CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS: SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIONES

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

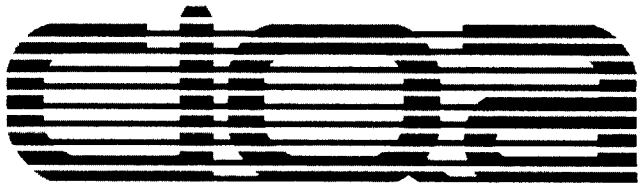
PRESENTA:

OSCAR HERNÁNDEZ IBARRA

CENTRO DE INFORMACIÓN
11 NOV 2005
RECIBIDO

SALTILLO, COAH. **SEPTIEMBRE 2005.**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



OSCAR HERNÁNDEZ IBARRA

FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS: SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIONES

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

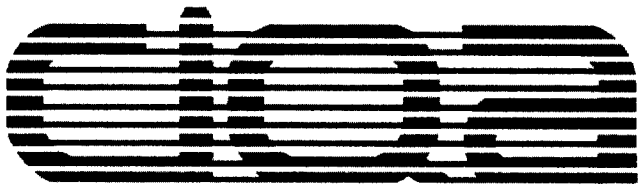
OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

ASESOR:

DR. OLIVERIO S. RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ

SALTILLO, COAH. **SEPTIEMBRE 2005.**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



OSCAR HERNÁNDEZ IBARRA

FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS: SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y APLICACIONES

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

EVALUADORES:

M. C. MARÍA ESTHER TREVIÑO MARTÍNEZ

DR. ENRIQUE JAVIER JIMÉNEZ REGALADO

SALTILLO, COAH. **SEPTIEMBRE 2005.**

DEDICATORIA

A Mis padres:

José Hernández Carrillo†

Elva Ibarra Romero

A Mí Esposa por su amor, apoyo y comprensión

y a Mí Hija

AGRADECIMIENTOS

' A Los Maestros de Especialidad de Procesos de Transformación de Plásticos '

Al CIQA

Por la beca otorgada.

CONTENIDO

PREFACIO III

GLOSARIO DE TÉRMINOS IV

LISTA DE FIGURAS V

LISTA DE TABLAS VI

CAPÍTULO I 1

Introducción 1

CAPÍTULO II 3

Revisión Bibliográfica 3
1. MATERIALES INTELIGENTES 3
2. FLUIDOS SENSIBLES A CAMPOS EXTERNOS 3
3. FLUIDOS MAGNETOREOLOGICOS (MRF) 3
3.1. Constitución de los MRF 4
3.1.1. La componente dispersa 4
3.1.1.1. Tipos de partícula y propiedades magnéticas 4
3.1.1.2. Características de las partículas 5
Tamaño y forma de partícula 6
Fracción volumen ϕ 6
3.1.2. El medio portador 7
3.1.2.1. Características de la fase portadora 7
3.1.3. El componente auxiliar 8
3.1.3.1. Características del componente auxiliar 8
3.1.4. Aditivos 9
3.1.5. Tamaño de partícula, intervalos y compuestos empleados en MRF 9
3.2. Cambio en propiedades reológicas de los MRF 11
3.2.1. Cambio microestructural 11
3.2.2. La respuesta magnetoreológica 13
3.3. Reología de MRF 15
4. FLUIDOS ELECTROREOLÓGICOS ERF 17
5. FERROFLUIDOS (FF) 18
6. Diferencias entre ERF, MRF, y FF 18

CAPÍTULO III 20

Estado de Arte 20
1. PREPARACIÓN DE MRF 20
1.1. Cantidades y elementos 20
1.2. Síntesis de partículas magnéticas 23
1.2.1. Técnica sol-gel 23
1.2.2. Técnica de coprecipitación química 23
1.2.3. Síntesis por nano-emulsión. 23

1.3. Caracterización de MRF 25
1.3.1. Caracterización de partículas 25
1.3.1.1. Difracción de rayos-X (DRX) 25
1.3.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) 27
1.3.1.3. Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) 27
1.3.1.4. Microscopía Óptica (OM) 27
1.3.1.5. Caracterización magnética de polvos 29
1.3.2. Caracterización magnética de MRF sin esfuerzos (saturación de MRF) 31
1.3.3. Caracterización reológica 32
1.3.3.1. Caracterización reológica de MRF sin campo (off-state) 32
1.3.3.2. Caracterización reológica de MRF con campo (on-state) 33
1.4. Estabilidad de la dispersión 35
1.4.1. Aglomeración de partículas 37
1.5. Recubrimiento de partículas 38

CAPÍTULO IV 39

Aplicaciones 39
1. ACTUADORES 39
2. PRÓTESIS 41
3. ESPONJAS CON MRF 41
4. EMBRAGUES Y FRENOS 42
5. PULIDO DE SUPERFICIES 43
6. APLICACIONES EN MEDICINA 44

CAPÍTULO V 46

Conclusiones y Recomendaciones 46
1. CONCLUSIONES 46
2. RECOMENDACIONES 47

APÉNDICE 48

BIBLIOGRAFÍA 50

Prefacio

El presente trabajo aporta en el capítulo **I** una breve introducción del inicio de los fluidos magnetoreológicos (MRF). En el capítulo **II** clasifica a los MRF dentro de los materiales inteligentes, hace la distinción entre los MRF, Fluidos electro-reológicos (ERF) y Ferro-fluidos (FF), así como también define y da nota de los elementos principales que conforman un MRF (la fase dispersa, líquido portador y la componente auxiliar). Los capítulos **III** y **IV** abordan lo referente a la elaboración, caracterización y aplicación de los MRF.

El contenido del escrito se considera adecuado para servir como guía en la elaboración de este tipo de fluidos.

Glosario de términos

DRX	Difracción de rayos-X
ERF	Fluidos Electroreológicos
FF	Ferro-fluidos
MRF	Fluidos Magnetoreológicos
SEM	Microscopía electrónica de barrido
TEM	Microscopía electrónica de transmisión
M	Magnetización del material
H	Intensidad de campo magnético
B	Inducción magnética
(T)	Tesla
DC	Corriente directa
V	voltaje
λ	Longitud de onda (1.5404 Å)
CuKα	Radiación de Cu, niveles Kα
β	Ancho de la altura media de pico en DRX
K	Constante de proporcionalidad (0.9)
θ	Ángulo de barrido en DRX
χ	Susceptibilidad magnética
$\varnothing$	Diámetro de partícula
ϕ	Fracción volumen
η	Viscosidad del fluido Pa-s
η_0	Viscosidad del fluido sin carga de partículas Pa-s
τ_y	Esfuerzo total (Pa)
τ_f	Esfuerzo de corte (Pa) asignado a un campo aplicado en Am^{-1}, oersteds
$\dot{\gamma}$	Velocidad de corte $(s^{-1}) = \frac{dv}{dx}$
Ms	Saturación de MRF
Js	Saturación del material
T	Torque
h	Altura
R	Radio
R_{ave}	radio promedio
θ	Desplazamiento angular
Ω	Velocidad angular
α	Ángulo de cono
τ	Esfuerzo o cedencia en ductos
R_0	Radio de ducto
l	Longitud de ducto

Lista de Figuras

Figura 1. Ejemplo de un MRF en ausencia (izquierda) y en presencia de un campo magnético (derecha). 1
Figura 2. Demostración de un MRF por Rabinow. El peso sostenido de la joven ejerce una resistencia sobre el dispositivo del MRF de 100 Kpa. 2
Figura 3. Propiedades magnéticas de algunos materiales 5
Figura 4. Incremento del radio hidrodinámico de una partícula magnetizable. 8
Figura 5. Representación de MRF entre placas portadoras y agregados de cadenas en presencia de un campo magnético. 11
Figura 6. Polarización de partículas y formación de cadenas en un MRF bajo un campo magnético. 12
Figura 7. MRF en ausencia de campo magnético (a), con respuesta a campo magnético perpendicular al flujo (b). 12
Figura 8. Modificación de la estructura de un MRF en ausencia(a) y presencia (b) de un campo magnético. 13
Figura 9. Cedencia y viscosidad en función de la velocidad de corte para diferentes densidades de flujo magnético. 14
Figura 10. Dispositivos en modo de corte (a), flujo (b) y presión (c). 15
Figura 11. Esquema en modo de esfuerzo y flujo en ERF. 17
Figura 12. Diagrama de flujo para la síntesis de MRF. 21
Figura 13. Diagrama ternario para nanoemulsión. 24
Figura 14. Patrón de DRX de polvos de Fe. 26
Figura 15. SEM de Carbonil-hierro. 28
Figura 16. TEM de magnetita. 28
Figura 17. Ajuste de equipo para análisis por OM. 29
Figura 18. Curva de histéresis de polvo de ferritas de cobalto. 30
Figura 19. Curva de histéresis de polvos de magnetita. 30
Figura 20. Curva de histéresis de polvos de hierro. 30
Figura 21. Curvas de saturación de MRF compuesto por Fe. 31
Figura 22. Configuración y funcionamiento de cuatro tipos de reómetros rotacionales: (a) doble couette, (b) cilindros concéntricos, (c) cono y plato y (d) placas paralelas. 32
Figura 23. Configuración del equipo para la medición de propiedades reológicas del sistema en modo de corte. 34
Figura 24. Configuración del equipo para la medición de propiedades reológicas del sistema en modo de flujo. 35
Figura 25. Relación de sedimentación para MRF Park[8]. 36
Figura 26. Relación de sedimentación para MRF Lim[28]. 37
Figura 27. Adaptador y esquema de funcionamiento. 40
Figura 28. Partes de una prótesis con amortiguador. 41
Figura 29. Dispositivo para máquinas de lavado que utilizan esponjas con MRF. 42
Figura 30. Embrague y esquema de funcionamiento. 43
Figura 31. MRF en acabado superficial 44
Figura 32. Esquema para simular conductos vasculares. 45

