, dibutil sebacato, ácido oleico, ortoclorotolueno.</p>	<p>---</p>	<p>-Agua, NaCl, forma mida, LiCl, alcohól, KCl, cloruro de amonio, acetato de sodio.</p>	<p>[73]</p>
<p>-Partículas metálicas/ aleaciones (i.e. Al, ZN, Fe, W, sílice, Pd, Cu-Ni, bronce, acero, monel, etc), Si, Ge o líquidos (agua con sales, ácido sulfúrico, HCl, o ácido acético) con una cubierta aislante (poliuretano, nylon, elastómeros de nitrilo, epoxies), cerámicas, arenas, cemento, hule, teflón vidrio, etc.</p> <p>-Metales (i.e. Al, Cr, Ti, Sn), semiconductores (i.e. carbon, disulfuro de molibdeno, Si, Ge), cristales dicroicos de varias geometrías (i.e. planas, circulares).</p> <p>-Fibras de grafito</p>	<p>Todos los fluidos anteriores (i.e. aceite de silicon, aceite parafínico)</p> <p>-Percloroetileno y mezcla de éster, aceite de silicón, ésteres alifáticos, plastificantes alifáticos, halogenados aromáticos, fluorocarbonados.</p> <p>-Keroseno, benceno, aceite dieléctrico</p>	<p>Incorporación de esferas de vidrio o gas atrapado en cubiertas aislantes</p> <p>-Surfactantes poliméricos.</p> <p>---</p>	<p>---</p> <p>---</p> <p>---</p>	<p>[64]</p> <p>[51]</p> <p>[59]</p>
<p>-Acido angónico, resinas de intercambio ionico, alcoholes polivinílico, sorbitol, manitol, monosacaridos.</p> <p>-Alcoholes polihídricos, vinil, olefinas, copolímeros de ácido acrílico, metil acrilato, metil metacrilato, ácido maleico, anhídrido maleico, N-vinilpirrolidona, divinil benceno, ácido metacrílico, dialil éter.</p> <p>-Sistemas de porfirinas y azaporfirinas, poli(acenoquinonas), bases de Schiff poliméricas, ftalocianinas, metalofalocianinas, policíclicos fusionados insaturados, conductores y semiconductores.</p>	<p>Cloruro de trifluorovinilo, xileno, bifenilpoliclorado, p-clorotolueno, tolueno fluorolube, Aroclor, tetracloruro de carbono, cloroformo, nitrobenzeno, clorobenceno.</p> <p>-Todos los anteriores</p> <p>-líquidos aromáticos halogenados, aceite parafínico clorinado.</p>	<p>-Monocoleato y sesquiolato de sorbitan .</p> <p>-Todos los anteriores</p> <p>---</p>	<p>-Agua</p> <p>-Agua, metales ionicos, iones orgánicos.</p> <p>---</p>	<p>[69]</p> <p>[70]</p> <p>[9]</p>

1.4.4 Tamaño y concentración de partículas

La concentración de partículas constituye uno de los parámetros más importantes que afectan el efecto ER. En la teoría de Mason se predice el comportamiento ER para suspensiones diluidas de partículas esféricas. Esta teoría debiera extenderse para concentraciones altas donde se tome en consideración la interacción de muchos cuerpos, dado que en la práctica se emplean concentraciones muy altas. La concentración volumétrica de partículas en el intervalo de $0.1 \leq \phi \leq 0.4$ es la óptima para que la suspensión tenga una fluidez adecuada sin campo y un incremento considerable del esfuerzo de corte al aplicar el campo [8].

La mayoría de las partículas empleadas en los fluidos ER son en forma de polvos finos. El diámetro de partícula está en el intervalo de 0.04-100 μm . Para partículas mayores la respuesta electroreológica puede ser muy lenta y poco útil para aplicaciones prácticas. El límite inferior se establece debido a que la obtención de partículas más pequeñas es difícil, sin embargo, debe de existir un límite inferior debido a que el movimiento Browniano tiende a competir con las fuerzas que inducen el efecto ER. Una teoría reciente [1] predice que sólo cuando las fuerzas térmicas dominan sobre las de polarización existe una influencia del tamaño de partícula. Por lo tanto, en fluidos donde dominan las fuerzas de polarización no afecta el tamaño de partícula.

1.5 Aplicaciones tecnológicas

Gran parte del interés surgido en la última década hacia los fluidos ER se debe a las aplicaciones tecnológicas potenciales que representan. Una de las propiedades de los fluidos ER que ha generado el mayor interés es la rápida velocidad de respuesta (\sim mseg) y el incremento en el esfuerzo de cedencia. Así, un fluido ER sin campo eléctrico se comporta como un líquido el cual fluye al mínimo esfuerzo. Al aplicar el voltaje, el fluido ER se puede comportar como un gel, generando una alta resistencia al flujo. Estas características hacen posible su aplicación en sistemas de retroalimentación para robótica y aplicaciones en la industria automotriz. Dando origen a dispositivos electromecánicos inteligentes, capaces de controlar y transmitir fuerzas mecánicas.

Muchas de las aplicaciones de los dispositivos ER se basan en la válvula electroreológica. En ella la suspensión se bombea a través de un capacitor que actúa como canal. El campo eléctrico regula la resistencia al flujo hasta al grado que puede cesar el flujo cuando el material solidifica.

Entre las aplicaciones en la industria automotriz se encuentran:

- a) Amortiguador.- se puede incorporar la válvula ER a un amortiguador (Fig. 10a) donde el desplazamiento del pistón es controlado por la resistencia al flujo generado en la válvula.
- b) Embrague ER.- consiste de un disco simple, el cual está rodeado de fluido ER. El embrague se engancha cuando el fluido ER solidifica.
- c) Montaje de maquinaria o absorbedor de impacto. En este dispositivo se explota la capacidad del fluido ER de modificar su comportamiento reológico y así variar la respuesta de amortiguamiento en función de la frecuencia natural del sistema.

Un fluido ER debe cumplir con una serie de propiedades para hacer factible su aplicación en dispositivos electromecánicos, como se resume en la tabla 1.3. En los últimos años se han desarrollado formulaciones más estables químicamente, menos abrasivas con baja sedimentación y baja densidad de corriente. Sin embargo, persiste un serio impedimento para la comercialización, que es el nivel de esfuerzo de cedencia debido a la debilidad estructural que presentan. Considero que si se desean diseñar dispositivos ER es necesario tener un mejor entendimiento del efecto ER.

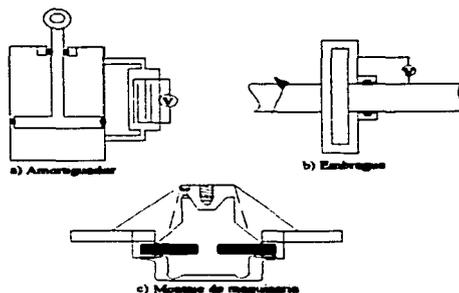


Fig. 1.10. Aplicaciones comerciales de los fluidos ER.

Existe otro tipo de material que presentan propiedades análogas, conocidos como fluidos magnetorreológicos (MR). Estos son una mezcla de partículas magnéticas suspendidas en un fluido lubricante. Bajo la acción de un campo magnético intenso, del orden de 1 tesla, un fluido MR modifica sus propiedades reológicas [11,68].

Existen múltiples analogías entre los fluidos ER y MR. Ambos son mezclas de partículas, con un tamaño de 0.1 a 100 μm , suspendidas en un fluido lubricante. En los dos materiales la concentración volumétrica de partículas es entre el 20% y el 40%. La manifestación del incremento en el esfuerzo de cedencia se debe a cambios estructurales al aplicar el campo eléctrico o magnético, según sea el caso, y se atribuye a la formación de cadenas de partículas en la dirección del campo.

Sin embargo, los fluidos MR se distinguen por el alto esfuerzo de cedencia que desarrollan, como se puede apreciar en la tabla 1.4, pero presentan problemas graves de sedimentación, ya que se usan normalmente partículas con una densidad mucho mayor que la del líquido base, y es difícil estabilizarlos aún con surfactantes. Además, las partículas son altamente abrasivas, lo que limita su aplicación tecnológica.

Tabla 1.3 Requerimientos mínimos en un fluido ER

Propiedad	valor requerido
Esfuerzo de cedencia	> 3 kPa
Densidad de corriente a 4 kV/mm	< 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Viscosidad	0.1 - 0.3 Pa.s
Temperatura de operación	-40°C a 200°C
Rigidez dieléctrica	> 5 kV/mm
Tamaño de partícula	-10 μm
Estabilidad	baja sedimentación no electroforesis estabilidad química baja volatilidad
Otros requerimientos	no tóxico no abrasivo no corrosivo no-inflamable

La energía necesaria para generar el campo eléctrico en los fluidos ER y el campo magnético en los MR, se puede considerar que es la misma. En los primeros se requiere un campo eléctrico alto con baja densidad de corriente. En cambio en los últimos se requiere una alta corriente y bajo voltaje.

Tabla 1.4. Datos comparativo entre fluidos ER y MR.

Propiedad	Fluidos ER	Fluidos MR
Intensidad de campo	2-5 kPa (3-5 kV/mm) Campo limitado por la rigidez dieléctrica del material	50 - 100 kPa (150-250 kA/m) Campo limitado por la saturación magnética de la partícula
Viscosidad	0.2 - 0.3 Pa.s (T=25°C)	0.2 - 0.3 Pa.s (T=25°C)
Temperatura de operación	10°C - 90°C (en DC) -25°C - 125°C (en AC)	-40°C - 150°C (en DC) limitado por el fluido dispersante
Densidad de corriente	2 - 15 mA/cm ² (4kV/mm, T=25°C)	se puede energizar con imanes permanentes
Gravedad específica	1-2.5	3-4

Si se considera el cociente entre la potencia requerida en cada material como:

$$\frac{W_{MR}}{W_{ER}} = \frac{V_{ER}}{V_{MR}} \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{BH} \quad \dots(1.12)$$

Tomando los valores típicos de estos parámetros, $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$, $\epsilon/\epsilon_0=10$, $E=4$ kV/mm, $B=0.8$ Tesla y $H=2 \times 10^5$ Oe, se tiene $W_{ER}/W_{MR}=1$, lo que significa que la potencia requerida de la fuente de alimentación para generar cada campo, ya sea eléctrico o magnético, es esencialmente la misma.

Aún cuando ambos materiales representan un área interesante de investigación y posibilidades de aplicaciones tecnológicas, en este trabajo nos concentraremos *exclusivamente* al estudio de los fluidos ER.

CAPITULO 2

Procedimiento Experimental

El interés tecnológico en los fluidos ER se centra en la potencialidad de estos fluidos para aplicaciones en sistemas electromecánicos, donde se requieren variables de control que le permita ajustarse rápidamente. Las propiedades básicas que permitirían su utilización en dispositivos como sistemas de control de vibraciones, amortiguadores, embragues, etc., son el incremento en el esfuerzo de cedencia, llegando a ser del orden de kPa, y el tiempo de respuesta, requiriéndose de unos milisegundos.

Para la medición del esfuerzo de cedencia en fluidos ER se utilizan las técnicas reológicas tradicionales [42,71]. Sin embargo, para el tiempo de respuesta generalmente se asume que es del orden de milisegundos, basados en la primera publicaciones de Winslow. No obstante, se encuentra que éste varía dependiendo del material, puede ser menor que un milisegundo hasta mayor de un segundo [78].

Se han empleado diferentes técnicas para medir el tiempo de respuesta, debido a que la transición estructural que experimentan estos materiales afecta las propiedades ópticas, acústicas, hidráulicas y reológicas [49]. En la medición del tiempo de respuesta por métodos ópticos se han usados principalmente dos técnicas: 1) la observación en microscopio donde se mide el tiempo que tarda en formarse la primera cadena entre electrodos [36], 2) dispersión óptica, donde se cuantifica el tiempo de respuesta mediante el cambio en la opacidad o turbulencia [12,39]. Además, también se utilizan técnicas reológicas para medir el tiempo de respuesta, empleando un par de placas paralelas, donde bien se puede deslizar una placa y medir el esfuerzo de corte, o mantener las placas fijas, permitiendo el flujo del material entre estas y medir el cambio en la presión. La

configuración más usual es en la que se mide el cambio en la presión al pasar el fluido ER a través de una válvula (o canal) al aplicar el campo eléctrico [19].

La diversidad de técnicas y condiciones de evaluación dificulta la comparación de datos ya que cada investigador define el tiempo de respuesta de acuerdo a su criterio. Pudiendo por ejemplo ser el período de tiempo que le toma a un fluido ER reaccionar al incremento en el voltaje y formar la primer cadena de partículas entre los electrodos o el tiempo que le toma alcanzar el estado estacionario, es decir, cuando el esfuerzo de corte es constante con el tiempo.

La formación de la primera cadena de partículas no garantiza que el material manifieste un cambio en la propiedades macroscópicas, como lo es el incremento en el esfuerzo de cedencia y mucho menos que el material alcance el estado estacionario, quizá marque el inicio del cambio en las propiedades reológicas. Por medio de la dispersión de luz se mide el cambio en la opacidad del fluido ER al aplicar el campo eléctrico, pero está limitada debido a que una vez que se ordenan todas las partículas ya no presenta cambios, es decir, se satura la estructura aunque puede continuar el incremento en el esfuerzo de cedencia a campos mayores.

Cabe mencionar que la principal dificultad que se encuentra al medir el cambio de presión a través de un canal es que las partículas tienden a separarse del fluido y aglomerarse en capas. El problema se acentúa si las partículas son grandes o si el fluido es de baja viscosidad. Esto provoca que la presión varíe con el tiempo y se genere una especie de histéresis [78].

La técnica por la que se ha optado en este trabajo se encuentra dentro de las reológicas. Se usa un viscosímetro de platos paralelos, donde uno de ellos rota a una velocidad constante y el otro se mantiene fijo. El tiempo de respuesta se estima mediante el análisis del estado transitorio que inicia al aplicar el campo eléctrico. Con ésta técnica los resultados contienen tanto información de la dinámica del equipo experimental como de la cinética de la formación de la estructura responsable del cambio en las propiedades reológicas. Por tanto, es necesario hacer un análisis del estado dinámico transitorio para extraer la información concerniente a la respuesta transitoria real del fluido ER. Para ello hemos desarrollado un modelo con el fin de cuantificar la participación del sistema de medición, como se discutirá en la sección 2.2.

2.1 Descripción del equipo

Se presenta el criterio de diseño del electroviscosímetro y la calibración del mismo mediante el empleo de un fluido de viscosidad conocida. Así mismo se estima el error porcentual en las mediciones.

2.1.1 Diseño del electroviscosímetro

Existen varios tipos de viscosímetros rotacionales y capilares. Los viscosímetros rotacionales emplean diferentes geometrías, como: cilindros concéntricos, plato-cono y discos paralelos [18,77]. Para caracterizar los fluidos ER se requiere aplicar un campo eléctrico uniforme (del orden de kV/mm), de manera que estas configuraciones tengan también la función de un capacitor. La geometría más conveniente es la de platos paralelos y la de cilindros concéntricos. Sin embargo, con los cilindros concéntricos se requiere una alineación completa, debido a que normalmente la separación entre cilindros es muy pequeña. Es por ello que se eligió la geometría de platos paralelos y al mismo tiempo garantizar la uniformidad del campo.

En el viscosímetro de platos paralelos o de flujo de torsión, la muestra se coloca entre dos discos coaxiales paralelos de radio R separados por una distancia h . Uno de los discos rota a velocidad angular constante ω , mientras que el otro se mantiene fijo. El torque τ transmitido hacia el disco fijo a través del fluido está dado por [77]

$$\tau = \frac{2\eta\pi R^4\omega}{h} = 2\pi\eta\dot{\gamma}R^3 \quad \dots (2.1)$$

El viscosímetro se acopla a la celda para pruebas de torsión de una máquina universal de pruebas mecánicas (Instron, modelo 1125) para poder registrar el torque como función del tiempo. En este equipo la escala mínima es de 0-1 N-m, con una sensibilidad de 0.01 N-m

El diseño de las dimensiones de los discos se hizo a partir de la ecuación 2.1. El radio se calculó en función de la máxima sensibilidad del equipo. Sustituyendo los valores, $\tau = 0.01$ N-m,

$h = 0.003$ m, $\omega = 1$ rpm $= 0.1047$ rad/s y $\eta = 1$ Pa-s (viscosidad del aceite de silicón 1000) en la ecuación (2.1), se obtiene $R = 6.1$ cm, siendo el radio mínimo con el que se puede registrar el torque. Para fines prácticos de construcción se decidió tomar $R = 6.5$ cm. Este es el radio de la placa que se acopla a la celda de torsión.

La figura 2.1 muestra el arreglo experimental. Los discos también tiene la función de electrodos, ya que son conductores (de acero inoxidable), de 13 cm de diámetro el superior y 15 cm el inferior. El electrodo superior acoplado a la celda de torsión se conecta a tierra, éste rota un pequeño ángulo en función del torque transmitido por el fluido. Para la capacidad máxima en torque que registra el equipo es de 224 N-m, la cual le corresponde un ángulo de rotación de 0.45° . El electrodo inferior se fija al sistema de rotación de la Instron, y se conecta a la fuente de alto voltaje mediante un balero que permite la rotación libre y garantiza la continuidad eléctrica.

La fuente de voltaje envía simultáneamente una señal al electrodo superior y al osciloscopio, pasando previamente por un reductor de voltaje. El control de la Instron permite variar la velocidad de rotación de 1, 4, 10, 20, 40 y 100 rpm. El torque transmitido por el fluido al disco superior se registra simultáneamente en el graficador y el osciloscopio. El osciloscopio se programa para que inicie el registro al aplicar el impulso de voltaje. Esta adaptación permite que el equipo funcione como un electroviscosímetro, donde la velocidad de corte se expresa como:

$$\dot{\gamma} = \frac{R\omega}{h}, \quad \dots (2.2)$$

y el esfuerzo de corte, sin considerar los efectos de borde, está definido como [77]:

$$\sigma = \frac{\tau}{2\pi R^3}. \quad \dots (2.3)$$

Las dos expresiones anteriores se emplean para las gráficas de σ vs $\dot{\gamma}$, ya que experimentalmente se mide ω y τ .

2.1.2 Calibración

Se mide la viscosidad de un fluido estándar del tipo Newtoniano (Brookfield viscosity standard, fluid 60 000) de viscosidad $\eta = 59.5$ Pa-s. Se realizan dos mediciones sin aplicar voltaje, variando la separación de las placas, 2 y 3 mm. En las tablas 2.1 y 2.2 se muestran los resultados. La velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad se calculan usando las ecuaciones 2.1 - 2.3.