Lista de Tablas

Tabla 1. Tamaño de partícula, cantidades y compuestos empleados en la elaboración de MRF. 10
Tabla 2. Propiedades de ERF, MRF y FF 19
Tabla 3. Características por autor en la síntesis de MRF. 22
Tabla 4. Ecuaciones de propiedades reológicas. 33
Tabla 5. Aplicaciones normales y potenciales de los MRF 39

Capítulo I

Introducción

Los fluidos magnetoreológicos (MRF por sus siglas en inglés) son fluidos que cambian su viscosidad de un estado líquido a un estado sólido o semi-sólido y viceversa en milésimas de segundos al someterlos bajo la acción de un campo magnético[1]. La figura 1 presenta un ejemplo de un MRF elaborado en una de las principales compañías dedicadas actualmente a la investigación y desarrollo de esta clase de fluidos, la Lord Corporation©. En la parte izquierda, se presenta a la muestra en ausencia del campo magnético distinguiéndose propiedades de fluido, mientras que en la fotografía de la derecha se observa un cambio total en las propiedades de la muestra al instante de aplicar el campo, formándose una especie de pasta que no fluye.

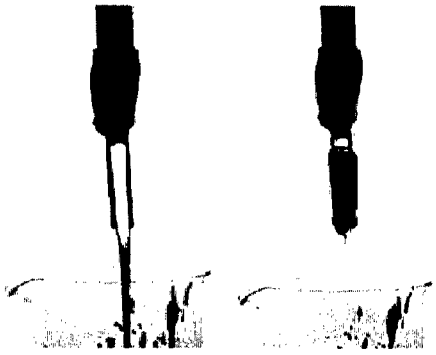


Figura 1. Ejemplo de un MRF en ausencia (izquierda) y en presencia de un campo magnético (derecha).

La base de la investigación actual en la síntesis de los MRF son los trabajos de Rabinow y Winslow desarrollados en los 40-50[2]. Carlson[3] refiere que un típico fluido de Rabinow fue constituido por 9 partes en peso de partículas finas de carbonil-hierro, una parte de aceite de silicona, petróleo o keroseno, y aditivos tixotrópicos o grasa para mejorar la estabilidad del asentamiento de las partículas. Señala también a un fluido de Winslow formado por 10 partes en peso de carbonil-hierro suspendido en aceite mineral, dispersantes (naftenato ferroso u

oleato ferroso y oleato metálico como estereato de litio), y un aditivo tixotrópico (estereato de sodio), cuya resistencia fue semejante a la del fluido de Rabinow de 100 Kpa

En la figura 2 se observa un dispositivo que contiene un fluido de Rabinow el cual es energizado por un electroimán y resiste el peso de una joven de 117 lbs.

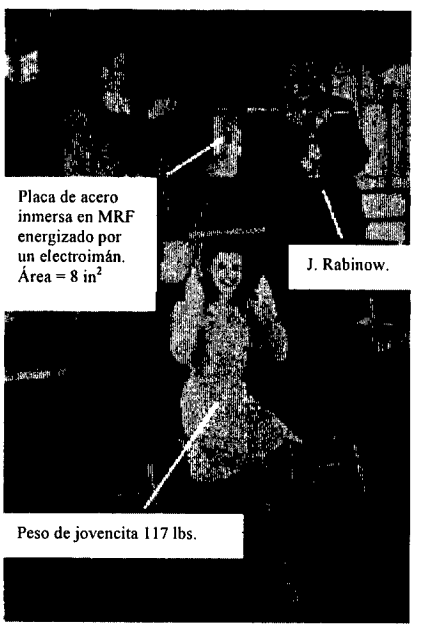


Figura 2. Demostración de un MRF por Rabinow. El peso sostenido de la joven ejerce una resistencia sobre el dispositivo del MRF de 100 Kpa.

Capítulo II

Revisión Bibliográfica

1. MATERIALES INTELIGENTES

Los materiales inteligentes, por definición, son aquellos que cuentan con propiedades sensibles a la aplicación de variables externas y generan una respuesta Las variables externas pueden ser: presión, temperatura, campos eléctricos y campos magnéticos. Por lo común, muchos de estos materiales se encuentran en estado sólido, y presentan propiedades de ferroelectricidad, piroelectricidad y piezoelectricidad, entre otras[4].

2. FLUIDOS SENSIBLES A CAMPOS EXTERNOS

Dentro de los materiales inteligentes existen los "fluidos sensibles a campos"; una clase de materiales suaves formada principalmente por dispersiones o geles, que abarca a los MRF, ferro-fluidos, fluidos electro-reológicos, ciertos tipos de espumas y geles poliméricos[4].

3. FLUIDOS MAGNETOREOLOGICOS (MRF)

Son suspensiones de partículas magnetizables en el intervalo de meso-escala dispersas en un medio portador no magnético y fueron reportados por primera vez por J. Rabinow en 1948[3-7]. Esta clase de fluidos responden con un cambio en su comportamiento reológico de manera instantánea, casi completamente reversible, al momento de ser sometidos bajo la acción de un campo magnético. Típicamente, este cambio se manifiesta mediante una resistencia al flujo generada de forma proporcional a la intensidad del campo aplicado[5-9]. Por lo común, los MRF presentan apariencia de aceites o pinturas a campo cero, pero en presencia de un campo incrementan su viscosidad en varias órdenes de magnitud[4, 10].

3.1. Constitución de los MRF

Los MRF están constituidos por tres partes a saber, partículas magnetizables o componente dispersa, medio portador y agente dispersante[11].

3.1.1. La componente dispersa

3.1.1.1. Tipos de partícula y propiedades magnéticas

Materiales suaves magnéticamente y con alta saturación magnética son preferibles para la elaboración de estos fluidos[4, 10].

Ginder[2] menciona que materiales útiles para la elaboración de MRF son los polvos magnéticos, puesto que son partículas rápidamente magnetizables y que poseen poco o ningún momento magnético residual al retirar el campo magnético. Weiss[12] y Genç[10] nombran al carbonil hierro ($Fe(CO)_5$) de los más eficaces, ya que cuenta con propiedades de 2.1 Tesla (T) a temperatura ambiente, es magnéticamente suave y los niveles de pureza son arriba del 99 %, esto significa pocos defectos en los dominios magnéticos de la partícula.

Chin[13] presenta un diagrama de propiedades magnéticas donde clasifica de acuerdo a su coersitividad magnética a ciertos materiales, en suaves, semi-duros y duros (figura 3). Este esquema nos ayuda a establecer un criterio en la selección de los materiales mas adecuados en la elaboración de los MRF, ya que si se divide el diagrama en cuadrantes numerándolos de manera continua de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, los materiales que caigan en la zona del primer cuadrante (coersitividad menor a 10^3 Am^{-1} y saturación mayor a 1.5 T) serán los más apropiados en la síntesis de los fluidos.

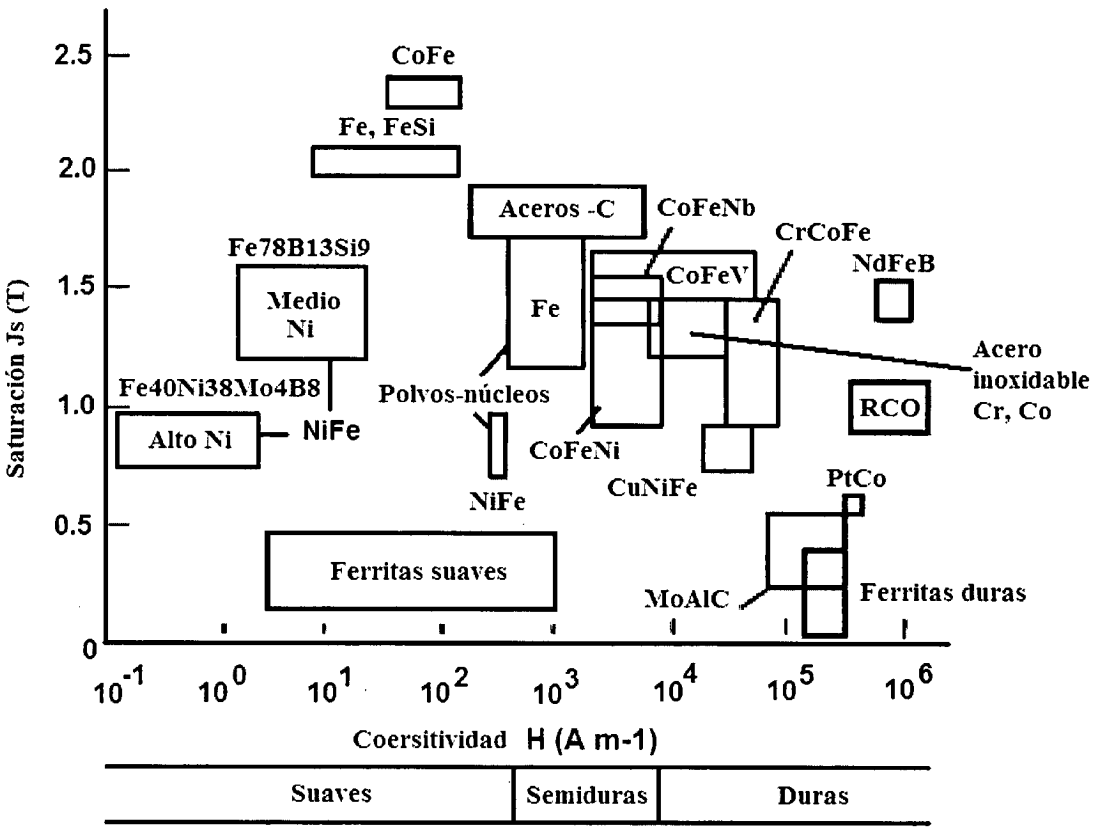


Figura 3. Propiedades magnéticas de algunos materiales.

3.1.1.2. Características de las partículas

Las propiedades magneto-reológicas de los MRF son fuertemente influenciadas por las características de las partículas magnetizables (tamaño, forma y fracción volumen).

Tamaño y forma de partícula

Weiss[14] de acuerdo a la aplicación sugiere seleccionar la distribución de tamaño de partícula adecuada, ya que ellas deben tener el movimiento necesario en el espacio de trabajo del dispositivo al momento de aplicar el campo. Donado[11] refiere que para tamaño de partícula relativamente mayores, la sedimentación se vuelve importante y la masa de las partículas hace que la respuesta reológica sea más lenta. Menciona también un rango adecuado de tamaño de partícula entre 1 y 30 μm, ya que dependiendo de las condiciones físicas el MRF alcanzará su máxima respuesta megnetoreológica en este intervalo.

La forma de las partículas magnetizables puede ser irregular; redondas, aciculares, en forma de agujas o combinación entre ellas. Se prefiere las esféricas ya que se busca un alto grado de acomodo al momento de someter el MRF a la acción del campo magnético[15]. Una combinación de partículas en forma de agujas con tamaño menor que 1 μm y partículas esféricas con un tamaño relativamente mayor, mejora notablemente la estabilidad del fluido e incrementa la viscosidad bajo la acción de un campo[16].

Fracción volumen ϕ

Weiss[14] menciona que al aumentar la cantidad de partículas en un MRF se incrementa la cedencia del fluido y consecuentemente se eleva la respuesta de los dispositivos. Sin embargo, se ve afectada la viscosidad del fluido sin la acción del campo; este incremento en la viscosidad sin presencia del campo limita las aplicaciones.

En régimen de muy bajas concentraciones de partículas a campo cero, la viscosidad de un MRF depende en forma lineal de la fracción volumen de acuerdo a la expresión de Einstein (ecuación 1).

Para dispersiones con altas concentraciones, la viscosidad de un MRF a un campo cero se representa por expresiones empíricas ajustadas de la ecuación 1[10].

$\eta=\eta_0(1+2.5\phi)$	Expresión de Einstein	Ec. (1)
η	Viscosidad del fluido a campo cero	
η_0	Viscosidad del fluido sin carga de partículas	

3.1.2. El medio portador

El medio portador es la fase continua del MRF o el líquido no magnético en el cual están suspendidas las partículas magnetizables y desempeña un importante papel en los cambios reológicos que experimentan estos sistemas.

3.1.2.1. Características de la fase portadora

De acuerdo a sus aplicaciones se requiere que a un campo cero el MRF fluya de manera fácil, por lo que su viscosidad, que depende de la fracción volumen de la fase dispersa, debe ser lo mas pequeña posible. Para los MRF no existe la limitación de que la fase portadora sea lo menos conductora, como en el caso de los ERF. Entre otras características se requiere que sean líquidos no corrosivos y estables en un intervalo de temperaturas[11].

La componente portadora también puede ser un "ferro-fluido" (FF). Ginder[2] menciona una sinergia en los efectos reológicos al tomar como líquido portador a un FF siendo la componente dispersa magnetizable. En los trabajos de Kashevskii[17] y Popplewell[18] emplean como base a un FF pero como fase dispersa utilizan materiales no magnéticos, mencionan que la adición de este tipo de partículas puede incrementar notablemente el efecto magnetoreológico.

3.1.3. El componente auxiliar

Surfactantes, agentes tixotrópicos y aditivos, son agregados a la fase portadora para establecer una óptima dispersión de las partículas magnetizables en el MRF.

3.1.3.1. Características del componente auxiliar

Weiss[12] propone como ejemplos de dispersantes a compuestos con moléculas de estabilización estérica y agentes de activación superficial. Se describe que el surfactante debe ser constituido por un grupo funcional que forma un enlace químico con la superficie de la partícula y un grupo terminal soluble en la fase portadora[16].

Genç[10] sugiere que los surfactantes pueden ser moléculas de cadenas largas con grupos funcionales terminales catiónicos, aniónicos o no-iónicos y que la naturaleza de su unión a la superficie de las partículas además de química puede ser física o combinación de ellas. La adsorción de las grandes cadenas moleculares a la superficie de la partícula, genera una repulsión que incrementa el radio hidrodinámico (figura 4).

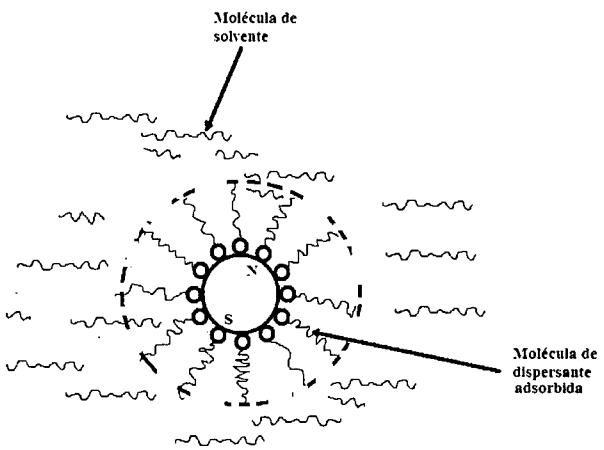


Figura 4. Incremento del radio hidrodinámico de una partícula magnetizable.

3.1.4. Aditivos

Para incrementar la vida útil y ampliar las aplicaciones comerciales de un MRF, puede agregarse a la constitución de los MRF aditivos como espesantes, colorantes o pigmentos, partículas abrasivas, lubricantes, antioxidantes, ajustadores de pH, sales e inhibidores de corrosión, los cuales pueden ser en forma de dispersiones, suspensiones o materiales solubles en el líquido portador [12, 16].

3.1.5. Tamaño de partícula, intervalos y compuestos empleados en MRF

La tabla 1 muestra los intervalos comúnmente empleados en la síntesis de MRF (tamaño de partícula magnetizable, dispersantes, aditivos, fase continua y fase dispersa), así como una lista de compuestos clasificados de acuerdo a su función en la síntesis de los MRF[2, 4, 10, 12, 15].

Tabla 1. Tamaño de partícula, cantidades y compuestos empleados en la elaboración de MRF.