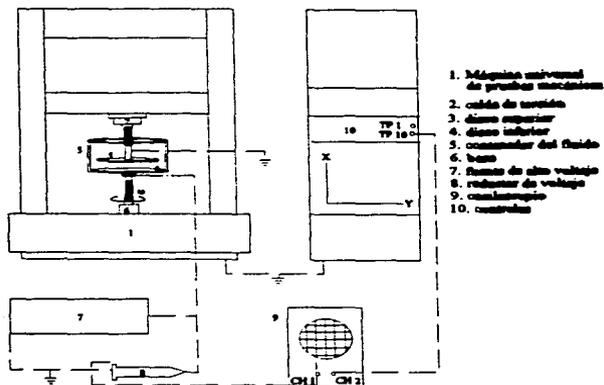


Fig. 2.1 Arreglo experimental del electroviscosímetro.

Tabla 2.1. Calibración Electroviscosímetro
 Brookfield Standard Fluid 60 000 ($\eta = 59.5$ Pa-s). $h = 2$ mm.

γ_R (s^{-1})	τ (N-m)	σ (Pa)	η (Pa-s)
0.34	0.0112	6.49	57.225
0.68	0.0224	12.98	57.225
1.36	0.0448	25.96	57.225
3.40	0.112	64.90	57.225
6.80	0.224	129.81	57.225
13.61	0.448	259.63	57.225
34.02	1.12	649.07	57.225
68.05	2.128	1233.25	54.364

Tabla 2.2. Calibración Electroviscosímetro
Brookfield Standard Fluid 60 000 ($\eta = 59.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), $h = 3 \text{ mm}$.

$\gamma_R \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$\tau \text{ (N}\cdot\text{m)}$	$\sigma \text{ (Pa)}$	$\eta \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$
0.226	0.007	4.219	55.79
0.453	0.016	.736	64.37
0.907	0.028	16.226	53.64
2.268	0.078	45.435	60.08
4.537	0.156	90.871	60.08
9.074	0.336	194.72	64.37
22.685	0.784	454.35	60.08
45.37	1.568	908.711	60.08

Con respecto a la especificación del fluido ($\eta = 59.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) la mayor diferencia se obtiene con una separación de $h=3 \text{ mm}$ debido a que la mayor separación de discos provoca un flujo menos uniforme. Para las mediciones posteriores se elige la separación de 2 mm , cuyo error es 4% . Este valor se calcula en relación a la viscosidad especificada del fluido estándar.

2.2 Análisis de la dinámica del sistema de medición disco-fluido

En el viscosímetro de platos paralelos o de flujo de torsión, la muestra se coloca entre dos discos coaxiales paralelos de radio R separados por una distancia h (Fig. 2.2). En condiciones estacionarias, un disco se mantiene fijo ($\Omega=0$) y el otro rota a una velocidad constante (ω). Al aplicar voltaje al fluido ER se incrementa el torque. Durante el transitorio el disco superior gira un ángulo en función del incremento en torque, siendo $\Omega \neq 0$. Dividimos el análisis en dos secciones, una cuando $\Omega=0$, es decir, en el estado estacionario y la otra cuando $\Omega \neq 0$ que corresponde al estado transitorio. En este último caso, desarrollamos un modelo para separar las dos contribuciones a los resultados experimentales, a saber, la dinámica del sistema de discos paralelos y la cinética del fluido ER.

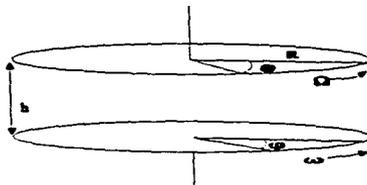


Fig. 2.2. Sistema de discos paralelos.

2.2.1 Estado estacionario ($\Omega=0$)

En estas condiciones, la relación entre el esfuerzo de corte y el torque que se ejerce en el disco fijo se expresa como [18]:

$$\dot{\gamma}_R^3 \tau = 2 \pi R^3 \int_0^{\dot{\gamma}_R} \dot{\gamma}^2 \sigma d\dot{\gamma} \quad \dots (2.4)$$

donde la velocidad de corte en un punto r , con $0 \leq r \leq R$, es:

$$\dot{\gamma}_r = \frac{\omega r}{h} = \frac{r}{h} \frac{d\phi}{dt} \quad \dots (2.5)$$

Considerando que se tiene un fluido de Bingham, entonces

$$\dot{\gamma}_R^3 \tau = 2 \pi R^3 \int_0^{\dot{\gamma}_R} \dot{\gamma}^2 [\sigma_o(E) + \eta \dot{\gamma}] d\dot{\gamma}, \quad \dots (2.6)$$

integrando se obtiene

$$\tau_{ER} = \pi R^3 \left[\frac{2}{3} \sigma_o(E) + \frac{\eta}{2} \dot{\gamma}_R \right] \quad \dots (2.7)$$

Es decir, el torque en el fluido ER es proporcional al esfuerzo de cedencia y a la viscosidad del fluido.

2.2.2 Estado transitorio ($\Omega \neq 0$)

Cuando se aplica voltaje al fluido ER el disco que sensa el torque, inicialmente fijo, gira un ángulo proporcional al incremento en el torque durante el transitorio. De modo que hay una diferencia de velocidades entre los discos, por lo tanto la velocidad de corte $\dot{\gamma}_R$ en una forma general, está dada por

$$\dot{\gamma}_R = \frac{R}{h} (\omega - \Omega), \quad \dots (2.8)$$

siendo $\Omega = d\theta/dt$ la velocidad del disco superior. Así, el torque ejercido por el fluido ER se expresa como,

$$\tau_{ER}(t,E) = \pi R^3 \left[\frac{2}{3} \sigma_o(t,E) + \frac{\eta R}{2h} (\omega - \Omega) \right]. \quad \dots (2.9)$$

El esfuerzo de cedencia es función del campo eléctrico. Sin embargo, no se incrementa de manera instantánea, siendo además una función del tiempo, es decir, $\sigma_o = \sigma_o(t,E)$.

El sensor puede considerarse como un resorte de torsión que opone un torque proporcional al ángulo:

$$\tau_{Res} = -k\theta \quad \dots (2.10)$$

siendo k la constante propia del sensor. Para nuestro caso en particular, esta constante se puede calcular de las especificaciones de la máquina universal de pruebas mecánicas, siendo $\theta = 0.45^\circ$ en la máxima escala $\tau = 224 \text{ N}\cdot\text{m}$, entonces $k = 2.8521 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Considerando estas dos contribuciones al torque total sobre el disco superior, la ecuación de movimiento para el disco superior se obtiene a partir de

$$\tau_{ER} - \tau_{Res} = I \frac{d\Omega}{dt} \quad \dots (2.11)$$

donde I es la inercia del sistema.

Sustituyendo las ecuaciones 2.9 y 2.10 en 2.11 se obtiene

$$\tau_{ER}(t, E) = I \frac{d^2\theta}{dt^2} + k\theta \quad \dots (2.12)$$

Para calcular el momento de inercia del disco consideramos una masa $m=0.4$ kg y el radio $R=0.065$ m,

$$I = \frac{mR^2}{2} = 0.2 \times (0.065)^2 = 8.45 \times 10^{-4} \text{ kg-m}^2. \quad \dots (2.15)$$

Nótese, que existe una diferencia entre el torque que se mide ($k\theta$) y el torque del fluido ER (τ_{ER}) que nos interesa. La diferencia se debe a la inercia del sistema de medición, la cual se cuantifica en la ecuación 2.12, es decir, se puede calcular numéricamente τ_{ER} a partir de los resultados de la medición y la ecuación 2.12. Este método se emplea para extraer la información del estado transitorio en los fluidos ER, en el capítulo 5.

CAPITULO 3

Estructura Estática

Las teorías propuestas para explicar el efecto ER se basan en la estructura de cadenas de partículas alineadas en la dirección del campo eléctrico [16,17,25]. En condiciones estáticas, se considera la formación de cadenas rígidas paralelas al campo eléctrico. Al considerar sólo la interacción dipolar se tiene que las partículas alineadas en la dirección del campo se atraen, mientras que las partículas en el plano perpendicular al campo eléctrico se repelen. Como se ha discutido en el capítulo 1, en la interacción de dos dipolos existe un ángulo crítico, $\theta_c = 55^\circ$ para el cual si $\theta < \theta_c$ la interacción es atractiva, si por el contrario $\theta > \theta_c$ la interacción es repulsiva. Tao [15,75] calcula la energía considerando sólo las interacciones dipolares y encuentra que la estructura más estable tiene como celda unitaria la bct mostrada en la figura 1.5, definida por los vectores, $\bar{a}_1 = \sqrt{6} r_0 \hat{x}$, $\bar{a}_2 = \sqrt{6} r_0 \hat{y}$ y $\bar{a}_3 = 2 r_0 \hat{z}$.

Existen otros factores que pueden modificar la estructura de un fluido ER, como por ejemplo, la presencia de un gradiente de campo eléctrico. Las partículas neutras experimentan una fuerza en la dirección del gradiente del campo eléctrico debido a sus momentos dipolares, conocida como fuerza de *dielectroforesis* [68]. Más aún, cuando el fluido no es completamente aislante, al haber cargas móviles en el medio dispersante o en la superficie de la partícula se presenta el efecto de *electroforesis*, que se manifiesta atrayendo las partículas hacia los electrodos y debilitando la estructura de fluido ER, como se demostrará en este capítulo. La diferencia entre el efecto de dielectroforesis y el de electroforesis es que el primero se presenta al someter partículas neutras en un campo eléctrico no uniforme y el segundo es el efecto de un campo eléctrico sobre partículas con una carga efectiva diferente de cero.

Observaciones en microscopio efectuadas en nuestro laboratorio, así como reportadas en la literatura [81,83], muestran que las cadenas presentan una cierta curvatura, es decir, no son estrictamente paralelas al campo eléctrico, ver figura 3.1. Creemos que la curvatura de las cadenas está íntimamente relacionada con las fuerzas de dielectroforesis y de electroforesis, ya que ambas están presentes y su magnitud varía dependiendo de las propiedades eléctricas de los materiales que compone un fluido ER, tales como permitividad dieléctrica y conductividad eléctrica.

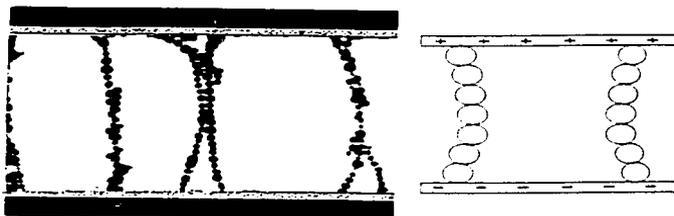


Fig. 3.1. Curvatura de las cadenas de partículas en un fluido ER [81].

En el modelo que se propone a continuación se consideran el efecto de dielectroforesis y el de electroforesis para calcular la energía de interacción entre partículas, partiendo de la estructura bct propuesta por Tao [75]. Analizamos primero el efecto de dielectroforesis sobre la estructura de los fluidos ER. En este caso se calcula la energía de interacción dipolar entre cadenas de partículas cuando existe un gradiente de campo eléctrico, Fig. 3.2. Posteriormente se propone un modelo de estructura de los fluidos ER, en el cual están presentes tanto el efecto de dielectroforesis y como el de electroforesis. Se considera un sistema de partículas con un momento dipolar, las cuales están inmersas en un medio dispersante con una cierta densidad de carga, Fig. 3.5. Al aplicar el campo eléctrico, la carga del medio dispersante se redistribuye, dando lugar a una densidad de carga que es función de la posición. Suponemos que el dipolo de las partículas atrae parte de la carga, de manera que cada partícula tiene una carga monopolar y una dipolar, de este modo, en el cálculo de la energía de interacción se considera tanto la interacción dipolar como

la coulombiana. Los resultados del cálculo de energía de interacción sugieren que al existir sólo un gradiente de campo eléctrico no se genera la curvatura de las cadenas. En cambio, al introducir una pequeña cantidad de carga monopolar a las partículas, se encuentran configuraciones similares a las observadas experimentalmente, es decir, curvatura en las cadenas.

3.1 Efecto de dielectroforesis en la estructura

Debido a que la fuerza de dielectroforesis se manifiesta en partículas neutras, consideramos que sólo hay interacción dipolar en presencia de un gradiente de campo eléctrico. Partimos de una configuración de cadenas de partículas desfasadas, como se muestra en la figura 3.2, y calculamos la energía de interacción entre las cadenas y un dipolo de prueba (D_p). Para hallar la posición de equilibrio, en función de la posición del dipolo de prueba partimos de la ecuación 1.13

$$W_{12} = \frac{P^2 (1 - 3 \cos^2 \theta)}{r^3}.$$

Para el caso en dos dimensiones, si el dipolo D_p se sitúa en $(x + \sqrt{3} r_o, z)$ y un dipolo m_1 en la cadena 1, mas próxima al dipolo de prueba, entonces, la distancia entre D_p y m_1 es

$$r_m = \sqrt{x^2 + [(2m-1)r_o \pm z]^2} \quad \dots(3.1)$$

donde el signo + corresponde a los dipolos situados por encima del eje horizontal y el signo - para los restantes, así, el ángulo se expresa como,

$$\cos \theta = \frac{[(2m-1)r_o \pm z]}{\sqrt{x^2 + [(2m-1)r_o \pm z]^2}}, \quad \dots (3.2)$$

entonces, la energía de interacción entre D_p y un dipolo m_1 en la cadena 1, es

$$W_{Dp-m_1} = \frac{P^2}{[x^2 + ((2m-1)r_0 \pm z)^2]^{3/2}} \left\{ 1 - 3 \frac{[(2m-1)r_0 \pm z]^2}{x^2 + [(2m-1)r_0 \pm z]^2} \right\} \quad \dots (3.3)$$

De modo que la energía de interacción entre dipolar entre la cadena 1 y D_p se expresa como

$$W_{Dp-1} = \frac{P^2}{r_0^3} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{1}{(x/r_0)^2 + ((2m-1) \pm z/r_0)^2} - 3 \frac{[(2m-1) \pm z/r_0]^2}{(x/r_0)^2 + [(2m-1) \pm z/r_0]^2} \right\} \quad \dots (3.4)$$

Procediendo de igual modo para las cadenas subsiguientes, se encuentra que la energía de interacción dipolar entre el dipolo de prueba D_p y N cadenas con M partículas es

$$\begin{aligned} \frac{W_T}{P^2/r_0^3} &= \sum_{j_1=1}^N \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{1}{[(x/r_0 \cdot j_1 \sqrt{3})^2 + ((2m-1) \pm z/r_0)^2]^{3/2}} - \frac{3((2m-1) \pm z/r_0)^2}{[(x/r_0 \cdot j_1 \sqrt{3})^2 + ((2m-1) \pm z/r_0)^2]^{3/2}} \right\} \\ &\cdot \sum_{j_2=1}^M \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{1}{[(x/r_0 \cdot j_2 \sqrt{3})^2 + (2m \pm z/r_0)^2]^{3/2}} - \frac{3(2m \pm z/r_0)^2}{[(x/r_0 \cdot j_2 \sqrt{3})^2 + (2m \pm z/r_0)^2]^{3/2}} \right\} \quad \dots (3.5) \\ &\cdot \frac{1}{[(x/r_0 \cdot j_2 \sqrt{3})^2 + (z/r_0)^2]^{3/2}} - \frac{3(z/r_0)^2}{[(x/r_0 \cdot j_2 \sqrt{3})^2 + (z/r_0)^2]^{3/2}} \end{aligned}$$

donde j_2 se refiere a las cadenas cuyos centros se encuentran en $z=0$ y j_1 para las cadenas restantes.

Suponemos que el gradiente de campo eléctrico varía linealmente en la dirección z , entonces, el momento dipolar para cada partícula en cada cadena es:

$$p = P_0 + z \delta p. \quad \dots (3.6)$$

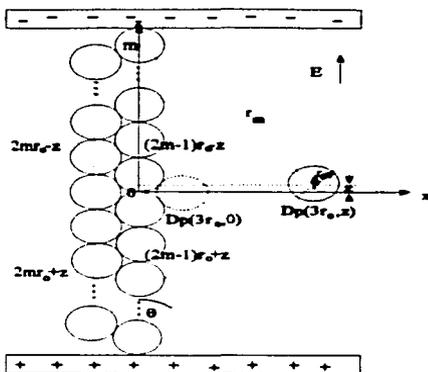


Fig. 3.2 Cadenas de partículas en un gradiente de campo eléctrico.

La figura 3.3 muestra la energía de interacción cuando el gradiente de campo eléctrico es cero, usando una configuración de 20 cadenas con 10 partículas cada una, donde cada curva corresponde a una coordenada específica del dipolo de prueba. Nótese que conforme se incrementa z , es decir, la partícula sube y alcanza la misma altura que su vecino más próximo, la energía aumenta, hasta que la interacción se torna repulsiva. De modo que la posición de menor energía es cuando $z=0$. Cabe mencionar que para sistemas mayores ($N > 20$ y $M > 10$) la gráfica es esencialmente la misma.

Al considerar un gradiente lineal de campo eléctrico en la dirección z , la energía (Fig. 3.4) muestra un comportamiento muy similar al anterior, no encontrando un mínimo de energía diferente a la posición $(\sqrt{3}r_0, 0)$ para el dipolo de prueba, como se muestra en la Fig. 3.3. Es decir, a pesar de la presencia de un gradiente de campo eléctrico, la configuración más estable es la cadenas desfasadas, cuya celda unitaria en tres dimensiones la constituye la celda bct, en concordancia con los resultados de Tao [75].

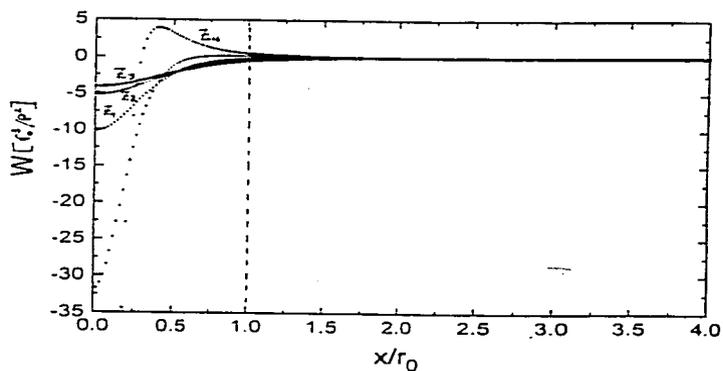


Fig. 3.3. Energía de interacción en una estructura de $N=20$ y $M=10$, cuando el gradiente del campo eléctrico es cero.

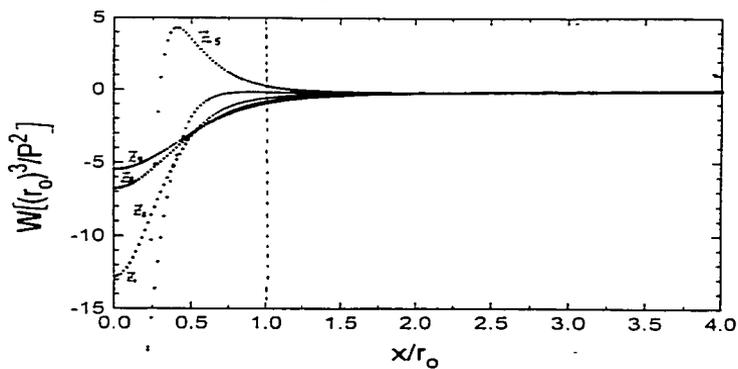


Fig. 3.4. Energía de interacción en una estructura de $N=20$ y $M=10$, cuando el gradiente del campo eléctrico es diferente de cero.

3.2 Modelo de estructura de los fluidos ER

Consideremos una mezcla de partículas dieléctricas suspendidas en un fluido situada dentro de un capacitor. Supongamos que las partículas son esféricas, con una permitividad ϵ_p y que el fluido base tiene una permitividad ϵ_f , entonces el momento dipolar se expresa como

$$p = \alpha E(z) \quad \dots (3.8)$$

donde α es la polarizabilidad de las partículas, dada por [68]

$$\alpha = \epsilon_0 \epsilon_f \frac{(\epsilon_p - 1)}{(\epsilon_p + 2)} \quad \dots (3.9)$$

y $E(z)$ el campo eléctrico en la posición z (ver Fig. 3.5) y ϵ_0 la permitividad dieléctrica del espacio vacío, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ C/V-m. Es decir, el momento dipolar de cada partícula es función de la posición respecto al centro del capacitor.

Además, consideramos un fluido base con cierta concentración de carga monopolar ρ , que al aplicar un campo eléctrico externo redistribuye la carga, dando lugar a una densidad de carga. A primera aproximación, supongamos que la densidad de carga varía linealmente con la distancia respecto de z , esto es

$$\rho = cz, \quad \dots (3.10)$$

donde c es una constante de proporcionalidad. De modo que la densidad de carga en el centro del capacitor es cero y se incrementa al acercarse a los electrodos.

Ahora, las cargas presentes en el fluido son atraídas por los dipolos en forma asimétrica por los polos, debido a la distribución inhomogénea de estas cargas, como lo muestra la figura 3.5. De esta forma se da lugar a una partícula efectiva que se puede caracterizar mediante un dipolo más una carga monopolar. Así, las partículas situadas en z positiva tiene una carga neta mayor que cero y viceversa. Por lo tanto, para calcular la energía de interacción entre partículas se consideran los dos primeros términos de la expansión multipolar [38] que tienen la mayor

contribución, es decir, la interacción monopolar y la dipolar,

$$W_{ij} = \frac{p_i p_j}{8r_{ij}^3} (1 - 3\cos^2\theta) = \frac{\rho_i \rho_j}{r_{ij}} \quad \dots (3.11)$$

donde ρ_i es la densidad de carga de la partícula i situada en $r_i = (x_i, z_i)$ y

$$r_{ij} = |r_i - r_j| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad \dots (3.12)$$

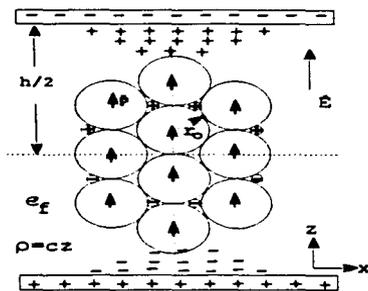


Fig. 3.5 Modelo de estructura de los fluidos ER con densidad de carga.

El campo eléctrico local dentro del fluido dieléctrico tiene la contribución la densidad de carga monopolar ρ y la debida a la densidad de carga dipolar $\rho_{dipolar}$. En este caso, como una aproximación, despreciamos la participación de la carga dipolar del fluido. De modo que el campo eléctrico en el fluido se obtiene, a partir de la ecuación de Poisson, como

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_f} \quad \dots (3.13)$$

Resolviendo la ecuación 3.13 y considerando 3.10, se tiene

$$E(z) = \frac{cz^2}{2\epsilon_0\epsilon_f} + C_1 \quad \dots (3.14)$$

Para hallar C_1 se aplica la condición de frontera, $E(z=h/2) = E_0$, de modo que el campo eléctrico está dado por:

$$E(z) = E_0 + \frac{c}{2\epsilon_0\epsilon_f} [z^2 - (\frac{1}{2}h)^2] \quad \dots (3.15)$$

Nótese que la distribución inhomogénea de carga dentro del fluido origina un gradiente de campo eléctrico que se superpone al campo eléctrico externo E_0 . Entonces, el momento dipolar se expresa como:

$$P(z) = \epsilon_0\epsilon_f \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \left\{ E_0 + \frac{c}{2\epsilon_0\epsilon_f} [z^2 - (\frac{1}{2}h)^2] \right\} \quad \dots (3.16)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.10 y 3.16 en 3.11, además, si se define c como

$$c = b \frac{2\epsilon_0\epsilon_f E_0}{(\frac{1}{2}h)^2} \quad \dots (3.17)$$

donde b es un parámetro adimensional de carga, entonces la energía adimensional de interacción

entre las partículas i y j es igual a:

$$\frac{W_{ij}}{(\epsilon_0 \epsilon_r E_0)^2 / r_0^3} = \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right)^2 \left(1 - b \left(\frac{z_i^2}{(\frac{1}{2}h)^2} - 1 \right) \right) \left(1 - b \left(\frac{z_j^2}{(\frac{1}{2}h)^2} - 1 \right) \right) \dots (3.18)$$

$$\cdot \left(\frac{1}{[(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{3/2}} - \frac{3(z_i - z_j)^2}{[(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{5/2}} \right) \cdot \left(\frac{2b}{(\frac{1}{2}h)^2} \right)^2 \frac{z_i z_j}{[(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{3/4}}$$

donde x_i y z_i son las coordenadas de la i -ésima partícula en unidades de r_0 , y $\frac{1}{2}h$ es la separación entre electrodos del capacitor, expresada en las mismas unidades.

De esta forma, la energía para n partículas es:

$$\frac{W_{ij}}{(\epsilon_0 \epsilon_r E_0)^2 / r_0^3} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{1}{8} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right)^2 \left(1 - b \left(\frac{z_i^2}{(\frac{1}{2}h)^2} - 1 \right) \right) \left(1 - b \left(\frac{z_j^2}{(\frac{1}{2}h)^2} - 1 \right) \right) \dots (3.19)$$

$$\cdot \left(\frac{1}{[(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{3/2}} - \frac{3(z_i - z_j)^2}{[(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{5/2}} \right) \cdot \left(\frac{2b}{(\frac{1}{2}h)^2} \right)^2 \frac{z_i z_j}{[(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{3/4}} \right\}$$

Una vez que se calcula la energía de interacción y se encuentran las posiciones de cada partícula, con las cuales se obtiene el mínimo de energía, se analiza la estabilidad de la configuración mediante el gradiente en cada posición, esto es,

$$\nabla W \Big|_{x_1, y_1, x_2, y_2, \dots}$$

En nuestro cálculo se parte de una estructura bidimensional equivalente a la estructura bct. Se analizan dos configuraciones, la celda unitaria formada por 5 partículas y la estructura

compuesta con 8 partículas, Fig. 3.6. Para encontrar la posición de cada partícula que corresponda al mínimo de la energía tendríamos que abordar un problema de $2n$ dimensiones, siendo n el número de partículas. Como un análisis parcial, aprovechando la simetría de la estructura, consideramos, en la configuración de cinco partículas, que las partículas 2 y 4 giran un ángulo β en torno a las partículas 3 y 5, respectivamente, conservando su distancia de $2r_0$. De modo que las coordenadas para cada partículas son: $\vec{r}_1 = r_0(0,0)$, $\vec{r}_2 = r_0(\sqrt{3} + 2\text{sen}\beta, 2\text{cos}\beta - 1) = -\vec{r}_4$, $\vec{r}_3 = r_0(\sqrt{3}, -1) = -\vec{r}_5$. En la configuración de 8 partículas se procede en forma similar, donde las partículas 2 y 4 giran en torno a la 3, y la 6 y 8 giran alrededor de la 7. Entonces las coordenadas para las partículas en la configuración de ocho son: $\vec{r}_1 = r_0(0,1)$, $\vec{r}_2 = r_0(\sqrt{3} + 2\text{sen}\beta, 2\text{cos}\beta)$, $\vec{r}_3 = r_0(\sqrt{3}, 0)$, $\vec{r}_4 = (x_2, -y_2)$, $\vec{r}_5 = r_0(0, -1)$, $\vec{r}_6 = (-x_2, -y_2)$, $\vec{r}_7 = r_0(-\sqrt{3}, 0)$ y $\vec{r}_8 = (-x_2, y_2)$. Obviamente para $\beta = 0$, la orientación de las cadenas es paralela al campo eléctrico.

Para calcular la energía de interacción entre partículas se emplea la ecuación 3.19 y se evalúa en la posición de cada partícula. Esto implica que se asocia una densidad de carga monopolar (ecuación 3.10) y un momento dipolar (ecuación 3.16) en función de las coordenadas del centro de cada partícula, considerando estos como valores promedio.

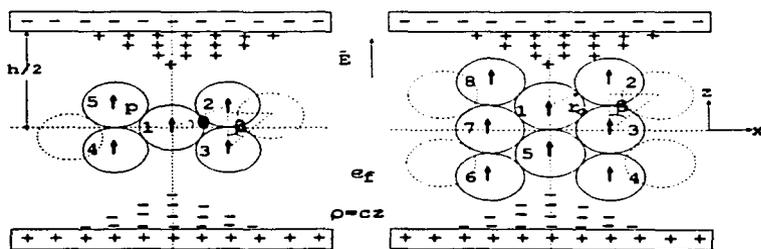


Fig. 3.6. Configuración de 5 y 8 partículas con distribución espacial de carga.

3.2.1 Configuración de 5 partículas

La figura 3.7 muestra la energía potencial total (W) como función del parámetro adimensional de la densidad de carga (b) y del ángulo de rotación del sitio 2 (β) para $h/2=5 r_p$ y $\epsilon_p=4$. Se observa que la energía W es siempre negativa y se incrementa al aumentar b hasta alcanzar un valor máximo cuando $b=0.63353$, como se muestra en la figura 3.7 b para $\beta=0$. Por otro lado, se encuentra que para cada densidad de carga dada existe un ángulo β_{\min} para el cual el sistema encuentra una energía mínima (Fig.3.7c). La figura 3.8 muestra la gráfica de β_{\min} en función del parámetro de carga b . Obsérvese que a partir de $b=0.63353$ se inicia la rotación de las partículas 2 y 4 de la Fig. 3.3a, como consecuencia de que la interacción monopolar comienza a ser comparable con la dipolar. Cabe mencionar que en este caso, una energía total negativa no necesariamente significa que la estructura sea estable. Para analizar la estabilidad de la estructura hemos calculado el gradiente de la energía potencial para cada partícula, es decir, el negativo de la fuerza que experimenta la partícula ($F=-\nabla W$). En la tabla 3.1 se muestran los ángulos de orientación del gradiente ($\phi_{\nabla W}$) para la partícula i evaluados en β_{\min} . Nótese que, por ejemplo, para $b=0.7$ se cumple que $\beta_{\min} + \phi_{\nabla W} = \pi/2$, es decir, la fuerza que experimentan las partículas 2 y 4 se encuentra sobre la línea de unión entre éstas con sus adyacentes 3 y 5, respectivamente. En la figura 3.9 se muestra la dirección del gradiente de la energía para algunos valores de b . Para $b > 0.75$ las fuerzas de interacción que experimentan las partículas 2 y 4 son repulsivas, es decir, para estos valores de carga la estructura es inestable.

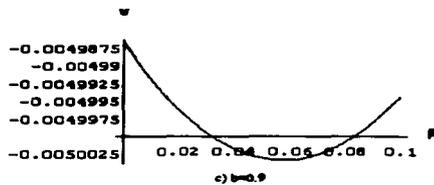
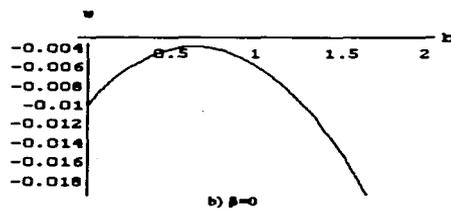
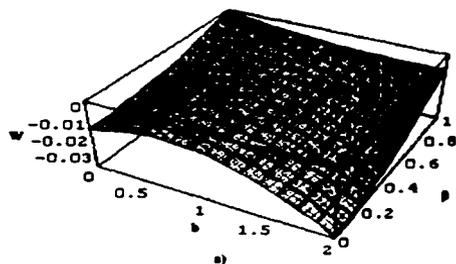


Fig. 3.7 Energía de interacción de 5 partículas

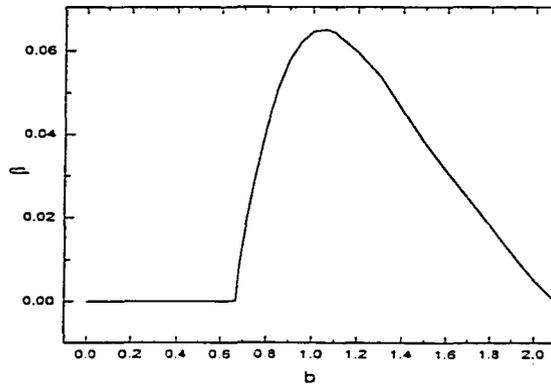


Fig. 3.8. Angulo de energía mínima en función de b para la configuración de 5 partículas.

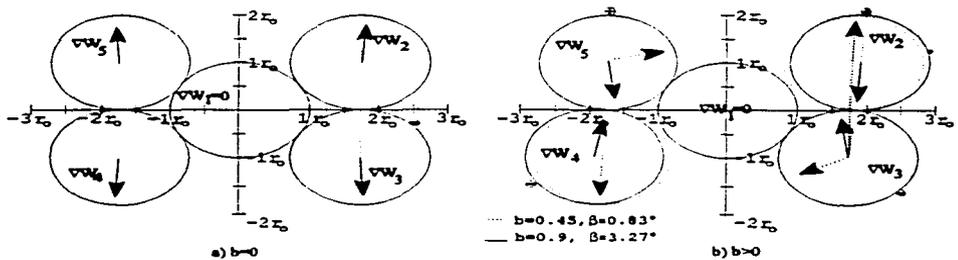


Fig. 3.9. Posición de equilibrio para la configuración de cinco partículas. $h/2 = 5 r_0$.

Tabla 3.1 Angulo del gradiente de la energía evaluado en cada posición de las 5 partículas.

b	β_{min}	W	$\phi_{\nu 1}$	$\phi_{\nu 2}$	$\phi_{\nu 3}$	$\phi_{\nu 4}$	$\phi_{\nu 5}$
0	0	-0.0099	0	1.4601	-1.4601	-1.6814	1.6814
0.65	0.0001	-0.0039	0	1.5486	-1.5503	-1.5929	1.5912
0.7	0.0145	-0.0040	0	1.5579	-2.6497	-1.5836	0.4918
0.75	0.0295	-0.0041	0	-1.6006	2.0698	1.5409	-1.0737
0.8	0.0416	-0.0043	0	-1.6123	1.9017	1.5292	-1.2398
0.9	0.0572	-0.0050	0	-1.6284	1.8022	1.5131	-1.3393
1.0	0.0644	-0.0059	0	-1.6350	1.7740	1.5065	-1.3675
1.5	0.0378	-0.0151	0	-1.6086	1.9392	1.5329	-1.2073
2.095	0.00002	-0.0357	0	1.5707	1.5713	-1.5708	1.5702

Tabla 3.2 Angulo del gradiente de la energía evaluado en cada posición de las 8 partículas.

b	β_{min}	W	$\phi_{\nu 1}$	$\phi_{\nu 2}$	$\phi_{\nu 3}$	$\phi_{\nu 4}$	$\phi_{\nu 2} + \beta_{min}$
0	0	-0.0345	1.5708	1.3406	3.1416	1.3406	<u>1.3406</u>
0.42	0.0042	-0.0034	1.5708	1.5670	3.1416	1.5670	<u>1.5712</u>
0.45	0.0572	-0.0129	1.5708	1.5134	3.1416	1.5134	<u>1.5706</u>
0.5	0.1312	-0.0102	1.5708	1.4396	3.1416	1.4396	<u>1.5708</u>
0.6	0.2820	-0.0080	1.5708	1.2924	3.1416	1.2924	<u>1.5706</u>
0.7	0.442	-0.0069	1.5708	1.1303	3.1416	1.1303	<u>1.5723</u>
0.8	0.6028	-0.0071	1.5708	0.9686	3.1416	0.9686	4.7129
0.9	0.7	-0.0081	1.5708	0.8646	3.1416	0.8646	4.7061
1	0.7376	-0.0096	1.5708	0.8335	3.1416	0.8335	4.7126
2	0.5372	-0.0517	1.5708	1.0633	3.1416	1.0633	1.6005

3.2.2 Configuración de 8 partículas

En similitud con la configuración de cinco partículas, la figura 3.10 muestra la energía potencial total (W) como función del parámetro adimensional de la densidad de carga (b) y del ángulo de rotación del sitio 2 (β) para $h/2=5 r_p$ y $\epsilon_p=4$. Se observa que la energía W es también negativa y se incrementa al aumentar b hasta alcanzar un valor máximo cuando $b=1.093$, como se muestra en la figura 3.10b para $\beta=0$. La figura 3.11 muestra la gráfica de β_{min} en función del parámetro de carga b . Obsérvese que a partir de $b=0.42$ se inicia la rotación de las partículas 2, 4, 6 y 8 de la Fig. 3.3b, como consecuencia de que la interacción monopolar comienza a ser comparable con la dipolar. Con el fin de analizar la estabilidad de la estructura hemos calculado el gradiente de la energía potencial para cada partícula. En la tabla 3.2 se muestran los ángulos de orientación del gradiente ($\Phi_{\nabla W}$) para la partícula i evaluados en β_{min} . Nótese que para $0.42 < b < 0.75$ y para $b > 1.1$ se cumple que $\beta_{min} + \Phi_{\nabla W} = \pi/2$, es decir, la fuerza que experimentan las partículas 2, 4, 6 y 8 se encuentra sobre las líneas de unión entre éstas con sus adyacentes 3 y 7. En la figura 3.12 se muestra la dirección del gradiente de la energía para algunos valores de b . Para $0.75 < b < 1.1$ las fuerzas de interacción que experimentan las partículas 2, 4, 6 y 8 son repulsivas, es decir, para este intervalo de carga b la estructura es inestable.