Tamaño de partícula	% en peso base MRF		% en volumen de fase	
	dispersantes	aditivos	dispersa	continua
0.1 – 100 μm preferible entre 0.1 y 10 μm	0.01-20	0-20	5-60	40-95 viscosidad < 0.8 Pa-s

Compuestos empleados en elaboración de MRF

Fase Dispersa	Fase Continua	Dispersantes, Aditivos
▪ hierro	▪ aceites grasos naturales	▪ lecitina
▪ acero	▪ aceites minerales	▪ ácidos oleicos
▪ níquel	▪ polifeniléteres	▪ oleatos de hierro
▪ cobalto	▪ ésteres de ácidos dibásicos	▪ ácidos grasos
▪ ferritas	▪ ésteres neofenilpolioles	▪ espumantes alcalinos (estereato de litio y sodio)
▪ granates	▪ ésteres de fosfato	▪ sulfonatos y fosfatos con radicales lipofílicos
▪ nitruros de hierro	▪ parafinas	▪ ésteres de glicerol
▪ carburos de hierro	▪ parafinas cíclicas sintéticas	▪ naftenatos ferrosos
▪ carbonil hierro	▪ aceites hidrocarbonados insaturados	▪ espumantes metálicos (triestearato y diestearato de aluminio)
▪ dióxido de cromo	▪ ésteres ácidos monobásicos	▪ sulfonatos
▪ aceros de bajo carbón	▪ aceites de silicona	▪ ésteres de fosfato
▪ óxidos de hierro (Fe_2O_3 y Fe_3O_4)	▪ copolímeros de silicona	▪ ácido esteárico
▪ magnetitas	▪ aceites hidráulicos	▪ monooleato de glicerol
▪ óxidos de hierro con cantidades pequeñas de manganeso, zinc o bario	▪ aceites fluorados	▪ sesquiolato sorbitán
▪ aleaciones de hierro con (silicio, aluminio, cobalto, níquel, vanadio, molibdeno, cromo, tungsteno, manganeso, cobre)	▪ aceites clorados	▪ estereatos
	▪ aceites con aromáticos clorados	▪ laureatos
	▪ hidrocarbonados sintéticos	▪ alcoholes grasos
	▪ agua	▪ sílica gel
	▪ glicoles	▪ compuestos siliconados
	▪ alcoholes	▪ siloxanos
	▪ alcoholes aromáticos	
	▪ ésteres	
	▪ copolímeros polieterpolisiloxanos	
	▪ éteres	
	▪ solventes orgánicos (keroseno)	
	▪ mezclas y derivados de ellos	

3.2. Cambio en propiedades reológicas de los MRF

3.2.1. Cambio microestructural

El cambio microestructural en los MRF al aplicar un campo magnético exterior, induce en las partículas suspendidas la formación de un dipolo magnético, el cual genera una atracción entre ellas, polo norte con polo sur, formando cadenas o agregados fibrosos. Los polos y los agregados se orientan en la misma dirección paralela a las líneas de densidad de flujo magnético[6].

Las figuras 5 y 6 esquematizan la polarización en las partículas y la formación de los agregados, ambas de forma paralela a las líneas de densidad de flujo en un MRF al aplicarse un campo magnético.

Micrografías del cambio microestructural en un MRF, antes y después de aplicar el campo magnético, puede verse en los trabajos de Klingenberg[6] y Park[8] (figuras 7 y 8 respectivamente). Sin la presencia del campo, la dispersión en el caso de Klingenberg aparenta ser una sola fase, mientras que en el caso de Park, a una magnificación x400, se observa una suspensión de cápsulas formadas por un centro y una capa externa de agua entre los cuales se distribuyen las partículas magnéticas. Al aplicar el campo magnético las estructuras formadas para el primer caso es tipo columna y para el segundo es de tipo fibrilla.

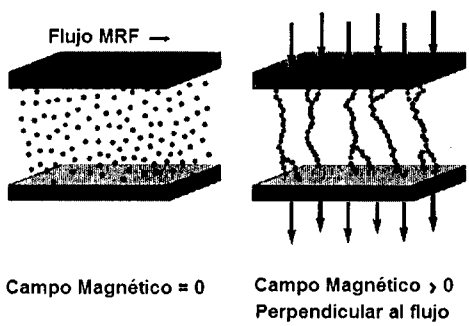


Figura 5. Representación de MRF entre placas portadoras y agregados de cadenas en presencia de un campo magnético.

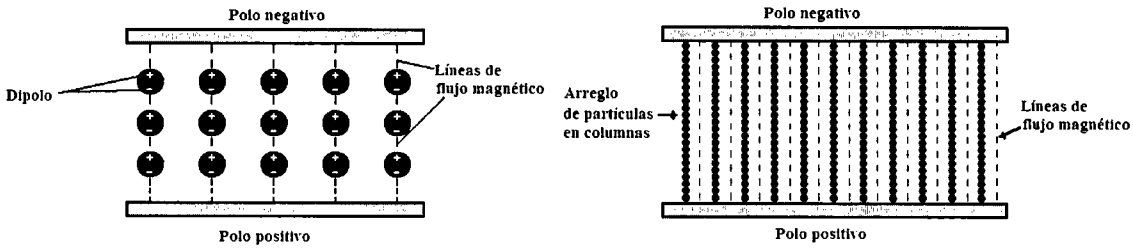


Figura 6. Polarización de partículas y formación de cadenas en un MRF bajo un campo magnético.

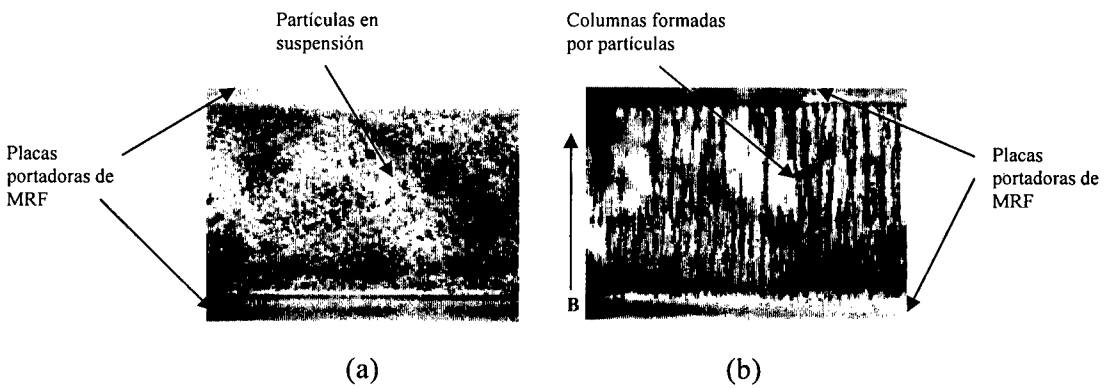


Figura 7. MRF en ausencia de campo magnético (a), con respuesta a campo magnético perpendicular al flujo (b).

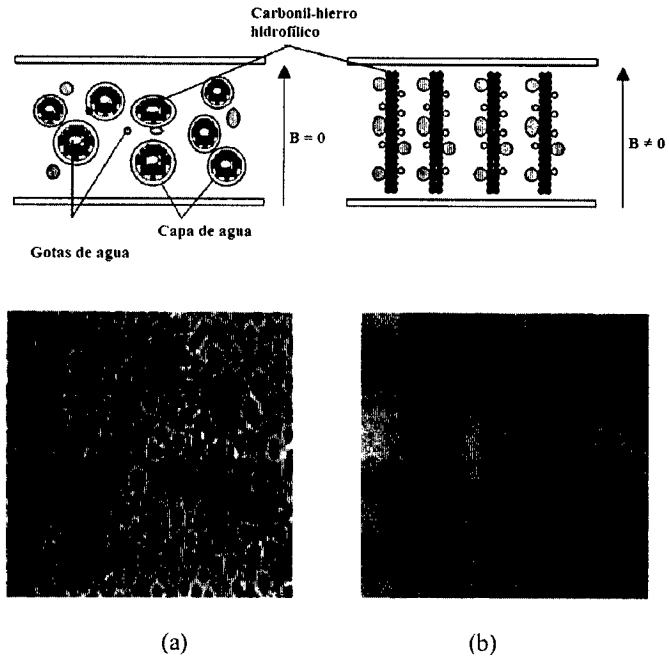


Figura 8. Modificación de la estructura de un MRF en ausencia(a) y presencia (b) de un campo magnético.

3.2.2. La respuesta magnetoreológica

Al aplicar un campo magnético en un flujo de un MRF la formación de las cadenas o fibrillas es de manera perpendicular al flujo, lo cual genera una resistencia en sentido contrario que incrementa la viscosidad del fluido. A cierto valor del campo aplicado en los MRF el incremento en la viscosidad es de tal valor que al emplear un esfuerzo de corte se presenta un punto de cedencia, característica común de los sólidos[2, 6-8]. Ginder[2] describe que en presencia de un esfuerzo de corte, el equilibrio establecido entre la formación y la dispersión de las fibrillas determina el punto de cedencia del fluido. El cual se define como el esfuerzo requerido para que los agregados fluyan o cedan. Dentro de este contexto cabe también mencionar que la formación de los aglomerados y el cambio en las propiedades viscosas de los MRF es fuertemente influenciado por las características antes descritas, como la fracción volumen de las partículas, el tipo de partículas, el tamaño de partículas, el tipo de líquido portador y el del agente dispersante[5].

Una idea del cambio en el orden de magnitud de la viscosidad en los MRF al someterlos a un campo magnético puede verse en datos obtenidos de la patente PCT/US93/03487[16] y presentados a manera de gráfico en la figura 9. Por ejemplo, se distingue en la gráfica que al incrementar la densidad de flujo del campo magnético de 0 a 84.0 kA/m, a una velocidad de corte de 3 s^{-1}, el cambio en la magnitud la viscosidad del fluido es aproximadamente de 600 veces, lo mismo para el esfuerzo de corte. Tal incremento hace útil a estos fluidos en aplicaciones específicas de las que se hablará en el capítulo IV.