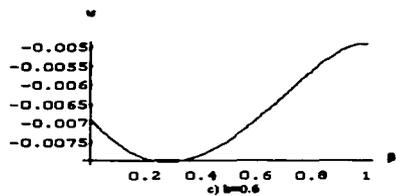
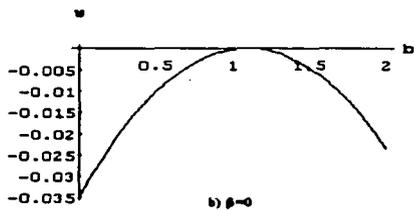
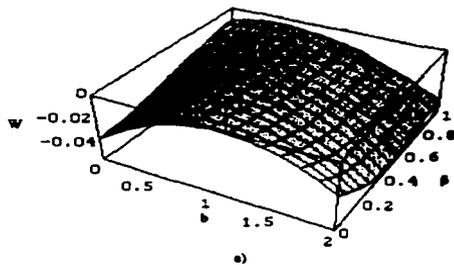


Fig. 3.10 Energía de interacción de 8 partículas.

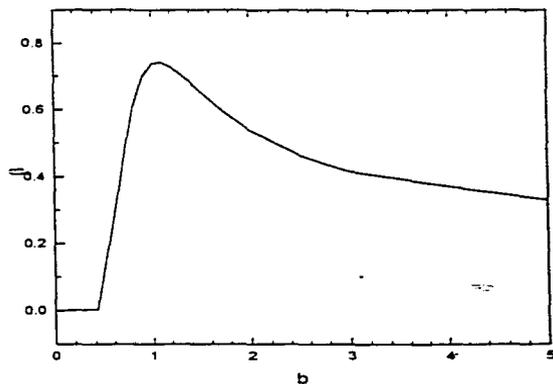


Fig. 3.11. Angulo de energía mínima en función de b para la configuración de 8 partículas.

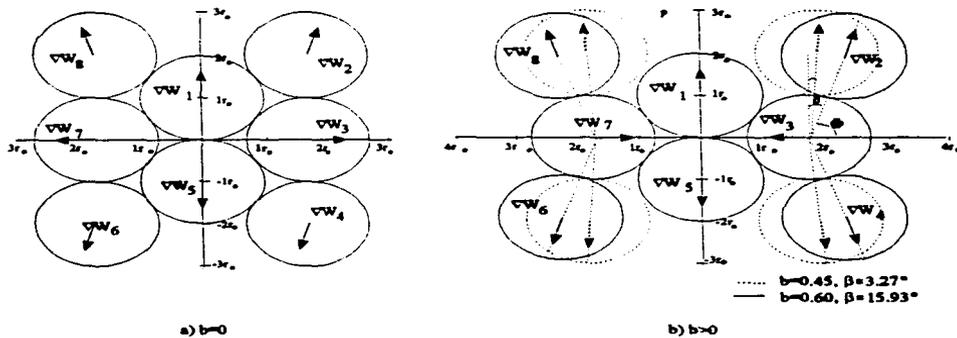


Fig. 3.12. Posición de equilibrio para configuración de ocho partículas, $b/2 = 5 r_0$.

Los resultados anteriores muestran la tendencia de las cadenas a desviarse de la dirección del campo eléctrico. Las partículas rotan un ángulo en función de la densidad de carga presente en el sistema, lo cual muestra evidencia de la preferencia de las partículas a orientarse con una cierta curvatura debido al efecto de electroforesis. Se puede estimar la magnitud de la carga monopolar y la dipolar asociada a una partícula a partir de las ecuaciones, 3.10 y 3.16, respectivamente. Para un valor típico de b , por ejemplo $b=0.7$ y usando los valores de $\epsilon_r=2$, $h/2=1 \times 10^{-3}$ m, $E_0=1 \times 10^6$ V/m y $r_0=10^{-5}$ m, se tiene que $c=24.78$ C/m⁴. Entonces, la densidad de carga asociada a la partícula es $\rho=2.478 \times 10^{-4}$ C/m³, por lo tanto, la carga asociada al volumen de la partícula es $q_{\text{monopolar}}=1.037 \times 10^{-18}$ C, del orden de la carga de 10 electrones. Por otro lado, el momento dipolar por unidad de volumen correspondiente al dipolo, calculado a partir de la ecuación 3.16, es $P=4.437 \times 10^{-4}$ C/m², por lo tanto, $q_{\text{dipolar}}=1.828 \times 10^{-15}$ C $\gg q_{\text{monopolar}}$. Esto es, a pesar de que la carga monopolar considerada es mucho menor que la correspondiente al dipolo, ésta es suficiente para generar la curvatura de las cadenas.

CAPITULO 4

Estado Dinámico Estacionario

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización reológica de los fluidos ER en su estado dinámico estacionario, como función del campo eléctrico y la concentración volumétrica de partículas. Se usan varias formulaciones con gel de sílice como fase sólida, suspendida en fluidos con diferentes viscosidad y permitividad dieléctrica, con el fin de estudiar la participación de las partículas y del fluido base en el efecto ER. En principio, existe una gran variedad de partículas con las cuales se pueden preparar los fluidos ER, como se ha mencionado en el primer capítulo. Nosotros hemos elegido la gel de sílice por ser el material mas empleado para la observación del efecto ER [79]. Con respecto al fluido base, existe poca información ya que se considera poco relevante su participación. Sin embargo, creemos que el tiempo de respuesta y la magnitud del efecto ER podrían depender fuertemente de la viscosidad y la permitividad dieléctrica del fluido base, sobre todo cuando se aplica un campo eléctrico alterno. Por simplicidad analizamos primero el estado dinámico estacionario con el fin de cuantificar la magnitud del efecto ER y su dependencia con respecto a las propiedades del fluido base, tanto para el caso de un campo eléctrico directo (DC) como alterno (AC).

4.1 Desarrollo Experimental

El procedimiento experimental parte de la preparación de las mezclas, la calibración del electroviscosímetro y finalmente la medición del efecto ER en su estado estacionario. La preparación y la estabilidad de las mezclas son esenciales para el desarrollo del experimento. Los detalles de dicha preparación se discuten en la sección 4.1.1. Por otro lado, la calibración del electroviscosímetro se efectúa usando un fluido Newtoniano, como se presenta en el capítulo 2. Así mismo, el campo eléctrico se calcula a partir de la diferencia de voltaje y la separación entre los discos. Por último, el efecto ER se estudia cuantificando la magnitud del esfuerzo de cedencia al aplicar el campo eléctrico, para lo cual se requiere medir el esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte e intensidad del campo.

4.1.1 Preparación de fluidos ER

Se preparan tres tipos de fluidos ER, conteniendo la misma especie de partícula. Las partículas son de gel de sílice, marca Merck, cuyas principales características se muestran en la tabla 4.1. La permitividad dieléctrica relativa de la sílice se determina a partir de la medición de permitividad en una mezcla de aceite de silicon, donde se emplea una concentración volumétrica de partículas de gel de sílice de $\phi=0.023$. Utilizando una relación para mezclas, $\epsilon = \epsilon_1\phi_1 + \epsilon_2\phi_2$, siendo ϵ_i la permitividad y ϕ_i la fracción volumétrica del componente i , se calcula la permitividad de las partículas [76]. Por otro lado, se mide el contenido de humedad en el gel de sílice mediante análisis termogravimétrico (TGA, DuPont Instruments, modelo 951), encontrándose un 6% de agua, ya que su participación en el efecto ER es importante, como se ha discutido en la sección 1.3.2. Con respecto al fluido base se emplean tres fluidos, dos de ellos son aceites de silicon de marca Spectrum, silicon 100 y silicon 1000 y el otro es un desmoldante, Dioftilato (DOP). En la tabla 4.2 se presenta una muestra comparativa de las propiedades de cada fluido. Las partículas de gel de sílice se incorporan al fluido base y se mezclan usando un dispersor con propela en espiral durante una hora. Para distinguir las suspensiones de gel de sílice con respecto a su correspondiente fluido base, las suspensiones se denominan ER-S100, ER-S1000 y ER-DOP. En

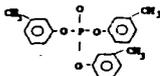
las mezclas ER-S100 y ER-DOP se usan tres concentraciones de gel de sílice $\phi=0.096$, $\phi=0.122$ y $\phi=0.144$, correspondiendo a las concentraciones en peso de 20%, 25% y 30%. En el ER-S1000, la concentración se fija a $\phi=0.096$. Cabe mencionar que no se emplean aditivos, tales como surfactantes, con el fin de determinar exclusivamente los efectos de las partículas y del fluido base.

Tabla 4.1. Propiedades del gel de sílice 60.

Propiedad	Valor
Tamaño de partícula	menor a 63 μm
pH (con 10% de agua)	6.5 - 7.5
Contenido de Cl	< 0.02%
Contenido de Fe	< 0.02%
Permitividad (25°C)	2.69 a 10000 Hz 4.03 a 100 Hz 4.36 a 1 Hz

Tabla 4.2. Permitividad y viscosidad de la fase líquida (25°C).

Fluido	Permitividad relativa	Resistividad ($\Omega\text{-cm}$)	Viscosidad (Pa)
Aceite de silicon 100	2.7	0.9×10^{12}	0.098
Aceite de silicon 1000	2.7	0.9×10^{12}	0.98
DOP (Diofilato)	4.6	1.1×10^9	0.07



4.1.2 Método de medición

Como se ha discutido previamente en el capítulo 2, el electroviscosímetro se acopla a la celda para pruebas de torsión de una máquina universal de pruebas mecánicas (Instron, modelo 1125). El equipo experimental se muestra en la figura 2.1. Los electrodos se separan por una distancia de 2 mm y se deposita la muestra cubriéndolos totalmente con la mezcla. Se mide el torque transmitido por el fluido a diferentes velocidades de rotación, 1, 4, 10, 20 y 40 rpm. Una vez que el torque es constante la lectura se toma directamente del graficador. Se reinicia con la velocidad deseada y se espera a que se establezca un flujo uniforme. Se aplica una diferencia de voltaje y se espera a que el flujo llegue al estado estacionario, es decir, el torque llegue a un valor estable. En estas condiciones se registra la medición. Posteriormente se aplica un voltaje mayor y se repite el proceso. Para cada una de las velocidades se aplica un campo eléctrico de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 kV/mm. Las mediciones se efectuaron a temperatura ambiente (≈ 25 °C).

A partir de los resultados obtenidos, se calculan la velocidad y el esfuerzo de corte usando las ecuaciones 2.2 y 2.3. Específicamente, de la gráfica de esfuerzo de corte como función de la velocidad de corte se hace un ajuste de datos a la función $\sigma = \sigma_0 + \eta \dot{\gamma}$, de modo que el esfuerzo de cedencia (σ_0) se obtiene a partir de la extrapolación lineal de los datos a velocidad de corte igual a cero. De igual forma, de la pendiente del ajuste se determina la viscosidad (η). Es importante mencionar que los fluidos ER evaluados presentan un comportamiento reológico similar a un fluido de Bingham a altas velocidades de corte, sin embargo, esto no se cumple a bajas velocidades, como discutiremos posteriormente.

4.2 Suspensiones de gel de sílice en diferentes fluidos dieléctricos ($\phi=0.096$)

4.2.1 Resultados en DC

La figura 4.1. muestra el esfuerzo de corte como función de la velocidad de corte en el estado estacionario para los fluidos ER-S1000 y ER-S100 que contienen una fracción volumétrica de gel de sílice de 0.096. La tabla 4.3 resume los resultados del cálculo de esfuerzo de cedencia y viscosidad. Cabe mencionar que los resultados del ER-DOP no han sido incluidos, debido a que

dicho material en DC resulta altamente inestable el efecto ER, posiblemente debido a electroforesis. En otras palabras, al aplicar el campo eléctrico en DC las partículas tienden a segregarse hacia los electrodos, lo cual inhibe el efecto ER. En el capítulo 5 se discutirá más detalladamente esta inestabilidad.

Tabla 4.3. Resultados de ajuste de datos para viscosidad y esfuerzo de cedencia (DC).

E(kV/mm)	ER-S1000			ER-S100		
	η (Pa-s)	σ (Pa)	R ²	η (Pa-s)	σ (Pa)	R ²
0	1.245*			0.124*		
0.5	1.08	9.65	0.97	0.102	5.70	0.99
1.0	1.09	20.30	0.96	0.132	15.21	0.97
1.5	1.03	40.29	0.97	0.093	40.34	0.82
2	0.92	75.01	0.96	0.112	69.96	0.93
	0.99	107.40	0.91	0.09	105.48	0.91

* viscosidad calculada a partir de la fórmula de Einstein.

En la figura 4.1 se observa que la viscosidad a altas velocidades de corte prácticamente es independiente del campo eléctrico, sin embargo, el esfuerzo de cedencia varía considerablemente, figura 4.2, tal como se ha reportado en la literatura [8,25]. Los dos materiales se comportan similar a un fluido de Bingham, sin embargo, a bajas velocidades de corte el comportamiento reológico difiere de éste. Debido a que a bajas velocidades de corte el comportamiento reológico observado difiere del modelo de Bingham, para los cálculos hemos discriminado el primer punto de la curva para aproximarnos a la región lineal. En la tabla 4.3 se muestran los resultados del ajuste de datos al modelo de Bingham. La entre el modelo de Bingham y el comportamiento reológico observado en nuestros experimentos se puede entenderse mediante el modelo de capas [66]: se parte de que el esfuerzo de cedencia indica que la viscosidad es infinita para la velocidad de corte cero y que la viscosidad mínima que puede alcanzar es la de la suspensión sin campo. Al aplicar un esfuerzo, el material se deforma similar a un sólido, ver Fig. 4.3, hasta que la inclinación de las cadenas de partículas llega a un ángulo crítico, probablemente cercano a los 55° donde la interacción dipolar se torna repulsiva. El ángulo crítico se determina al considerar el efecto de muchos cuerpos. Para una velocidad de corte mínima podemos suponer que el material se fragmenta primeramente en dos bloques. Estos bloques se pueden mover independientemente,

similar a la interfase entre dos sólidos, de modo que la viscosidad que presentan se debe al fluido que los separa. Al incrementarse el gradiente de velocidad, los bloques se fragmentan por capas, hasta que prácticamente se destruye la estructura de las cadenas, donde la viscosidad de la suspensión llega a un valor constante. Es importante comentar que el esfuerzo de corte medido a alta velocidad de corte contiene aún la información de la interacción dipolar entre las partículas a pesar de la destrucción de las cadenas, lo que mantiene el esfuerzo de cedencia.

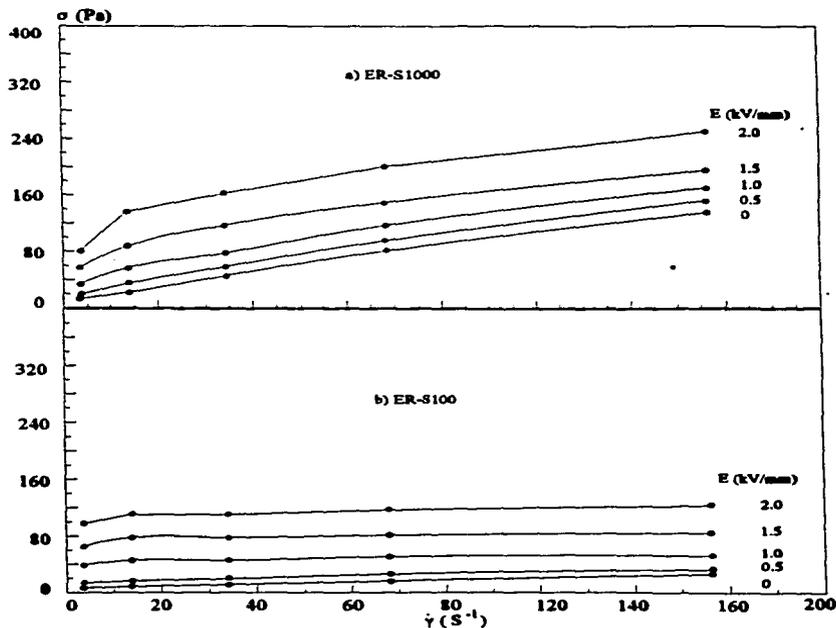


Fig. 4.1 Comportamiento reológico en DC, $\phi = 0.096$

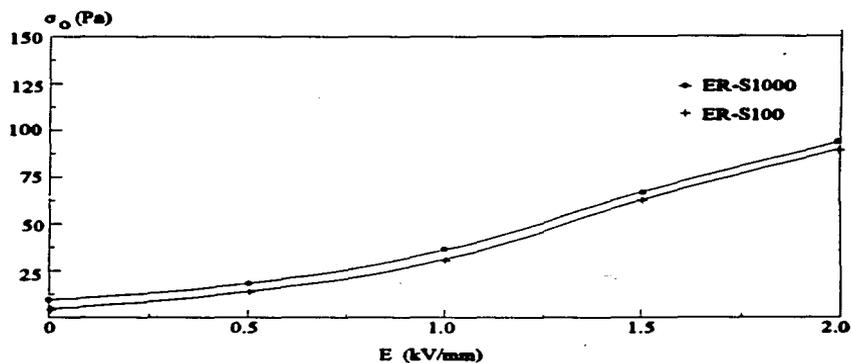


Fig. 4.2. Esfuerzo de cedencia como función del campo eléctrico, en DC.

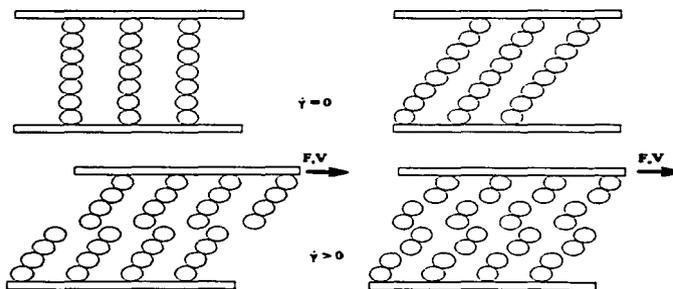


Fig. 4.3. Modelo de capas del efecto ER

4.2.2 Resultados en AC (60Hz)

La figura 4.4 muestra el esfuerzo de corte como función de la velocidad de corte a diferentes intensidades de campo eléctrico alterno para a)ER-S100 y b)ER-DOP. Nótese que el comportamiento es esencialmente del tipo Bingham, excepto a bajas velocidades.

En el ER-S100, para la misma intensidad de campo eléctrico se observa un esfuerzo de corte mayor en DC que en AC, lo cual se debe al desfaseamiento entre el campo eléctrico alterno y la orientación dipolar de las partículas, como se ha reportado en la literatura [12].

En el ER-S1000 al aplicar un campo eléctrico alterno de 60 Hz no se presenta el efecto ER, al menos para las mismas intensidades de campo, hasta 2 kV/mm. De hecho, se aprecia un ligero incremento para campos mayores. Esto se debe a que en este caso la viscosidad del fluido base es relativamente alta, lo que limita la movilidad de las partículas y consecuentemente el tiempo de formación de la estructura es mayor que el período del campo alterno.