En la gráfica también se observa que para un campo aplicado, la viscosidad disminuye al incrementar la velocidad de corte. Este efecto es usualmente llamado "shear thining" debido al deslizamiento entre las partículas magnetizadas. Para obtener la viscosidad en la cedencia se extrapola a cero la velocidad de corte, siendo éste el flujo en el cual el MRF tiene comportamiento de semi-sólido o sólido, o visto de otra manera, si el esfuerzo aplicado excede el punto de cedencia, el MRF presenta fluidez[19].

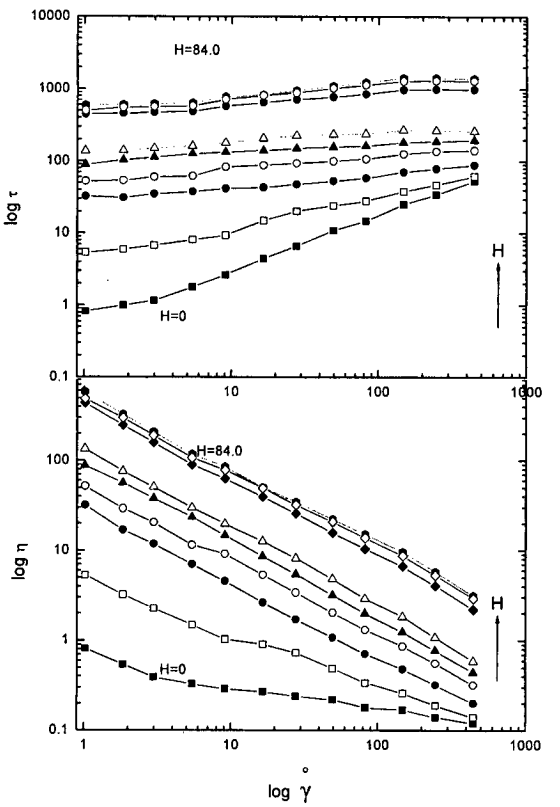


Figura 9. Cedencia y viscosidad en función de la velocidad de corte para diferentes densidades de flujo magnético.

3.3. Reología de MRF

El comportamiento reológico de los MRF puede ser analizado en dispositivos o transductores de polos fijos o polos movibles basados en tres principios que son: de corte, flujo y presión[20]. En estos dispositivos el MRF se encuentra en un espacio estrecho por donde el flujo magnético pasa en forma perpendicular al flujo del fluido.

En dispositivos en modo de corte, las placas portadoras del fluido se mueven paralelamente transfiriendo una fuerza o torque que puede controlarse por la acción de un campo magnético. En dispositivos en modo de flujo, el MRF fluye por una guía donde el control del campo magnético ofrece una resistencia en sentido contrario al flujo actuando como una válvula, aquí el MRF no necesita de partes móviles. En los dispositivos en modo de presión, la distancia entre placas portadoras del MRF cambia al aplicar el campo magnético (figura 10).

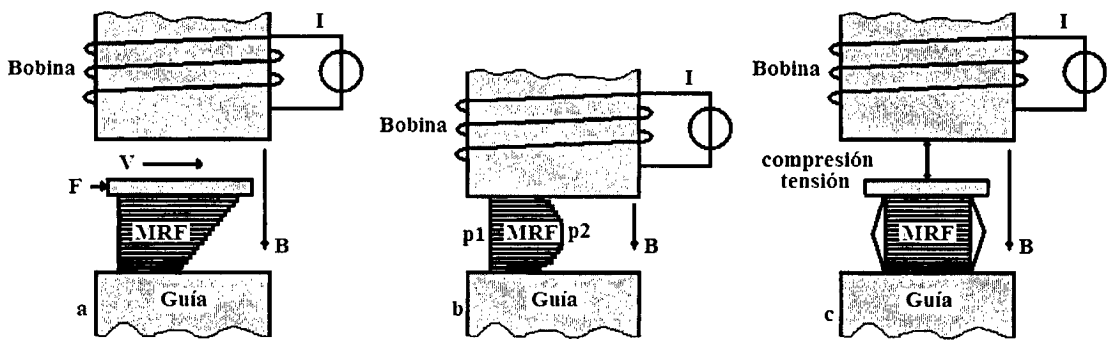


Figura 10. Dispositivos en modo de corte (a), flujo (b) y presión (c).

En el análisis reológico para describir las propiedades que muestran los MRF en sistemas en modo de corte y flujo, Jolly[5], Weiss[12] y Podszun[15] mencionan que el modelo de plástico de Bingham tiene buenas aproximaciones (ecuación 2). Janocha[20] también menciona que los MRF sin la presencia del campo magnético tienen un comportamiento Newtoniano y en presencia del campo las propiedades se ajustan al modelo de Bingham, formando un perfil de

velocidades de flujo tapón. Walid[21] detalla los fundamentos matemáticos del modelo de Bingham en MRF en actuadores y analiza por elementos finitos este tipo de sistemas. Wang y Gordaninejad[22] mencionan que el modelo de Herschel-Bulkley (ecuación 3) permite mejor ajuste que el modelo de Bingham y reportan un trabajo posterior con aplicación en amortiguadores[23].

$\tau_y = \tau_f + \eta \dot{\gamma}$	Modelo de Bingham	Ec. 2
$\tau_y = \tau_f + k\left(\dot{\gamma}\right)^n$	Modelo de Herschel-Bulkley	Ec. 3
τ_y	Esfuerzo total (Pa)	
τ_f	Esfuerzo de corte asignado a un campo aplicado en Am^{-1}, oersteds	
$\dot{\gamma}$	Velocidad de corte $(s^{-1}) = \frac{dv}{dx}$	
η	Viscosidad real (Pa-s)	
k ; n	Parámetros del fluido	

La clave que permite comparar los resultados de los modelos y la descripción de las propiedades reológicas es asignada principalmente a dos factores; al término "τ_f" que es el esfuerzo que se genera al momento de aplicar el campo magnético y a las consideraciones en la solución de las ecuaciones de Navier Stokes.

Para el último caso de dispositivos en modo de presión, Bashtovoi[24] analiza y modela matemáticamente un soporte a base de un MRF con elementos de volumen de control y ecuaciones de Navier-Stokes. Tian[25] comprime ERF a diferentes separaciones de las placas portadoras del líquido, aunque es un trabajo en el que se requiere un campo eléctrico, el equipo puede ajustarse al análisis de un MRF.

4. FLUIDOS ELECTROREOLÓGICOS ERF

Los fluidos electroreológicos son esencialmente dispersiones de partículas dieléctricas suspendidas en un líquido no conductor. Estos fluidos ofrecen una resistencia al flujo, con un cambio rápido y reversible en las propiedades reológicas de la suspensión, cuando se aplica un campo eléctrico externo[1, 6]. Winslow fue el primero en estudiar estos fluidos y explicar el efecto electroreológico denominado *efecto Winslow* en los años 40's, el cual se refiere a la diferencia entre la constante dieléctrica del fluido y de las partículas magnéticas. Al igual que los MRF, los fluidos electroreológicos están formados por tres componentes: fase dispersa, fase continua y ciertos aditivos. El líquido portador puede tener alta resistividad eléctrica, típicamente se utiliza aceite de silicona, aceite mineral, nafteno, kereoseno o grasa de parafina. Las partículas son comúnmente óxidos metálicos, alumino-silicatos, sílica, compuestos orgánicos o polímeros. Los aditivos peden ser activadores como aminas o compuestos orgánicos y surfactantes como ácidos n-Alkanoicos. El mecanismo que explica la resistencia en un ERF es igual al de un MRF. La diferencia radica en el campo aplicado; para los ERF el campo es eléctrico (del orden de kV/mm) y al aplicarse las partículas se polarizan induciendo la formación de dipolos, lo cual conduce a la formación de estructuras alargadas en la dirección del campo aplicado. Estas estructuras son las responsables de los cambios reológicos que experimentan los fluidos[1, 26].

La figura 11 muestra un esquema del funcionamiento principal de los ERF sin y con la aplicación de campo eléctrico en las placas portadoras del fluido, para los modos de esfuerzo de corte y de flujo.