En el ER-DOP se observa un efecto ER estable en AC, a pesar de la ausencia del efecto ER en DC. Esto como consecuencia de que al aplicar un campo eléctrico alterno se reduce el fenómeno de electroforesis, es decir, la acumulación de partículas en los electrodos, debido a que electroforesis es un proceso relativamente lento dependiendo de la viscosidad del fluido base. El comportamiento reológico de esta mezcla es similar al de las dos anteriores, pero con un efecto ER mayor. De acuerdo al modelo de Marshall [52], el esfuerzo de cedencia es proporcional a la concentración de partículas y a la polarización relativa (o factor de polarización) entre partículas y el fluido base. Para este caso, la concentración es la misma para todos los materiales. Sin embargo, para el ER-DOP el factor de polarización es prácticamente cero, lo cual contradice dicho modelo. Es posible que en este caso la conductividad del medio juegue un papel importante, lo cual no se ha considerado en el modelo de Marshall. Esto es particularmente importante para el caso de AC.

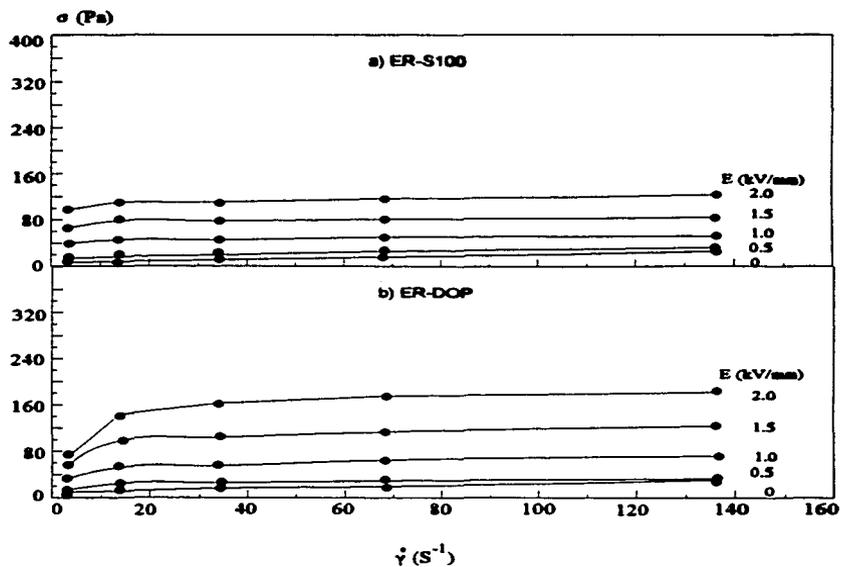


Fig. 4.4. Comportamiento electroreológico del ER-DOP en AC, $\phi = 0.096$

4.3 Suspensiones de gel de sílice con diferente concentración de partículas

4.3.1 ER-S100 ($\phi = 0.096, 0.122, 0.144$)

Las figuras 4.5 y 4.6 muestran el esfuerzo de corte como función de la velocidad de corte, de la concentración de partículas (ϕ) y del campo eléctrico (E) directo y alterno (60 Hz), respectivamente. Obsérvese que el comportamiento ER está presente en todos los casos, a pesar de que la intensidad del fenómeno se incrementa con la concentración (ϕ) y la intensidad del campo E . Se puede apreciar que en este material (ER-S100), el comportamiento ER es esencialmente invariante con la frecuencia del campo, lo cual puede deberse a la baja viscosidad del fluido base. Es importante mencionar que la poca variación del efecto ER ante el campo eléctrico alterno probablemente es válida sólo para bajas frecuencias. Las tablas 4.4 y 4.5 resumen los resultados del ajuste de datos para obtener la viscosidad y el esfuerzo de cedencia, a partir de la ecuación de Bingham.

Las figuras 4.7 y 4.8 muestran el esfuerzo de cedencia derivados de las figuras 4.5 y 4.6, como función de la intensidad del campo eléctrico y la concentración de partículas, para los casos de DC y AC, respectivamente. Se aprecia un incremento monótono del esfuerzo de cedencia conforme se incrementa la intensidad del campo eléctrico y la concentración de partículas. Cabe mencionar que cuando el campo eléctrico es extremadamente alto, se intensifica el efecto de electroforesis y consecuentemente disminuye el efecto ER [1]. Además, el esfuerzo de cedencia es ligeramente mayor en DC que en AC.

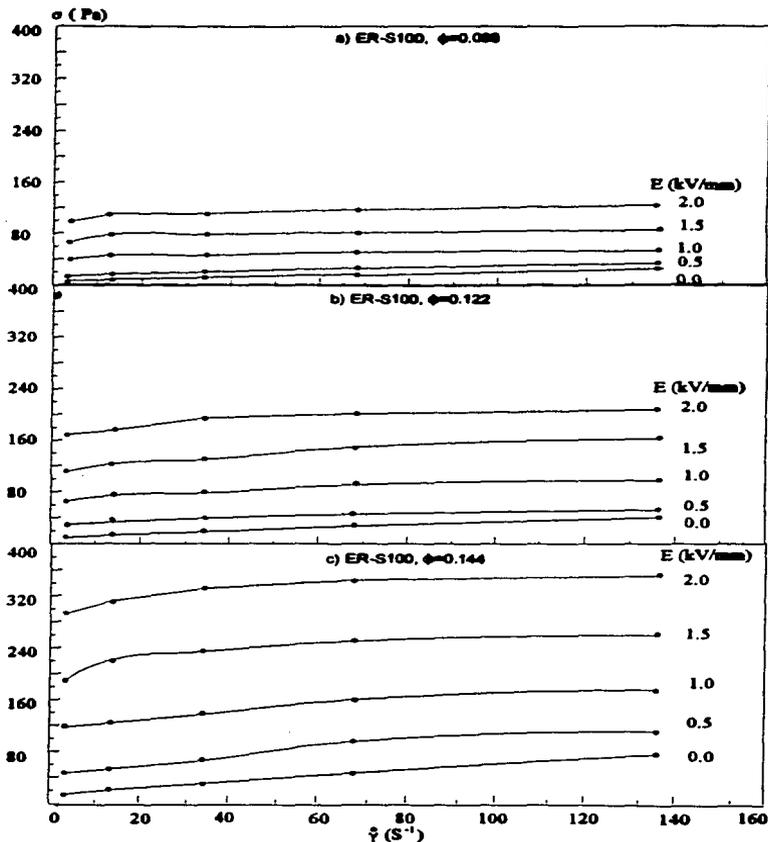


Fig. 4.5 Comportamiento electroreológico del ER-S100 con diferente concentración de partículas, DC.

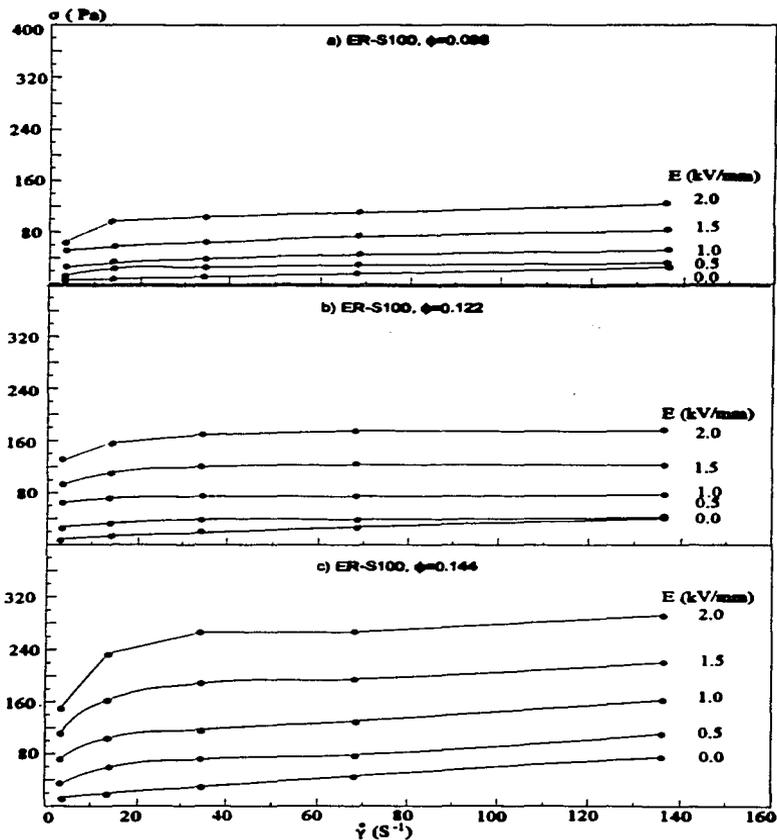


Fig. 4.6 Comportamiento electroreológico del ER-S100 con diferente concentración de partículas, AC.

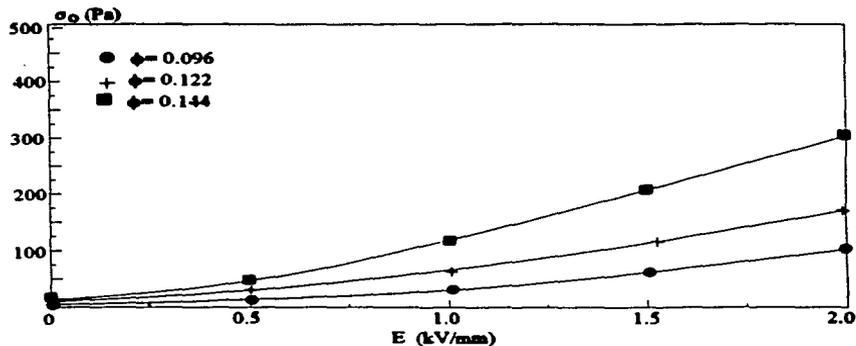


Fig. 4.7. Esfuerzo de cedencia como función del campo eléctrico. ER-S100 con diferentes concentraciones de gel de sílice (DC).

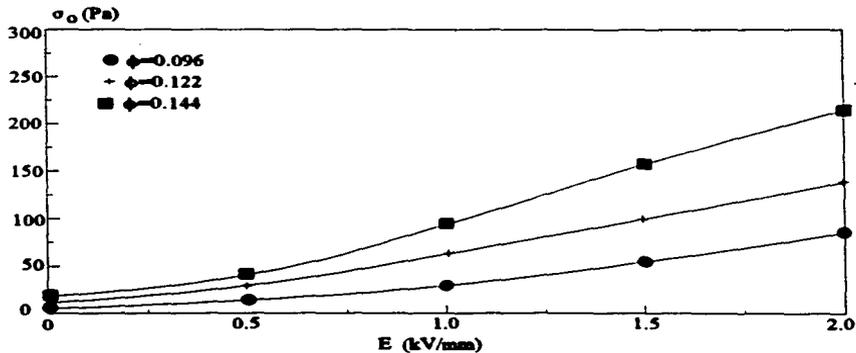


Fig. 4.8. Esfuerzo de cedencia como función del campo eléctrico. ER-S100 con diferentes concentraciones de gel de sílice (AC).

Tabla 4.4. Viscosidad y esfuerzo de cedencia a diferentes concentraciones, ER-S100 (DC).

ER-S100 con $\phi=0.096$			
E(kV/mm)	η (Pa·s)	σ (Pa)	R ²
0	0.12*		
0.5	0.10	5.70	0.99
1.0	0.13	15.21	0.97
1.5	0.09	40.34	0.82
2.0	0.11	69.96	0.93
	0.09	105.48	0.91
ER-S100 con $\phi=0.122$			
0	0.13*		
0.5	0.18	11.99	0.96
1.0	0.17	32.18	0.98
1.5	0.23	70.28	0.94
2.0	0.30	117.34	0.93
	0.30	175.75	0.93
ER-S100 con $\phi=0.144$			
0	0.14*		
0.5	0.44	13.90	0.99
1.0	0.47	50.38	0.91
1.5	0.41	122.23	0.93
2.0	0.34	217.93	0.84
	0.32	312.48	0.76

Tabla 4.5. Viscosidad y esfuerzo de cedencia a diferentes concentraciones, ER-S100 (AC).

ER-S100 $\phi=0.096$			
E(kV/mm)	η (Pa·s)	σ (Pa)	R ²
0	0.12*		
0.5	0.11	7.06	0.98
1.0	0.13	15.21	0.97
1.5	0.15	32.70	0.93
2.0	0.21	57.39	0.94
	0.24	91.82	0.92
ER-S100 con $\phi=0.122$			
0	0.13*		
0.5	0.15	13.21	0.90
1.0	0.15	32.70	0.93
1.5	0.10	66.30	0.82
2.0	0.14	105.60	0.85
	0.24	145.13	0.84
ER-S100 con $\phi=0.144$			
0	0.14*		
0.5	0.30	23.22	0.93
1.0	0.43	48.17	0.94
1.5	0.52	94.31	0.94
2.0	0.49	156.87	0.93
	0.60	214.51	0.94

4.3.2 ER-DOP con gel de sílice ($\phi = 0.096, 0.122, 0.144$)

El compuesto ER-DOP presenta un comportamiento diferente al del ER-S100, en el sentido de que tanto para DC como para AC las intensidades del efecto ER son similares. Sin embargo, en el ER-DOP el efecto ER decae al mantener el campo eléctrico directo por un largo período de tiempo, debido a la alta constante dieléctrica de su fluido base y consecuentemente a un mayor efecto de electroforesis. En cambio, en AC el efecto ER se mantiene constante con el tiempo, a pesar de que el consumo de corriente es mayor que en el ER-S100 debido a que el fluido base tiene una mayor conductividad eléctrica. En este capítulo se presentan únicamente los resultados del estado estacionario correspondientes a un campo eléctrico alterno, los cuales se muestran en las figuras 4.8. y 4.9. Nótese que el efecto ER en el ER-DOP es mas intenso en comparación con el del ER-S100 (Fig. 4.5), incluso mayor que su correspondiente DC (Fig. 4.4). Esto podría deberse a que en un fluido polarizado las estructuras dipolares tienen un mayor radio de acción, por lo que presentan una mayor viscosidad aparente.

En la tabla 4.6 se muestran los resultados del ajuste con el modelo de Bingham. Como puede apreciarse, conforme aumenta la concentración se obtiene un coeficiente de correlación mas bajo. Este resultado es consecuencia de la discrepancia con el modelo de Bingham a bajas velocidades, donde se presenta una región no lineal. Posiblemente se debe a que a altas concentraciones, al aplicar el campo eléctrico el material se torna más rígido .

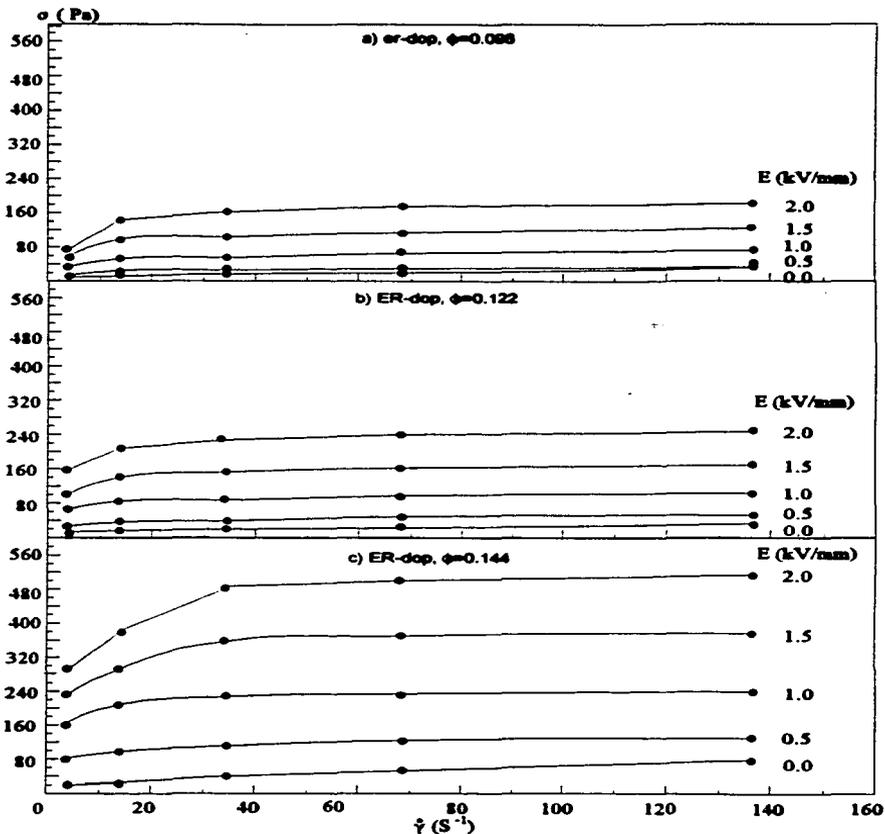


Fig. 4.9 Comportamiento electroreológico del ER-DOP con diferente concentración de partículas, AC.

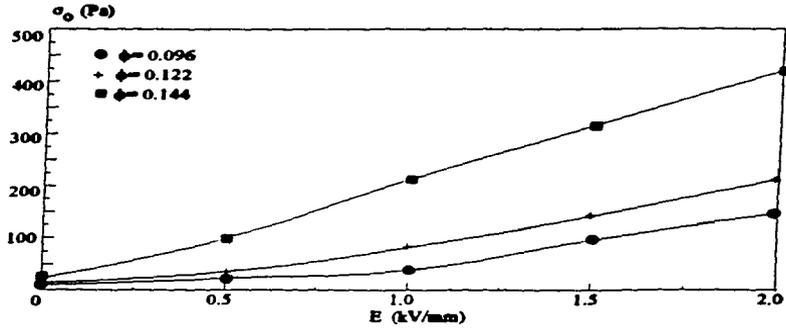


Fig. 4.10. Esfuerzo de cedencia como función del campo eléctrico. ER-DOP con diferentes concentraciones de gel de sílice (AC).

Tabla 4.6 Viscosidad y esfuerzo de cedencia a diferentes concentraciones. ER-DOP (AC).

ER-DOP con $\phi = 0.096$			
E(kV/mm)	η (Pa-s)	σ (Pa)	R^2
0	0.088*		
0.5	0.083	11.66	0.91
1.0	0.075	22.84	0.93
1.5	0.207	39.19	0.93
2.0	0.207	92.47	0.84
	0.283	147.67	0.78
ER-DOP con $\phi = 0.122$			
0	0.094*		
0.5	0.130	14.52	0.99
1.0	0.134	35.37	0.86
1.5	0.161	83.13	0.94
2.0	0.217	142.11	0.84
	0.283	212.58	0.78
ER-DOP con $\phi = 0.144$			
0	0.108*		
0.5	0.411	22.80	0.99
1.0	0.246	99.70	0.84
1.5	0.224	213.03	0.74
2.0	0.542	314.72	0.56
	0.819	418.98	0.54

4.4. Discusión de los resultados

En este capítulo hemos presentado los resultados obtenidos del efecto ER en compuestos con diferentes fluidos base, con el fin de analizar la influencia de la viscosidad y permitividad dieléctrica del fluido base en el efecto ER. Así mismo, hemos estudiado la importancia de la frecuencia del campo eléctrico alterno aplicado y la concentración de partículas. A continuación discutiremos cada uno de los aspectos mencionados.

1. Con respecto a la viscosidad del fluido base, hemos empleado el ER-S100 y el ER-S1000 que tienen una constante dieléctrica similar y diferente viscosidad, siendo mayor la del segundo. En presencia de un campo eléctrico alterno las intensidades del efecto ER observadas en ambos compuestos son completamente diferentes, ya que en el ER-S1000 el efecto ER es casi nulo. En cambio, en DC el comportamiento ER de estos dos materiales es muy similar, como se muestra en la Fig. 4.2. Esto se debe a que el tiempo de respuesta esperado del ER-S1000 debe ser mayor que el del ER-S100, como se analiza en detalle en el capítulo 5.

2. En lo referente a la permitividad dieléctrica del fluido base, hemos comparado los resultados del ER-S100 y del ER-DOP, donde el segundo es el de mayor permitividad. Hemos observado que en DC el ER-DOP no presenta efecto ER, como consecuencia de la electroforesis, es decir, la segregación de las partículas cargadas hacia los electrodos. En cambio, para AC el efecto de electroforesis es prácticamente despreciable, por lo tanto, el efecto ER en el ER-DOP es muy intenso como consecuencia además del aumento del radio de acción de la estructura dipolar en el fluido polarizado del ER-DOP. Cabe mencionar que a pesar de que el efecto ER en AC en el ER-DOP es mayor, la potencia requerida para mantener la diferencia de potencial es mucho mayor con respecto a la del ER-S100, hecho que limita su aplicación tecnológica.

3. En relación al campo eléctrico aplicado, hemos observado que el efecto ER crece al aumentar la intensidad del campo eléctrico. Sin embargo, para campo mayores de 3 kV/mm el fenómeno de electroforesis se intensifica y consecuentemente el efecto ER disminuye. Con respecto a la frecuencia del campo eléctrico, los resultados muestran que en general al incrementar la frecuencia del campo eléctrico disminuye el efecto ER como consecuencia de la existencia de un tiempo de respuesta, excepto para el caso del ER-DOP donde la frecuencia del campo inhibe el efecto de electroforesis en su fluido base altamente polarizado.

4. En lo concerniente a la concentración de partículas, hemos visto que en general el efecto ER se incrementa al aumentar la concentración de las mismas. No obstante, a extremadamente altas concentraciones la viscosidad del compuesto sin campo y la corriente de alimentación para mantener el campo son tan grandes que no resulta práctico para aplicaciones reales.

Por último, en comparación con los modelos teóricos existentes [34,52] los resultados obtenidos muestran que a altas velocidades de corte el comportamiento ER es similar al del modelo de Bingham, es decir, la viscosidad es independiente del campo eléctrico. Sin embargo, a bajas velocidades el comportamiento difiere al del modelo, en otras palabras, la viscosidad es función del campo eléctrico y de la velocidad de corte. Así mismo, los resultados muestran la importancia del tiempo de respuesta en el efecto ER, el cual se estudia con detalle en el siguiente capítulo.

CAPITULO 5

Estado Dinámico Transitorio

El esfuerzo de cedencia y el tiempo de respuesta de los fluidos ER son los dos principales parámetros que determinan la posibilidad de emplear estos fluidos en dispositivos tales como amortiguadores, sistemas de control de vibraciones, embragues, etc. Para evaluar estos parámetros se utiliza una técnica reológica, donde se emplea un viscosímetro de discos paralelos como hemos discutido en el capítulo segundo. A partir de la medición del efecto ER, se obtiene el esfuerzo de cedencia y el tiempo de respuesta mediante observaciones en el estado dinámico estacionario y en el estado transitorio, respectivamente. Como una continuación del análisis del estado estacionario, realizado en el cuarto capítulo, estudiamos ahora una situación mucho más compleja que es el estado transitorio.

En el estado transitorio, en el viscosímetro de discos paralelos (Fig. 2.2), el disco inferior rota a una velocidad angular constante mientras que el disco superior gira un ángulo proporcional al incremento en el torque. Cuando alcanza el equilibrio reológico el disco superior cesa su rotación. De esta forma, al sensar el torque durante el estado transitorio, los datos experimentales contienen mezclada la información de la dinámica del equipo de medición y de la cinética de la formación de la estructura, esta última es la responsable del cambio en las propiedades reológicas. El análisis presentado en la sección 2.2 permite extraer la información de la respuesta transitoria del fluido ER con el fin de analizar el tiempo de respuesta reológico.

En este capítulo se presentan los resultados en estado dinámico transitorio como función del campo eléctrico, la concentración de partículas, la viscosidad y la permitividad dieléctrica del fluido base.

5.1 Método de evaluación

En el viscosímetro de platos paralelos o de flujo de torsión (Fig. 2.2), la muestra se coloca entre dos discos coaxiales paralelos, de radio $R=6.5$ cm, separados una distancia $h=0.2$ cm. El electrodo inferior se fija al sistema de rotación de máquina universal de pruebas mecánicas y el electrodo superior a la celda de torsión. La señal registrada por la celda de torsión y el voltaje aplicado entre electrodos se envían al osciloscopio, el cual se programa para que el tiempo $t=0$ sea el momento de la aplicación del campo eléctrico a la muestra.

Previo a la medición del efecto ER en el estado transitorio, sin aplicar campo eléctrico se espera (del orden de 10 minutos) la estabilidad de la lectura de torque a una velocidad angular constante del disco inferior. El experimento se inicia al aplicar el campo eléctrico y se registra el torque en el transitorio durante los primeros 400 ms, tiempo promedio en el cual se aproxima al estado estacionario. Los campos eléctricos aplicados son 0.5 kV/mm, 1 kV/mm, 1.5 kV/mm y 2 kV/mm, tanto en DC como en AC, ya que la rigidez dieléctrica del fluido base es del orden de 5 kV/mm.

5.2 Resultados experimentales

El análisis de la dinámica del sistema de discos paralelos, presentados en el capítulo 2, permite discriminar el efecto de la inercia del disco superior para poder analizar el tiempo de respuesta de los fluidos ER. De modo que el incremento del torque que genera el fluido ER en función del tiempo se obtiene a partir de la ecuación 2.12,

$$\tau_{ER}(t,E) = I \frac{d^2\theta}{dt^2} + k\theta.$$

donde la inercia del disco superior $I=8.45 \times 10^{-4}$ kg-m² y la constante de la celda de torsión $k=2.8521 \times 10^4$ N-m. Debido a que el torque registrado por el sensor está dado por $\tau=k\theta$, la ecuación

2.12 puede reescribirse como

$$\tau_{ER}(t, E) = 3.1 \times 10^{-8} \frac{d^2 \tau}{dt^2} + \tau \quad \dots (5.1)$$

Nótese que el coeficiente del primer término del lado derecho es muy pequeño, de modo que la contribución de este término puede ser poco significativa. En los resultados que a continuación se presentan se incluye la corrección de la ecuación 5.1.

En las figuras 5.1-5.3 se muestran los resultados del torque medido, la segunda derivada del mismo con respecto del tiempo y el torque ER calculado a partir de la ecuación 5.1, para ER-S100, ER-S1000 y ER-DOP, respectivamente. Las figuras 5.1a, 5.2a y 5.3a corresponden a los datos originales y las figuras 5.1.d, 5.2d y 5.3d presentan el torque calculado a partir de la ecuación 5.1 para cada fluido ER. Como puede apreciarse, el efecto de la inercia del disco superior es poco importante. Sin embargo, se aplicará la ecuación 5.1 a todos los datos experimentales a fin de garantizar la veracidad de los resultados.

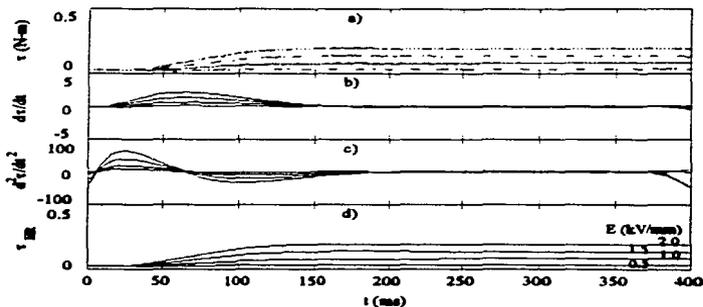


Fig. 5.1 Análisis del estado transitorio de acuerdo a la ecuación 5.2. ER-S100 con $\phi = 0.096$ y $\dot{\gamma} = 34.01 \text{ s}^{-1}$, DC.

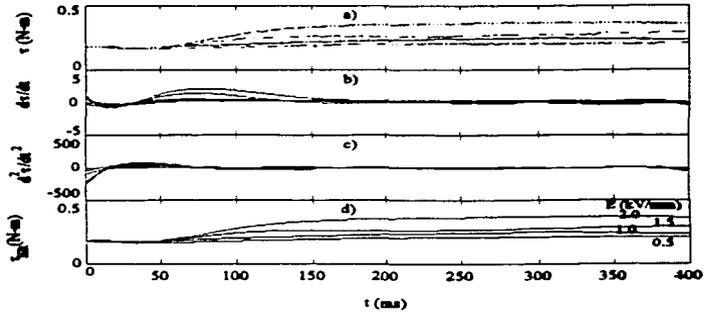


Fig. 5.2 Análisis del estado transitorio de acuerdo a la ecuación 5.2. ER-S1000 con $\phi = 0.096$ y $\dot{\gamma} = 34.02 \text{ s}^{-1}$, DC.

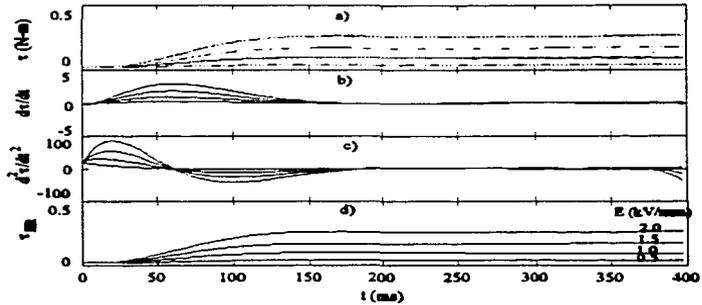


Fig. 5.3 Análisis del estado transitorio de acuerdo a la ecuación 5.2. ER-DOP con $\phi = 0.096$ y $\dot{\gamma} = 34.02 \text{ s}^{-1}$, AC.

5.2.1 ER-S100

Las figuras 5.4a, b, c y d muestran las respuestas transitorias del fluido ER-S100 para velocidades de corte 3.4 s^{-1} , 13.61 s^{-1} , 34.02 s^{-1} y 68.05 s^{-1} , respectivamente. Estos resultados se obtienen en una concentración volumétrica de partículas $\phi=0.096$ y en un campo eléctrico directo.

Para $t=0$, el momento en el que se aplica el campo eléctrico, no se aprecia un incremento inmediato en el torque, sino que esto ocurre hasta después de varios milisegundos, es decir, el material no responde de manera instantánea. El inicio del incremento en el torque ocurre a menor tiempo cuando se incrementa la velocidad de corte, siendo un máximo de 40 ms y un mínimo de 20 ms. Este tiempo puede deberse al equipo de medición, a pesar de que el efecto inercial del disco es despreciable como hemos discutido. Pensamos que la capacitancia del circuito electrónico pudiera ser uno de los orígenes de dicho tiempo, ya que el equipo no está diseñado para medir el tiempo de respuesta.

Otro tiempo importante para caracterizar el estado transitorio es el tiempo que le toma alcanzar el torque máximo, el cual en principio es difícil de determinar, ya que el torque tiene un comportamiento asintótico. Este comportamiento puede caracterizarse mediante un tiempo característico, que representa el periodo de tiempo que le toma al material alcanzar aproximadamente el 63 % del su máximo valor. Este tiempo se discutirá en la sección 5.3.

En las figuras 5.4 a, b, c y d se puede observar que el tiempo de inicio es independiente de la intensidad del campo eléctrico y de la velocidad de corte. En cambio, el tiempo de relajación depende considerablemente de esas variables, como se analiza en la sección 5.3.

Las figuras 5.5 y 5.6 muestran los resultados de manera similar a la figura 5.4, excepto para la concentración de partículas $\phi=0.122$ y $\phi=0.144$, respectivamente. Se observa que la pendiente de la curva τ vs t aumenta, lo que implica que la respuesta es más rápida. Posiblemente se debe que la distancia entre partículas es menor por lo que disminuye el tiempo que les toma unirse para modificar la estructura e incrementar la resistencia al flujo.

Para el caso de la aplicación de un campo eléctrico alterno de 60 Hz, la figura 5.7 muestra la evolución temporal del torque para una intensidad de campo de 2 kV/mm y diferentes

concentraciones de partículas. Estos resultados son comparados con sus correspondientes del caso de la aplicación de un campo eléctrico directo. Obsérvese que el comportamiento en AC es similar al de DC, sólo que el efecto ER es mayor en DC que en AC.

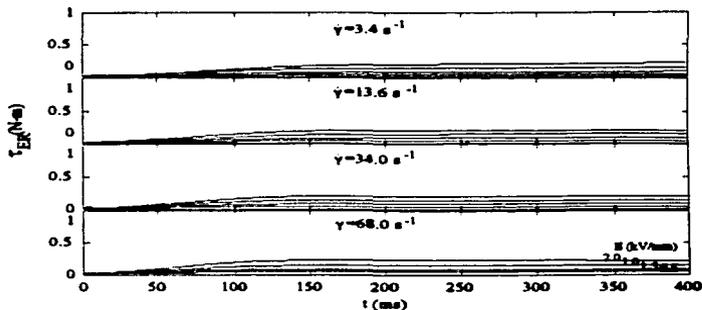


Fig. 5.4 Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-S100 en DC, $\phi = 0.096$.

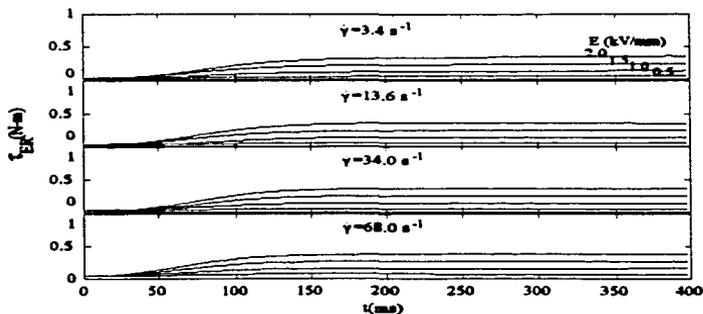


Fig. 5.5 Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-S100 en DC, $\phi = 0.122$.

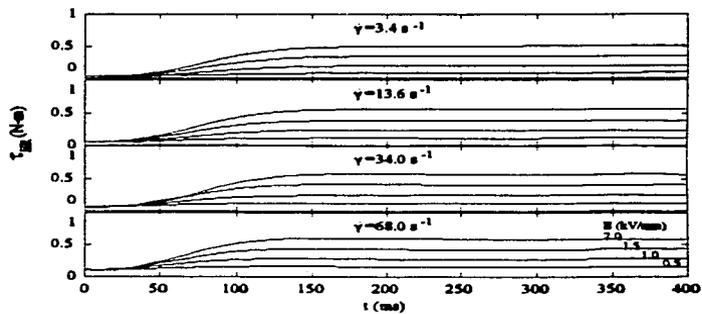


Fig. 5.6 Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-S100 en DC, $\phi = 0.144$.

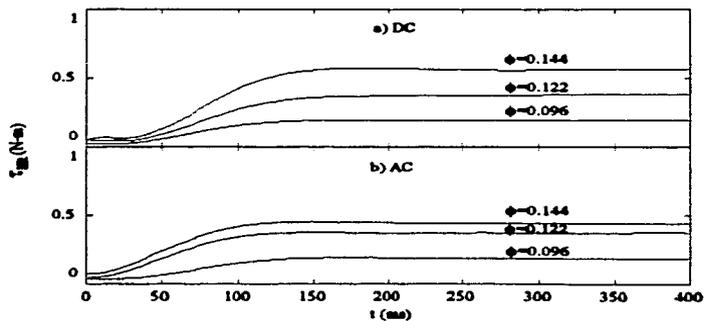


Fig. 5.7 Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-S100 con diferentes concentraciones de gel de sílice, 2 kV/mm, $\dot{\gamma} = 34.01 \text{ s}^{-1}$.

5.2.2 ER-S1000

La figura 5.8 muestra los resultados de manera similar a la figura 5.4, excepto para el fluido ER-S1000. Como se puede observar, en comparación con los resultados obtenidos para el ER-S100, en este caso el incremento en el torque es menor y la repuesta es más lenta. Esto implica que en un fluido de mayor viscosidad, la rapidez de repuesta del efecto ER disminuye debido a que las partículas viajan en un medio que le opone mayor resistencia al movimiento y retarda la transformación de la estructura. Dicho efecto se acentúa al aplicar un campo eléctrico alterno de 60 Hz, en donde no se presentó el efecto ER. Podemos suponer que la respuesta de la suspensión es más lenta que la polarización del campo eléctrico, de modo que se inhibe el efecto ER.

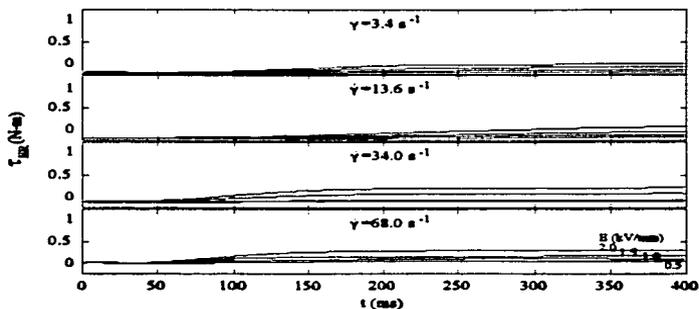


Fig. 5.8 Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-S1000 en DC, $\phi = 0.096$.

5.2.3 ER-DOP

Las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 presentan los resultados obtenidos en ER-DOP, de manera semejante a las figuras 5.4, 5.5 y 5.6, respectivamente. Así mismo, las figuras 5.12, 5.13 y 5.14 corresponden al caso en AC (60 Hz) presentado de forma similar a las figuras anteriores.

En DC, al aplicar el campo eléctrico se presenta un torque máximo seguido de un decaimiento. El comportamiento se acentúa con la concentración de partículas, como lo muestra las figuras. Este fenómeno se reporta frecuentemente en la literatura [27], y se atribuye al efecto de electroforesis, es decir, la segregación de las partículas hacia los electrodos.

En AC el torque máximo coincide con el valor en estado estacionario, es decir, se inhibe el fenómeno de electroforesis con la frecuencia del campo eléctrico, 60 Hz, evitando la aglomeración de partículas al no dar suficiente tiempo a que alcancen el electrodo.