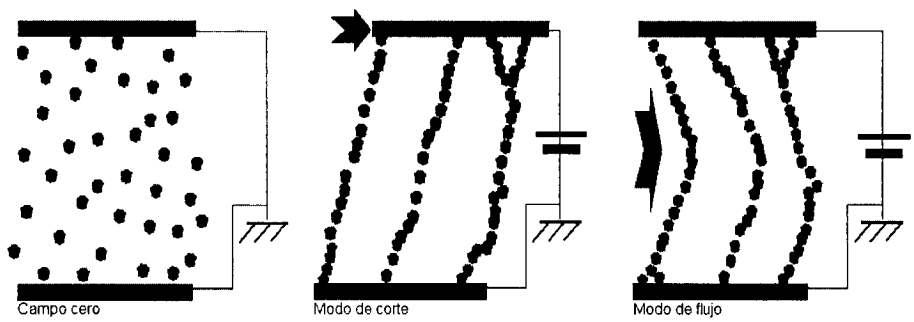


Figura 11. Esquema en modo de esfuerzo y flujo en ERF.

5. FERROFLUIDOS (FF)

Conocidos como líquidos magnéticos, lo FF son dispersiones de partículas superparamagnéticas del orden de nano-escala (menores a 10 nm) en un líquido portador que pueden ser agua o un aceite. Los FF están constituidos por partículas coloidales que son de naturaleza ferromagnética (hierro, cobalto etc.). Las partículas presentan comúnmente movimiento browniano y tienden a permanecer en suspensión, aunque en ciertas ocasiones se dispersan con la ayuda de un surfactante. Los ferrofluidos no son un medio continuo, pero se pueden tratar como una sola fase. Debido al movimiento browniano los ferrofluidos no presentan la habilidad para formar cadenas de partículas o desarrollar cedencia en presencia de un campo magnético, al contrario solo experimentan una fuerza de atracción a regiones de alta energía magnética dentro del volumen dado del fluido[(2)].

6. Diferencias entre ERF, MRF, y FF

Para una distinción más clara entre los fluidos sensibles a campos en la tabla 2 se presenta una clasificación de sus principales propiedades[(1,10, 26, 27)].

Tabla 2. Propiedades de ERF, MRF y FF.

Propiedad	Fluidos		
	ERF	**MRF**	**FF**
Fase dispersa	polímeros zeolitas SiO_2 $BaTiO_3$	hierro acero ferritas	ferritas hierro cobalto cerámicos
Tamaño de partícula (μm)	10^{-1}-10^{2}	10^{-1}-10^{1}	$<10^{-1}$
Fluido portador	aceites geles dieléctricos polímeros líquidos no polares	aceites sintéticos líquidos no polares líquidos polares agua	aceites
Densidad (g/cc)	1-2	3-5	1-2
Viscosidad campo cero 25°C (mPa-s)	50-2000	50-1000	2-500
Campo de excitación	3-5 kV/mm	150-350 kA/m	100-200 kA/m
Esfuerzos alcanzados τ_0 (KPa)	(**E**) 10 limitado por el rompimiento de cadenas	(**B**) 100 limitado por saturación	(**B**) 2
Fuente de excitación típica	alto voltaje	electroimanes imanes permanentes	imanes permanentes
Tiempo de respuesta (ms)	100-200	< 10	< 10
Potencia	2000-5000 V 1-2 mA	2-25 V 1-2 A (2-50 Watts)	-
Materiales auxiliares	cualquier área conductora	hierro/acero	-
Intervalo de temperaturas de operación (°C)	10 a 90 DC -25 a 125 DC	-40 a 150 en función del componte portador	-
Contaminantes	no tolerantes a impurezas	no se ve afectado	-
Color	opaco transparente	café gris opaco negro	-

Capítulo III

Estado de Arte

1. PREPARACIÓN DE MRF

Weiss[12] preparó un MRF mezclando al mismo tiempo los ingredientes con ayuda de una espátula manual, después para crear una suspensión dispersó la mezcla con alto corte con la ayuda de un homogenizador, vibrador, mezclador mecánico o con cualquier equipo de molienda. Genç[10] combinó el líquido portador y surfactante, después agregó la fracción volumen de la fase dispersa y mezcló en un molino de bolas por 24 h. Park[8] preparó la fase continua agregando lentamente agua a la mezcla establecida de surfactante/aceite, después incorporó las partículas magnetizables, previamente tratadas con un glicol en un molino de bolas y agitó mecánicamente a una de velocidad 800 rpm por 24 h.

El párrafo anterior describe la parte esencial en la metodología empleada por tres autores diferentes para la elaboración de los MRF. Haciendo una revisión bibliográfica complementaria se llegó al desarrollo de un diagrama de flujo para la síntesis de los MRF (figura 12), donde se da una descripción más detallada de las principales etapas para la elaboración de esta clase de fluidos.

1.1. Cantidades y elementos

En la tabla 3 se presentan las características de cada uno de los constituyentes de un MRF. Las cantidades y elementos se encuentran en el intervalo y tipo que se menciona en la tabla 2.

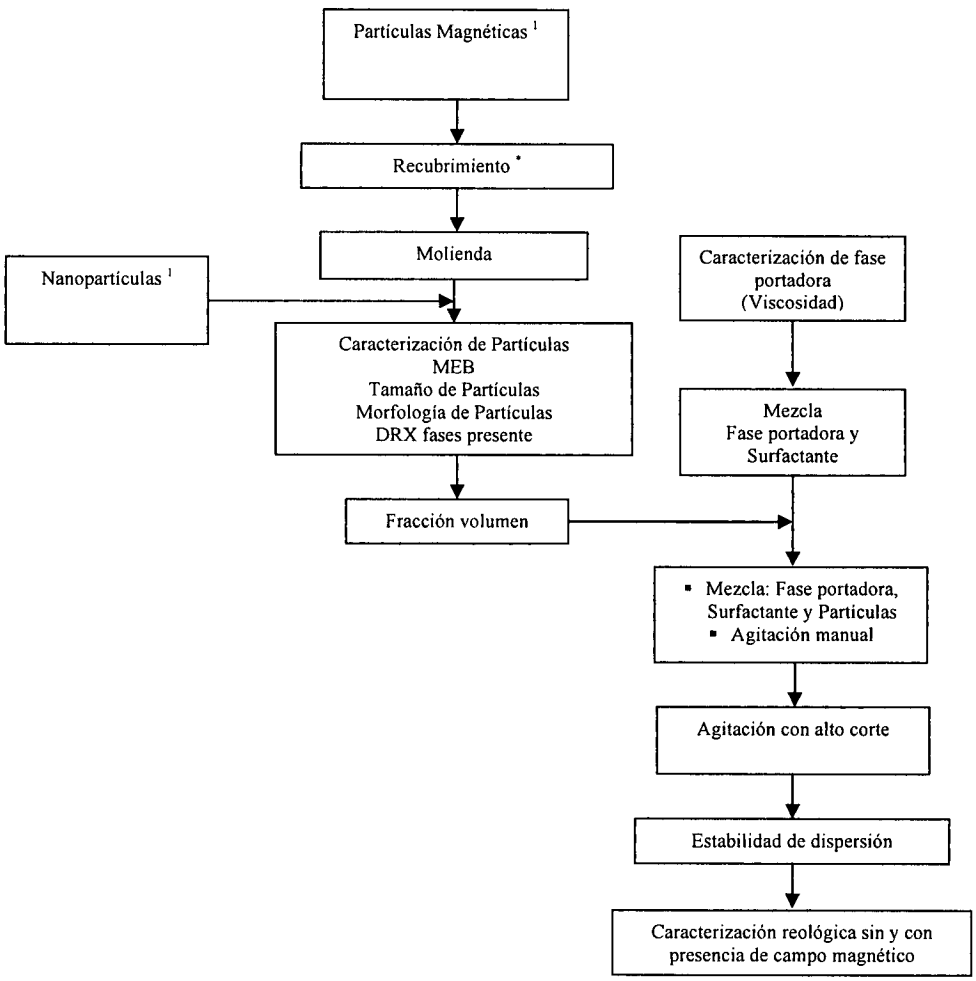


Figura 12. Diagrama de flujo para la síntesis de MRF.

1 síntesis / comercial

* opcional (según aplicación)

Tabla 3. Características por autor en la síntesis de MRF.

Ref.	Fase Dispersa	Fase Continua	Surfactantes y Aditivos
	Tipo y Características	Tipo y Características	
Ginder (2)	carbonil-hierro 48 g Ø 6μm	aceite mineral EMG 905 (base ferro-fluido, Ø10nm) 5 g	0.2 g surfactante
Dang (7)	Carbonil-hierro Ø μm 4.5-5.2 densidad 4.4 g/cm^3 fracción volumen 0.3	aceite de Silicona viscosidad 100 cSt	fracción volumen de ácido oleico ≥ 0.14
Park (8)	carbonil-hierro Ø μm 4.5-5.2 densidad 4.4 g/cm^3 fracción volumen 0.1 a 0.4 recubrimiento de polisorbato-80 de glicol (Tween 80)	relación agua/ aceite-min. 0.1 a 0.3 viscosidad 0.024 Pa-s densidad 0.84 g/cm^3	span 80 3% W de fase portadora
Genç (10)	polvos de hierro reducido 84.4% w Ø μm 7-9	polidimetilsiloxano 100 cSt 14.3% w	hidroxipolidimetilsiloxano 90-150cSt 1.3%W
Weiss (12)	partículas de hierro 78.6 grs Ø de partícula; distribución bimodal 5 y 35 μm	32.14 g aceite hidrocarbonado (drakeol)	1.65 g de dioelato PEG 200 3.22g de tixotrópico (sílica fumante)
Podszun (15)	carbonil-hierro 4-5μm 32 grs recubrimiento de poliuretano	aceite de silicona 13.3 grs viscosidad 5 mm^2/s	2.5 g diisocianato de tolueno
Patente PCT /US93/03487 (16)	carbonil-hierro Ø μm 1 a 10 50% w	Mezcla Keroseno/ α-naftol/ polivinil-n-butil-éter (92.75/0.05/7.2) 42.5% w	(Aerosil SiO_2) Forma gelatinosa 7.5%W Antiespumantes (Poli-siloxanos)
	dióxido de cromo Ø μm 0.1-1 36% w	Mezcla Keroseno/ α-naftol/ polivinil-butiléter (92.75/0.05/7.2) 63.63% w	acido oleico 0.36% Lubricantes (tricresilfosfato) Estabilizadores
Lim (28)	carbonil-hierro Ø μm 4.5-5.2 densidad 4.4 g/cm^3 fracción volumen 0.3	aceite mineral	fracción volumen de sílica fumante 0.03 (10nm)
Chaudhuri (29)	oxido de cobalto (sintético) Ø μm 0.1	aceite hidráulico (Mobil DTE20)	AD01 EnviroGem
Parekh (30)	magnetita sintética Ø μm 10^{-2} magnetita comercial Ø μm 3	keroseno	
Sheng (31)	partículas de poliestireno, coloides de poliestireno magnético	Agua	
	carbonil-hierro carbonil hierro/ suspensión	Aceite	

1.2. Síntesis de partículas magnéticas

1.2.1. Técnica sol-gel

Hernández[32] sintetizó y caracterizó polvos de óxidos cerámicos tipo perovskita complejas (estructura formada por Ba divalente y W hexavalente con In, Y, Dy, Gd y Sm como trivalentes) a partir del proceso sol gel o método de Pechini; técnica que emplea un agente quelante como el ácido cítrico para atrapar a los cationes y un ligante como etilén glicol para producir un gel y para la formación de una resina polimérica. Con esta síntesis se produce un tamaño de partícula del orden nanométrico. La técnica de Pechini también se utilizó por Garza[33] en la síntesis de perovskitas triples (de la forma $A_3B_2MoO_9$) y por Montemayor[34] para la obtención de partículas nanométricas de Ferritas de Cobalto. Zao[35] obtuvo por este método, partículas de titania y titania dopada con tierras raras de tamaño entre 5 y 10μm. Wen[36] fabricó por sol-gel óxidos compuestos de Plomo, Zirconio, y Titanio.

1.2.2. Técnica de coprecipitación química

Con esta técnica, Donado[11] sintetizó titanato de bismuto con tamaños de partícula menores a 1μm. Salazar[37] y Galindo[38] produjeron nanopartículas menores a 20 nm de óxidos de hierro y magnetita, respectivamente. La técnica de coprecipitación química se basa en reactivos de alta solubilidad, mientras que el producto es poco soluble por lo que se recupera como un precipitado.

1.2.3. Síntesis por nano-emulsión.

Salazar[37] obtuvo nanopartículas de hierro por esta técnica. Una emulsión consiste de dos o más líquidos inmiscibles como aceites o solventes orgánicos y agua, en la cual la fase discontinua está formada por finas gotas dispersas en la fase continua. La dispersión se logra por medios mecánicos y es termodinámicamente inestable. En una emulsión el tamaño de las

gotas se encuentra en el intervalo de 1 a 50μm. La adición de cierta concentración de un surfactante ayuda a estabilizar la dispersión reduciendo la tensión interfacial para dar lugar a una dispersión transparente, termodinámicamente estable y con gotas de un tamaño menor a 150 nm. La figura 13 detalla esquemáticamente un diagrama de equilibrio ternario para la producción de una nanoemulsión[39]. Basándose en un diagrama de este tipo se puede controlar la estructura de la fase dispersa dependiendo de la relación aceite/agua y del tipo de surfactante seleccionado, el cual puede ser de naturaleza catiónica, aniónica o no iónica.

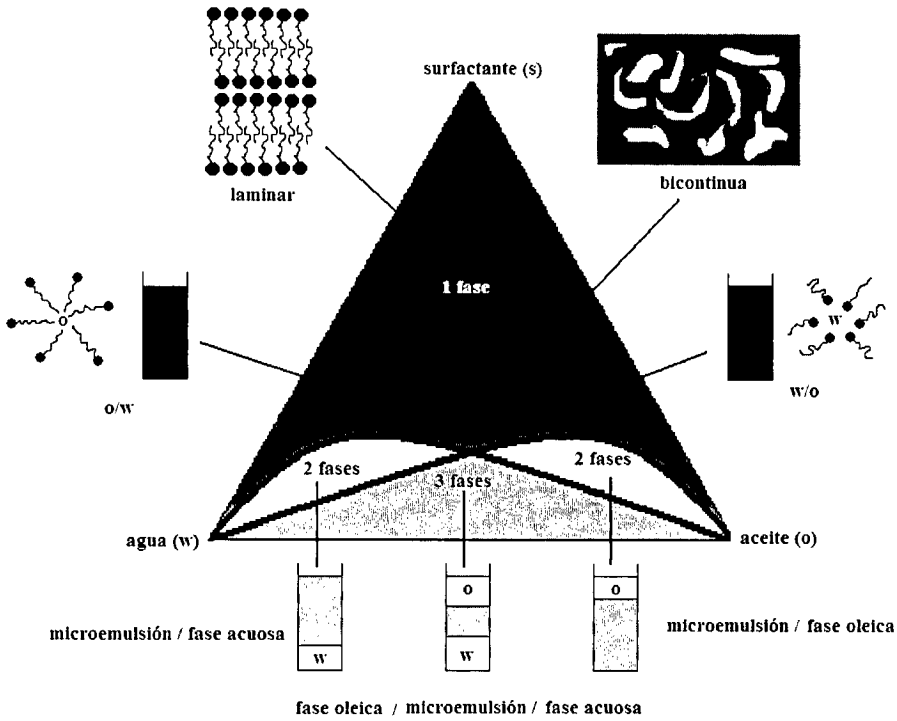


Figura 13. Diagrama ternario para nanoemulsión.

Existen otras estrategias de preparación de partículas como la síntesis cerámica, hidrotérmica, sales fundidas, plasma, spray-dry, freezy-dry y CVD (chemical vapor deposition)[40].

1.3. Caracterización de MRF

La caracterización de los MRF y de sus componentes sirve para conocer las propiedades del punto de partida y las propiedades finales. Con la caracterización se puede optimizar o decidir sobre las mejores condiciones de producción y sobre las aplicaciones que tienen este tipo de fluidos.

Las técnicas de caracterización en la elaboración de los MRF pueden dividirse en tres: la caracterización de la componente dispersa, la caracterización magnética del MRF sin la presencia de esfuerzos y la caracterización reológica de la componente líquida y de los mismos MRF con o sin la presencia de campos magnéticos.

1.3.1. Caracterización de partículas

1.3.1.1. Difracción de rayos-X (DRX)

Esta técnica se emplea en los MRF para caracterizar los polvos o fase dispersa. Es una técnica extremadamente importante en el campo de caracterización de materiales y se emplea en el estudio de cualquier material cristalino y amorfo que presente una parte cristalina como pueden ser metales, aleaciones, minerales, compuestos inorgánicos, escorias, polímeros y compuestos orgánicos. Con esta técnica se puede obtener información de la escala atómica, estructura cristalina, identificación de fases y composición química[41].

Genç[10] y Donado[11] caracterizaron por DRX polvos que utilizaron en la elaboración de estos fluidos. Salazar[37] caracterizó nanopartículas de óxido de hierro para FF. Estos investigadores corrieron las muestras a temperatura ambiente empleando equipos de difracción con geometría Bragg-Brentano, patrón 2θ, $\theta < 80°$, radiación CuKα(λ= 1.5404 Å) y pasos de

0.02° / 3s. La figura 14 presenta un patrón de DRX de polvos de hierro de las investigaciones de Genç[10].

También es posible determinar por DRX el tamaño de partícula de polvos cristalinos utilizados en la elaboración de MRF. Para lo cual se corre la muestra a las condiciones preestablecidas con la ayuda de la ecuación 4[41, 42].