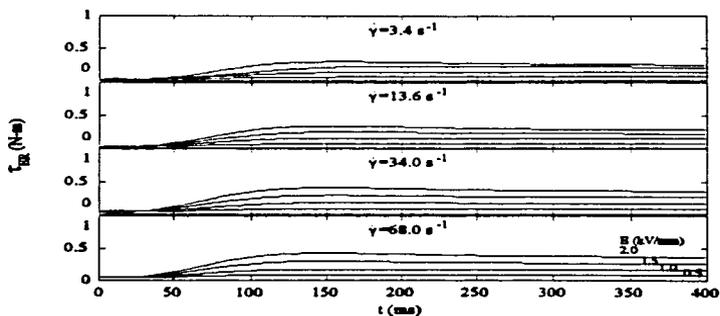


Fig. 5.9 Efecto electrorreológico en su estado transitorio, ER-DOP en DC, $\phi = 0.096$.

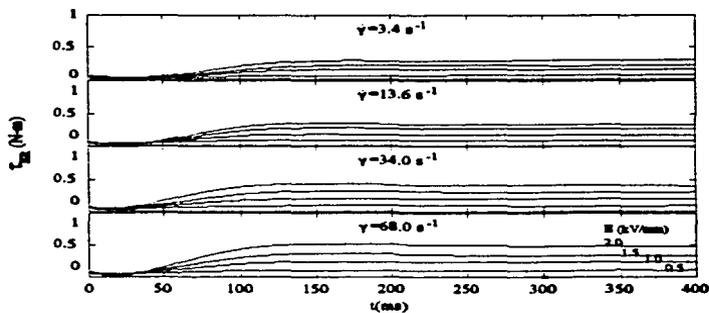


Fig. 5.10 Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-DOP en DC, $\phi = 0.122$.

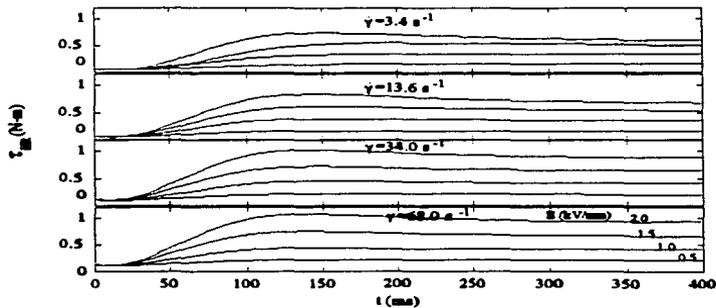


Fig. 5.11 Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-DOP en dc, $\phi = 0.144$.

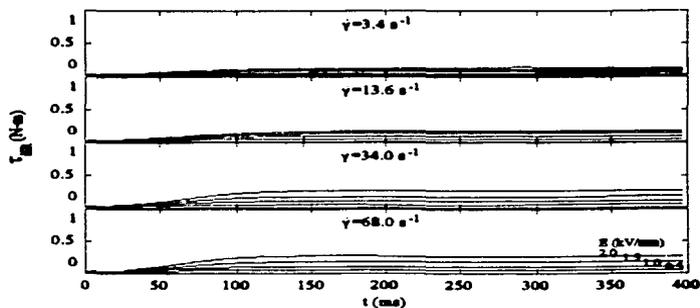


Fig. 5.12 Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-DOP en AC, $\phi = 0.096$.

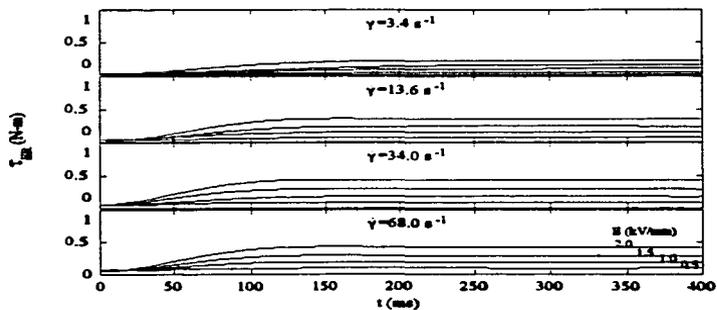


Fig. 5.13 Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-DOP en AC, $\phi = 0.122$.

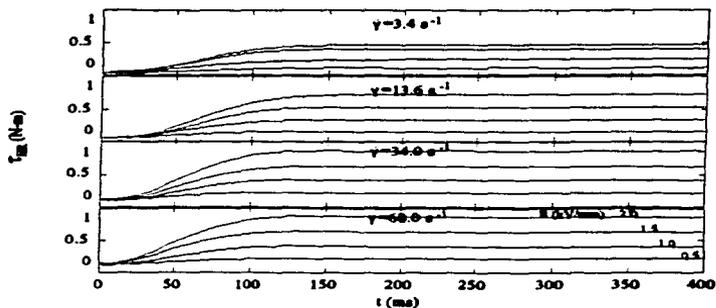


Fig. 5.14 Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-DOP en AC, $\phi = 0.144$.

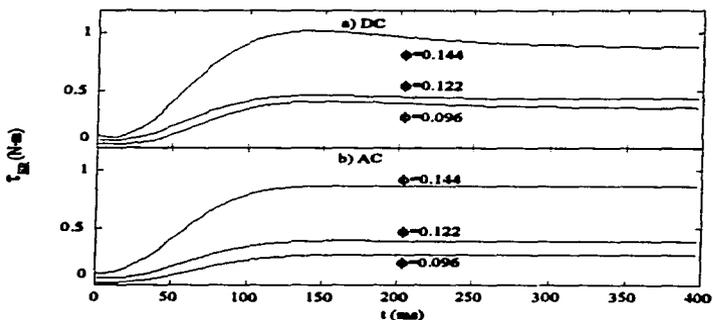


Fig. 5.15. Efecto electroreológico en su estado transitorio, ER-DOP con diferentes concentraciones de gel de sílice, 2 kV/mm, $\dot{\gamma} = 34.02 \text{ s}^{-1}$.

5.3 Análisis de resultados

Se puede estimar el tiempo de respuesta de un fluido ER a partir de la constante de tiempo, definida de la siguiente forma. Supongamos que el incremento en el torque como función del tiempo se puede aproximar por una relación análoga a la de un circuito eléctrico RC [80]:

$$\tau(t) = \tau_f - (\tau_f - \tau_i) e^{-t/T_r} \quad \dots (5.3)$$

donde t es el tiempo durante el cual se aplica el voltaje, τ_f es el torque en el estado estacionario, τ_i el torque para $t=0$ (cuando $E=0$) y T_r es el tiempo de relajación. Este último representa el tiempo requerido para que el sistema alcance el 63% del incremento en el torque, así que:

$$\tau(T_r) = \tau_f - \frac{(\tau_f - \tau_i)}{e} \quad \dots (5.3)$$

Para cada uno de los comportamientos del torque presentados en la sección anterior se calcula el tiempo de relajación a partir de la relación:

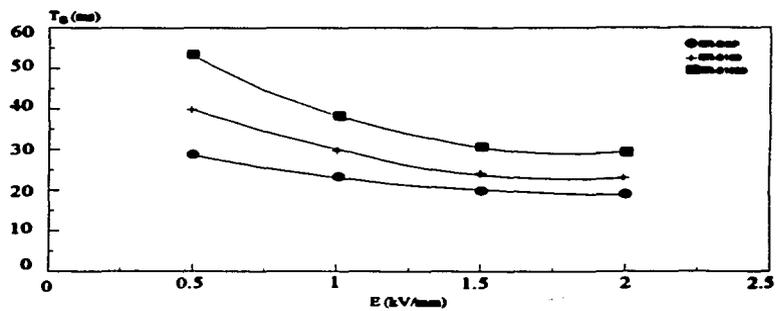
$$\frac{t}{T_r} = \text{Ln} \left(\frac{\tau_f - \tau_i}{\tau_f - \tau(t)} \right) \quad \dots (5.4)$$

Esta función se ajusta a los datos correspondiente al intervalo de tiempo comprendido entre el tiempo de inicio y el estado estacionario. El tiempo de inicio se define como el tiempo al cual el incremento en el torque es mayor que 1% del máximo.

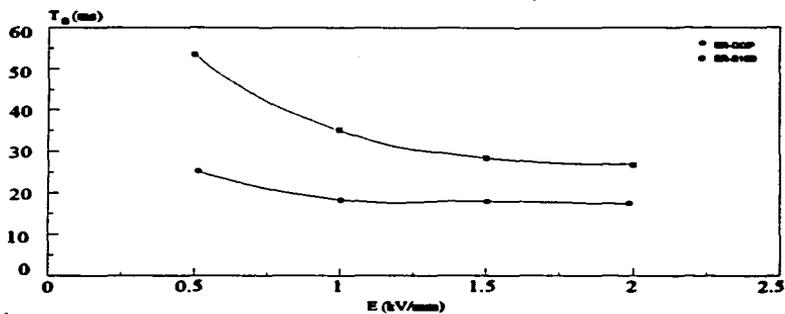
La figura 5.16 muestra la constante de tiempo como función del campo eléctrico y la figura 5.17 corresponde a la dependencia con la velocidad de corte para cada fluido ER. Como se puede apreciar, cuando se emplea un fluido base de alta viscosidad, el fluido ER-S1000, la respuesta es más lenta y se requiere de mayor tiempo para que el sistema alcance el estado estacionario. A tal grado

que al aplicar un campo eléctrico alterno, 60 Hz, la movilidad de las partículas se ve limitada por la resistencia que opone el medio y no alcanza a formar la estructura. Esta es una consecuencia de la limitación de la movilidad de las partículas para orientarse y formar cadenas a la misma velocidad con la que oscila el campo eléctrico cuando la resistencia que opone el fluido base es alta. Esta limitación podría superarse incrementando la intensidad del campo eléctrico o bajando la viscosidad, como es el caso para el ER-S100. Sin embargo, en este último, la constante de tiempo es menor con un campo eléctrico directo que con el campo eléctrico alterno. Es decir, el sistema requiere de mayor tiempo para alcanzar el equilibrio cuando se somete a un campo eléctrico alterno. Cuando se emplea un fluido base de mayor constante dieléctrica y con una viscosidad similar, ER-DOP, la respuesta es más rápida, pero se presenta el efecto de electroforesis, sin embargo, este se contrarresta al aplicar un campo eléctrico alterno.

La figura 5.17 muestra la constante de tiempo como función de la concentración de partículas para el ER-S100 en DC. Se observa un decremento de la constante de tiempo al aumentar la concentración de las partículas. Esto muestra evidencia de que al estar las partículas más próximas, la formación de cadenas es más rápida.

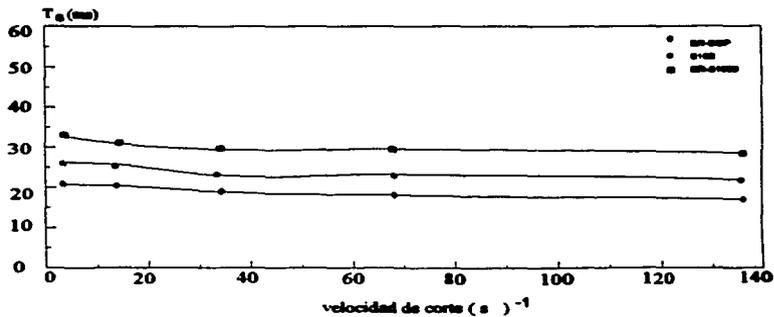


a)

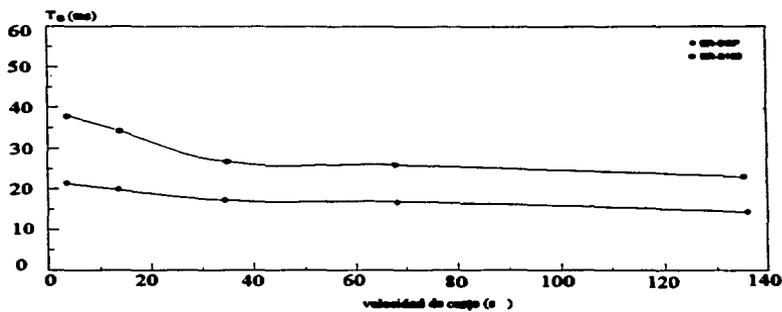


b)

Fig. 5.16 Constante de tiempo en diferentes fluido ER como función del campo eléctrico a) DC y b) AC.



a)



b)

Fig. 5.17 Constante de tiempo en diferentes fluido ER como función de la velocidad de corte a) DC y b) AC.

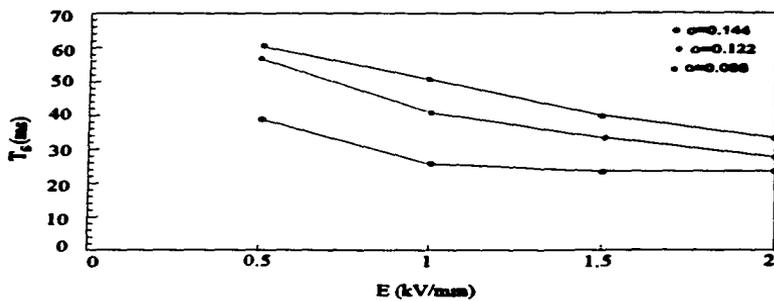


Fig. 5.18 Constante de tiempo como función de la concentración, ER-DOP en DC.

Para analizar los resultados experimentales se discute un poco la teoría propuesta por Ginger y Ceccio [27]. Ellos consideran que el tiempo de respuesta, cuando no hay flujo, es la suma del tiempo de polarización τ_p y del de agregación de las partículas τ_{agg} , considerando estos como eventos independientes. Además, que el tiempo de respuesta reológico está controlado por la polarización, agregación de partículas y el incremento en la deformación. Considerando que el tiempo de formación de la estructura ocurre simultáneamente al de deformación:

$$\frac{1}{\tau_{esfuerzo}} \approx \frac{1}{\tau_{estructura}} + \frac{1}{\tau_{deformación}} \quad \dots (5.5)$$

Es decir, se inicia con la polarización, la cual tiene asociado un tiempo de relajación, y como consecuencia de la interacción dipolar ocurre la atracción entre partículas, de este modo,

$$\tau_{estructura} = \tau_p + \tau_{agg} = \frac{4\eta_f}{\epsilon_0 \epsilon_r \beta^2 E^2} \left[\left(\frac{\pi}{6\phi} \right)^{5/3} - 1 \right] \cdot \epsilon_0 \rho K \quad \dots (5.6)$$

donde η_f y ϵ_r corresponden a la viscosidad y la permitividad del fluido base, β la polarizabilidad relativa, E el campo eléctrico, ϕ la fracción volumétrica, ρ la resistividad eléctrica y K la constante dieléctrica de la suspensión.

Ahora, si se considera que bajo condiciones de flujo, las cadenas se destruyen y se crean consecutivamente hasta establecer un equilibrio, se puede definir un tiempo de deformación, como aquel tiempo que transcurre entre dos rompimientos consecutivos en una cadena, siendo proporcional a:

$$\tau_{\text{deformación}} = \frac{\gamma_c}{\dot{\gamma}} \quad \dots (5.7)$$

donde γ_c es la deformación característica y $\dot{\gamma}$ la velocidad de corte. Es decir, el tiempo de deformación disminuye con la velocidad de corte.

Cualitativamente, este modelo describe nuestros resultados experimentales, es decir, a menor viscosidad, mayor campo eléctrico, polarización relativa y concentración de partículas, menor es el tiempo de formación de la estructura. Además, a altas velocidades de corte el tiempo de respuesta reológico está dominado por la deformación. A bajas velocidades depende de la polarización y agregación de partículas, aproximándose a las condiciones estáticas [46].

Conclusiones

En los modelos propuestos para explicar el efecto ER hay consenso de que el primer paso para la manifestación del efecto ER es la polarización de las partículas. De forma que la atracción dipolar da lugar a la formación de cadenas de partículas orientadas en la dirección del campo eléctrico. De este modo, las partículas se mantienen unidas por atracciones electrostáticas. Al someterlas a condiciones de flujo presentan un comportamiento del tipo Bingham, es decir, el material fluye hasta que el esfuerzo de corte es mayor que el esfuerzo de cedencia, siendo éste el que genera el rompimiento de las cadenas. Esto hace suponer que se establece un equilibrio entre rompimiento y formación de nuevas cadenas que da origen al efecto ER macroscópico.

Hemos analizado la estabilidad energética de la estructura de los fluidos ER en condiciones estáticas, encontrando evidencia de que el origen de la curvatura de las cadenas se debe al fenómeno de electroforesis. En el modelo propuesto en este trabajo se supone que las partículas tienen sólo momento dipolar y que el fluido presenta una pequeña densidad de carga monopolar. En presencia del campo eléctrico la carga es atraída hacia los electrodos, dando lugar a una distribución espacial de carga. Esta carga se adhiere a las partículas al ser atraída por los dipolos, de modo que la energía de interacción electrostática tiene una contribución de la carga monopolar adicional a la dipolar. La magnitud de la carga monopolar es del orden de $q_{\text{monopolar}} = 1.03 \times 10^{-18} \text{ C}$, que comparada con la correspondiente al dipolo, $q_{\text{dipolar}} = 1.828 \times 10^{-15} \text{ C}$, es muy pequeña. Sin embargo, es suficiente para modificar la estructura de las cadenas. Además, la presencia de los monopolos eléctricos debilita la estructura.

Para el estado estacionario, hemos estudiado la importancia del fluido base, la frecuencia del campo eléctrico alterno aplicado y la concentración de partículas en el efecto ER. Hemos observado que en AC la viscosidad del fluido base es determinante, contrario a lo sucedido para

el caso DC. Con respecto a la permitividad dieléctrica del fluido base, hemos encontrado que en DC ésta incrementa el efecto de electroforesis, el cual inhibe el fenómeno ER. Sin embargo, en AC los resultados muestran que dicha permitividad incrementa el efecto ER, lo cual podría deberse al aumento del radio de acción de la estructura dipolar en un fluido altamente polarizado. En relación al campo eléctrico aplicado, hemos confirmado que el efecto ER crece al aumentar la intensidad del campo. Con respecto a la frecuencia del campo eléctrico, los resultados muestran que en general al incrementar la frecuencia del campo eléctrico disminuye el efecto ER como consecuencia de la existencia de un tiempo de respuesta. Así mismo, en lo concerniente a la concentración de partículas, hemos visto que en general el efecto ER se incrementa al aumentar la concentración de las mismas. Por otro lado, a bajas velocidades el comportamiento ER observado difiere al del modelo de Bingham en el sentido de que la viscosidad es función del campo eléctrico y de la velocidad de corte.

El estado dinámico transitorio se caracteriza por el tiempo de respuesta, el cual es en principio función del campo eléctrico, la velocidad de corte, la concentración de partículas, la permitividad dieléctrica y viscosidad del fluido base. Se observa que la intensidad del campo eléctrico reduce significativamente el tiempo de repuesta, puesto que mayor interacción dipolar acelera la formación de la estructura de cadenas. Así mismo, a mayor intensidad del campo es menor la diferencia del tiempo de respuesta causados por diferentes fluidos base. Por otro lado, los resultados obtenidos muestran una invarianza del tiempo de respuesta con respecto a la velocidad de corte, lo cual podría deberse a que el tiempo de formación de la estructura es menor que el tiempo de deformación dentro del modelo de Ginger y Ceccio [27]. En relación a la concentración de partículas, hemos observado una disminución en el tiempo de respuesta al aumentar la concentración, debido a la reducción de la distancia promedio entre partículas y consecuentemente un menor tiempo de agregación. Por último, hemos visto que la viscosidad del fluido base desfavorece el efecto ER y particularmente el tiempo de respuesta, como consecuencia del retardo de la agregación de las partículas. Este hecho se acentúa al aplicar un campo eléctrico alterno.

Cabe mencionar que en general el ER-DOP tiene menor tiempo de respuesta en comparación con los fluidos ER-S100 y ER-S1000, en adición de un mayor efecto ER en AC. Esto sugiere que el tiempo de respuesta y la intensidad del efecto ER podrían estar íntimamente relacionados. Si consideramos que la intensidad del efecto ER en su estado dinámico está relacionado con la probabilidad de encontrar partículas unidas, la cual es inversamente proporcional al tiempo de respuesta, por lo tanto, se espera un mayor efecto ER en una mezcla de menor tiempo de respuesta.

Por otro lado, en los experimentos realizados hemos sometido los fluidos a movimiento continuo y hemos obtenido un esfuerzo de cedencia menor que 1 kPa, valor considerado insuficiente para la aplicación tecnológica. Sin embargo, para el caso de deformaciones pequeñas, por ejemplo, al someter la mezcla a una vibración de alta frecuencia y pequeña amplitud (del orden del diámetro de las partículas), el efecto ER podría ser mayor, por no haber la misma cantidad de rompimiento de cadenas. Esto ampliaría el campo de aplicación de los fluidos ER.

En resumen, hemos estudiado la importancia del fluido base en el efecto ER, encontrando que aún cuando la constante dieléctrica del fluido base sea similar a la de las partículas, se observa el efecto ER, contrario a lo predicho en la literatura []. Ciertamente, su efecto ER en DC es mínimo. En cambio, para AC la intensidad del efecto ER es mayor en comparación con la de las mezclas basadas en fluidos de menor permitividad dieléctrica. Esto en principio amplía el conjunto de fluidos ER con mayor esfuerzo de cedencia en AC.

El presente trabajo puede extenderse al estudio del efecto ER en vibraciones, en fluidos con alta permitividad dieléctrica y baja conductividad eléctrica, así como en soluciones poliméricas polarizables, donde no se requieren partículas sólidas, por lo que se evita la sedimentación y abrasión que limitan las aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1] **Adriani P. M. and Gast A. P.**, "A microscopic Model of Electrorheology", *Phys. Fluids* **31** (10), pp.2757-2768, 1988.
- [2] **Allan R.S and Mason S.G.**, "Particle Behavior in Shear and Electric Fields I. Deformation and Burst of Fluids Drops", *J. Coll. Int. Sci.* **267A**, pp. 45-61, 1962.
- [3] **Allan R.S and Mason S.G.**, "Particle Behavior in Shear and Electric fields II. Rigid Rods and Spherical Doublets", *J. Coll. Int. Sci.* **267A** , pp. 62-76, 1962.
- [4] **Arp. P.A. y Mason S.G.**, "Particle Behavior in Shear and Electric fields 8. Interactions of Pair of Conducting Spheres (Theoretical)", *Coll. Polym. Sci.* **255** (6), pp. 566-584, 1977.
- [5] **Arp. P.A. y Mason S.G.**, "Particle Behavior in Shear and Electric Fields 9. Interactions of Pair of Conducting Spheres (Experimental)", *Coll. Polym. Sci.* **255** (6), pp. 980-993, 1977.
- [6] **Barnes H. A., Hutton J. F., Walters K.**, "An Introduction to Rheology", Elsevier, Amsterdam, 1989.
- [7] **Blacwood K. M. y Block H.**, "Semi-conducting Polymers in Electrorheology: A Modern Approach to Smart Fluids", *Trends in polymer Science*, **1** (4), pp.98-105, 1993.
- [8] **Block H. and Kelly J. P.** "Electro-rheology", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **21**, pp.1661-1677 (1988).
- [9] **Block H, Kelly P. J.,** UK Patent Application 8503581, 1986; US Patent Specification 4687589, 1987
- [10] **Brooks D., Goodwin J., Hjelm C, Marshall L y Zukski C,** *Colloids Surf.*, **18**, 293, 1986.
- [11] **Carlson J. D., Catanzarite D. M., y Clair K. A.,** "Commercial Magneto-rheological Fluids Devices", *Proceeding of the 5th Int. Conf. on Electro-rheological, Magneto-Rheological Suspensions and Associated technology.* Sheffield, 10-14 july, 1995.
- [12] **Cerda C.M., Foister R.T. y Mason S.G.,** "Experimental Observations of Electrooptical Phenomena in Vibrated Suspensions", *J. Coll. Int. Sci.* **82** (2), pp.577-579, 1981.
- [13] **Chaffey C.E. y Mason S.G.,** "Particle Behavior in Shear and Electric Fields: IV. The Viscosity of Suspensions of Nonrotating Ellipsoids", *J. Coll. Sci.* **20**, pp. 330-340, 1965.
- [14] **Chaffey C.E. y Mason S.G.,** "Particle Behavior in Shear and Electric Fields: V. Effect on Suspension Viscosity" *J. Coll. Int. Sci.* **27**, pp. 115-126, 1968.

- [15] Chen Tian-jie, Zitter R. N., y Tao R., "Laser Diffraction Determination of the Crystalline Structure of an Electrorheological Fluid", *Physical Review letters*, **68** (16), 2555-2558, 1992.
- [16] Chen Y., Sprecher A. F., Conrad H., "Electrostatic Particle-Particle Interaction in Electrorheological Fluids", *J. Appl. Phys.* **70** (11), pp. 6796-6803, 1991.
- [17] Clercx H.J.H. y Bossi G., "Many-body Electrostatic Interactions in Electrorheological Fluids", *Phys. rev. E.* **48**1 (4), pp. 2721-2738, 1993.
- [18] Collger A.A. y Clegg D.W., "Rheological Measurements". Elsevier Applied Science, London, 1988.
- [19] Coulter J. P., Weiss K. D, Carlson J. D. "Electrorheological Materials and their usage in intelligent material, systems and structures. part. II ; Applications". *Recent advances in sensory and adaptive materials and their applications.* Technomic Publishing, 1992.
- [20] Davis L. C., "Polarization force and conductivity effects in electrorheological fluids". *J. Appl. Phys.* **72** (4), 1992. pp.1334-1340.
- [21] Davis L. C., "The metal-particle/insulating oil system: An idel electrorheological fluid". *J. Appl. Phys.* **73** (2), 1993. pp.680-683.
- [22] (a) Filisko, F. and W. Armstrong U.S. patent 4,744,914, 1988; (b) Filisko, F. and W. Armstrong U.S. patent 4,879,056, 1989; (c) Filisko, F. and W. Armstrong EP patent 265,252, 1988; (d) Filisko, F. and W. Armstrong EP patent 313,351, 1989.
- [23] Firoozian R., "A non-lineal model for dynamic response on electrorheological fluids in flow mode". *J. Intelligent materials systems and structures . vol. 7*, 1996. pp. 489-493.
- [24] Fox Robert W., Alan T. Mc Donald. "Introducción a la mecánica de fluidos". Mc Graw-Hill, 1995, México.
- [25] Gast A. P. and Zukoski F., "Electrorheological Fluids as colloidal Suspensions", *Advances in colloid and interface science.* **30**, pp.153-202, 1989.
- [26] Ginger J. M. and Elie L. D., "Optical Probes of Structure Formation in electrorheological Fluids", in *Proceedings of the Conference on Electrorheological fluids, Carbondale. II*, R. Tao, Ed. (World Scientifics, Singapore), pp.23-36, 1992.
- [27] Ginder J.M. y Ceccio S. L., "The effect of electrical transients on the shear stresses in electrorheological fluids". *J. Rheo.* **39** (1), pp 211-334, 1995.
- [28] (a) Goossens, J. E. P. patent 170,939, 1986; (b) Goossens, J., G. Oppermann, W. Grape. U.S. patent 4,645,614, 1987.

- [29] (a) Goossens, J. E. P. patent 201,827, 1986; (b) Goossens, J., G. Oppermann, W. Podszun and V. Hartel U.S. patent 4,668,417, 1987.
- [30] (a) Goossens, J., G. Oppermann and W. Grape. DE patent 3,536,934, 1987; (b) Goossens, J., G. Oppermann and W. Grape. U.S. patent 4,702,855, 1987.
- [31] Gulley G. L y Tao R, "Static Shear Stress of Electrorheological Fluids", *Phy. Rev. E*, **48**(4), pp. 2744-2751, 1993.
- [32] Halsey T. C, Toor W., "Structure of Electrorheological Fluids". *Phy. Rev. Letters*, **68** (22), pp. 2820-2823, 1990.
- [33] Halsey T. C. "Electrorheological Fluids". *Science*, **28**, pp.761-766, 1992.
- [34] Halsey T. C, Martin J.E., y Adolf Douglas., "Rheology of Electrorheological Fluids", *Phy. Rev. Letters*, **68** (10), pp. 1519-1522, 1992.
- [35] Halsey T. C. and Martin J. E., "Electrorheological Fluids", *Science. American*, october, pp. 42-48, 1993.
- [36] Hill J. C., y Van Steenkiste, "Response Times of Electrorheological Fluids", *J. Appl. Phys*, **70** (3), pp. 1207-1211, 1991.
- [37] Hemp J., "Theory of Dilute Electro-rheological Fluids", *Proc. R. soc. London A*, **434**, pp. 297-315, 1991.
- [38] Jackson J. D., "Classical Electrodynamics", J. Wiley, New York, 1992.
- [39] Jordan T. C., Wilkey W. y Shaw M T., "A Rheo-optical and Materials Approach to Electrorheology", *Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena*, pp. 493-499, 1988.
- [40] Jordan T.C. y Shaw M.T., "The Kinetics of Microstructural Changes in Electrorheological Fluids", presentado en The annual meeting of the American Institute of Chemical Engineers, Washinton DC, paper No. 44B, diciembre 1988.
- [41] Jordan T.C, y Shaw M.T., " Liquid Crystalline Polymers in Electrorheological Fluids", presentado en Materials Research Society Fall Meeting, Boston MA, paper No. I. 6.5, Noviembre, 1988.
- [42] Jordan T.C, y Shaw M.T., "Electrorheology", *IEEE Transaction on electrical insutation*, **24** (5),pp. 849-877, 1989.
- [43] Klass D. L. y Martinek T.W., "Electroviscous Fluids I. Rheological Properties", *J. Appl. Phys*. **38** (1), pp.67-74, 1967.

- [44] Klass D. L. y Martinek T.W., "Electroviscous Fluids II. Electrical Properties", *J. Appl. Phys.* **38** (1), pp. 75-80, 1967.
- [45] Klingenberg D.J., Zukoski C.F., *Langmuir*, No. 6, pp-15-21, 1990.
- [46] Klingenberg D.J. y Zukoski C.F. y Hill J. C., "Kinetic of Structure Formation in Electrorheological Suspension", *J. Appl. Phys* **73**(9), pp. 4644-4648, 1992.
- [47] Kordonsky W, "Elements and Devices Based on Magnetorheological Effect", *Recent advances in adaptive and sensory materials and their applications*, editado por C. A. Rogers y R. C. Rogers, Technomic Publishing Company, Inc. pp. 755-764.
- [48] Korobko, E. V., "The Main Properties of ERF's and Their Applications". *Proceedings of the Conference on Recent advances in adaptive and sensory materials and their applications*. Blacksburg, Virginia April 27-29, Technomic publishing Co., inc, 1992.
- [49] Laun H. M. "Rheometry on Magnetorheological (MR) fluids 1. Steady Shear Flow in Stationary Magnetic Fields", *Rheol. Acta* **35**, pp.417-432, 1996.
- [50] MacDiarmid A. G., Chiang J.C., Richter A. F., Somasiri N.L.D. y Epstein A. J. *Conducting Polymers* (Alcacer, D., ed.), pp. 105-120, Reidel, 1987.
- [51] Marks, A. US patent 4,442,019, 1984.
- [52] Marshall L., Zukoski F, Goodwin J. "Effects of the Electric Fields on the Rheology of Non-aqueous Concentrate Suspensions", *J. Chem. Soc. Faraday Transactions* **85** (9), pp. 2785-2795, 1989.
- [53] Martin J. E. y Anderson R.A., "Chain Model of Electrorheology", *J. Chem. Phys.* **104** (12), pp. 4814-4827, 1996.
- [54] Mokeev A., Korobko E. y Vedemikova L., "Structural Viscosity of Electrorheological Fluids", *J. of non-Newtonian fluids mechanics*, **42**, pp. 213-230, 1992.
- [55] Okagawa and Mason S.G., "Particle Behavior in Shear and Electric Fields VI. Microrheology of rigid spheroids", *J. Coll. Int. Sci.* **47** (2), pp. 568-587, 1974.
- [56] Okagawa A. y Mason S.G., "Particle Behavior in Shear and Electric Fields VII. Orientation Distribution of Cylinders", *J. Coll. Int. Sci.* **47** (2), pp. 568-587, 1974.
- [57] Okagawa A.. y Mason S.G., " Kinetics of Flowing Dispersions 11. Dielectric Constant of Streaming Suspensions", *J. Chem. Soc. Farad I*, . **74** , pp. 1242-1253, 1978.
- [58] O'Leary H.,K. "Electrorheological Materials and Fluids:Recent Advances in Multifunctional Technology", *Trends in Polymer Sci. Conf. report* **3** (2), pp. 66-69, 1995.

- [59] Pedersen, N. US patent 4,737,886, 1988.
- [60] Peel D. J., Korobko, E. V., and Bullough W. A. "The Time Response Sequence of an Electro-Rheological Fluid", Proceedings of the Actuator 90 congress. Bremen, pp.144-149, 1990.
- [61] Petrzhhik G. G., Chertkova O. A. and Trapeznikov A. A. Russian Patent Specification 715596, 1980.
- [62] Petrzhhik G. G., Chertkova O. A y Trapeznikov A. A, " Electrorheological Properties of Non-aqueous Dispersion of Titanium Dioxide and Silicon Dioxide in Relation to the Concentration end Moisture Content of Filled", Kolloid. Zh. vol. 43, pp. 1134-1140, 1981.
- [63] Pisarev S. A., Petrzhhik G. G., y Trapeznikov A. A, "Increase in the Dielectric Constant of a Non-aqueous Dispersion of Titanium Dioxide with Increase Elecrtic Field Strength", Coll. J. USSR vol. 48, No. 1, pp. 155-158, 1986.
- [64] Reitz, R. P. OW090/00583, 1990.
- [65] Rosen R. y Pohl H. A., Polym. Sci., Polym. Chem. Ed. 4, p.1135, 1966.
- [66] See H. y Saito T., "Layered Model of Electrorheological Fluids under Flow", Rheol Acta. No. 35, pp 233-241, 1996.
- [67] Shulman Z. P. , Kordonsky V. I., Zaltsgendler E. A., "Structure, Physical Properties and Dynamics of Magnetorheological Suspensions", International journal of multiphase flow, 12 (6), pp. 935-955, 1996.
- [68] Scaife B. K., "Principles of Dielectrics", Oxford university press, 1989.
- [69] (a) Stangroom, J. U.S. patent 4,033,892, 1977; (b) Stangroom, J. G.B. patent 1,501,635, 1978; (c) Stangroom, J. DE patent 2,530,694, 1976.
- [70] (a) Stangroom, J. U.S. patent 4,129,513, 1978; (b) Stangroom, J. G.B. patent 1,570,234, 1980;
- [71] Stangroom J. E., "Electrorheological Fluids", Phys. Technol. 14, 290-296, 1983.
- [72] Sugimoto N Bull JSME 20 1476, 1977.
- [73] Takeo, K. and Y. Omura US patent 3,984,339, 1976.
- [74] Tang X., Chen Y., Conrad H., "Structures and Interaction Force in a Model Magnetorheological System", J. Int. mat. sys. and structures. vol. 7, pp.517-525, 1996.

- [75] **Tao R, Sun J., "Three-Dimensional Structure of Induced Electrorheological Solids", *Phy. Rev. Letters*, 67 (3), pp. 398-401, 1991.**
- [76] **Van Beek L. K. H., in *Progress in dielectrics*, edited by J. B. Birks (CRS, Cleveland. OH), vol. 7, pp. 69-114, 1967.**
- [77] **Van Wazer, Lyons J. W., Kim K. Y. y Colwell R. E., "Viscosity and Flow Measurements, A Laboratory Handbook of Rheology", Interscience publishers, New York, 1963.**
- [78] **Weiss K. D. y Carlson J. D., "Macroscopic Behavior of the Electrorheological Fluids Techniques for Measuring Response Time". *Int. J. Modern Phys. B*, 6 (15&16) pp.2609-2623, 1992.**
- [79] **Weiss K. D., Carlson J. D., "Material Aspects of Electrorheological Systems", *J. Intelligent materials systems and structures*, vol. 4. pp. 13-34. 1993.**
- [80] **Weiss K. D., Coulter J. P., Carlson J. D., "Electrorheological Materials and their Usage in Intelligent Materials Systems and Structures. part. 1. Mechanics, Formulation and Properties", *Recent advances in sensory and adaptive materials and their applications*. Technomic publishing company Inc. Lancaster, PA, 1992.**
- [81] **Wen Wejia y Lu Kunquan,"Frequency Dependence of Metal-Particle/Insulating Oil Electrorheological Fluids", *App. Phys. lett.* 67 (15), pp.2147-2148, 1995 .**
- [82] **Whitte M."Computer Simulation of an Electrorheological Fluid", *J. of non-Newtonian fluids mechanics*, 37, pp. 233-263, 1990.**
- [83] **Whitte M., Bullough W. A., "The structure of Smart Fluids", *Nature*, vol. 358, p.373, 1992.**
- [84] **Winslow W. M., US Patent Specification 2417850, 1947.**
- [85] **Winslow W. M., "Induced Fibrillation of Suspensions", *J. Appl. Phys.* 20, pp.1137-1140, 1949.**
- [86] **Winslow, W. U.S. patent 2,611,596, 1953.**
- [87] **Winslow, W. U.S. patent 2,611,825, 1953.**
- [88] **Zia I.Y. Z., Cox R.G., y Mason S.G., "Chain of Particles in Shear Flow", *Science* 152, pp. 1405-1406, 1966.**
- [89] **Zia I.Y. Z., Cox R.G., y Mason S.G., "Orderer Aggregates of Particles in Shear Flow", *Proc. Roy Soc. A*300, pp. 421-441, 1967.**