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}$$ Tamaño de cristal Ec. 4

β Ancho de la altura media de pico

K Constante de proporcionalidad 0.9

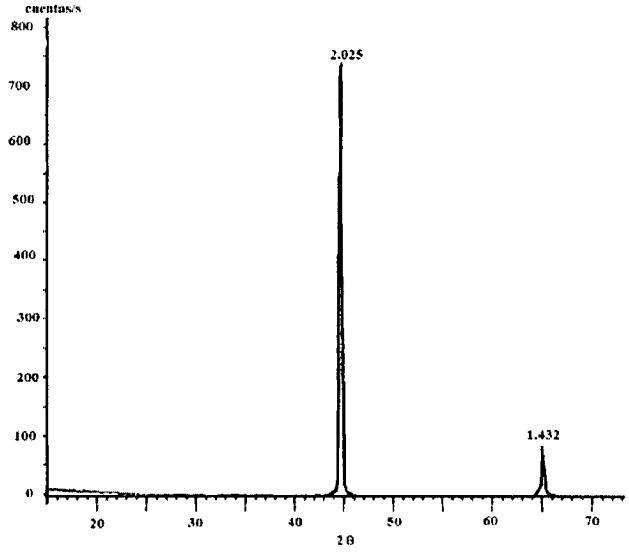


Figura 14. Patrón de DRX de polvos de Fe.

1.3.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Con la microscopía electrónica de barrido se puede realizar un análisis de la morfología y tamaño de las partículas magnetizables. La técnica se basa en un barrido de la muestra punto a punto por medio de un sensor de electrones secundarios, el cual mide la intensidad y la presenta en un monitor a manera de imágenes topográficas, las cuales pueden ser interpretadas posteriormente[43]. La figura 15 muestra un micrografía de una muestra de polvos de Carbonil –hierro de Genç(10).

1.3.1.3. Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

La técnica de TEM en el estudio de los MRF es similar a la de SEM. Sin embargo, el TEM proporciona información de la estructura interna de secciones relativamente más pequeñas a 100 nm. También se pude estudiar en las muestras defectos planares tales como: fallas de apilamiento, límites de grano y límites de fase. La figura 16 presenta un análisis por TEM de partículas de magnetita.

1.3.1.4. Microscopía Óptica (OM)

El análisis microestructural según lo detalla Klingenberg[44], se puede realizar tomando un video bajo condiciones estáticas y dinámicas de la suspensión contenida entre dos placas electrodo paralelas. Una de la placas es unida a un motor por medio de engranes que le confiere una velocidad determinada. La figura 17 esquematiza el montaje del equipo que pudiera ser acoplado a un electroimán.

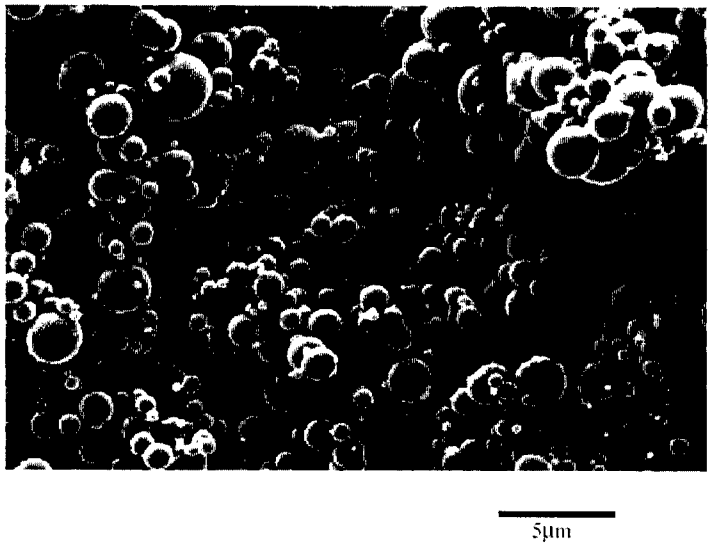


Figura 15. SEM de Carbonil-hierro.

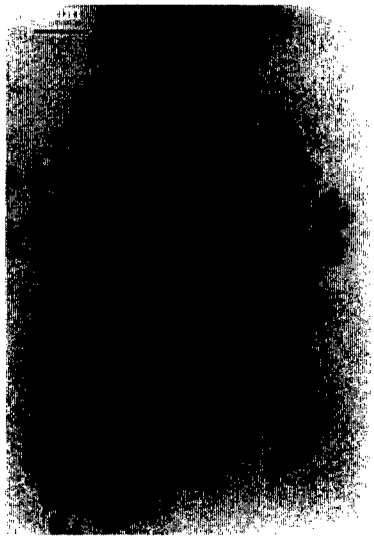


Figura 16. TEM de magnetita.

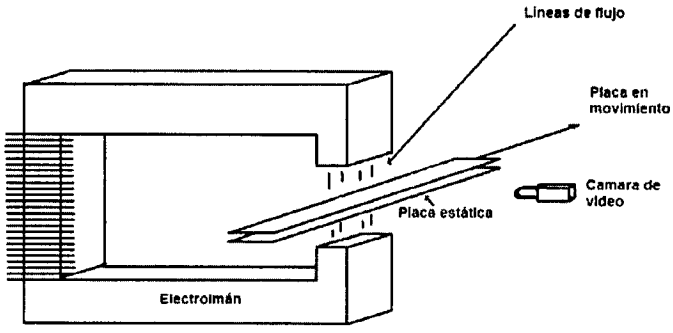


Figura 17. Ajuste de equipo para análisis por OM.

1.3.1.5. Caracterización magnética de polvos

Esta técnica permite caracterizar las propiedades magnéticas de materiales sintetizados y para corroborar las propiedades de aquellos obtenidos de manera comercial.

Las curvas de histéresis de tres de los principales materiales utilizados en la elaboración de los MRF son mostradas en las figuras 18, 19 y 20[10, 45, 46], polvos de ferritas de cobalto, magnetita y hierro, respectivamente. La curva de histéresis característica de estos materiales es relativamente delgada y alargada, ello significa que tienen baja coersitividad, o que son magnéticamente suaves (que puede desmagnetizarse bajo una densidad de flujo magnético muy pequeña en sentido inverso) y que tienen una alta saturación magnética (magnetización del material cuando todos los dipolos están orientados).

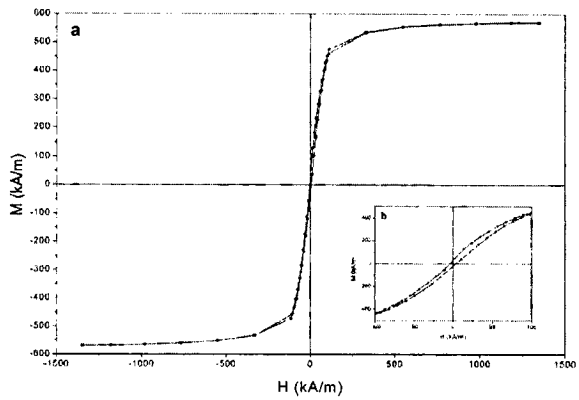


Figura 18. Curva de histéresis de polvo de ferritas de cobalto.

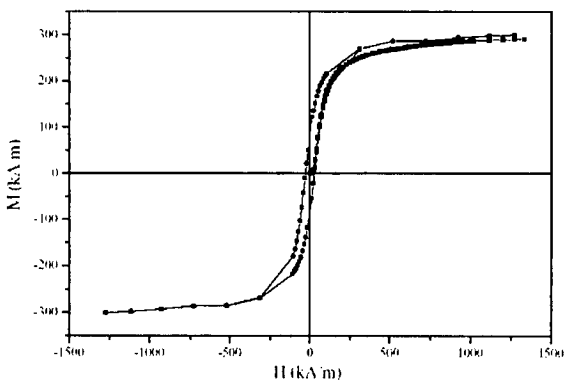


Figura 19. Curva de histéresis de polvos de magnetita.

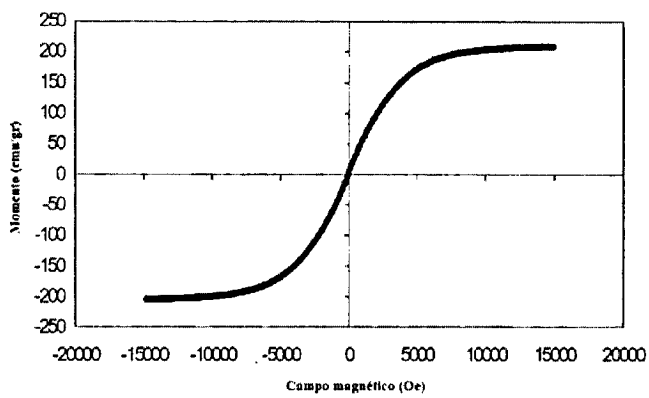


Figura 20. Curva de histéresis de polvos de hierro.

1.3.2. Caracterización magnética de MRF sin esfuerzos (saturación de MRF)

Las propiedades magnéticas de los MRF sin la aplicación de esfuerzo pueden medirse en magnetómetros comerciales. Un ejemplo se puede ver en el trabajo de Jolly[47], el cual muestra curvas de inducción magnética para tres MRF con diferentes relaciones en volumen de 10, 20, y 30% (figura 21).

Donado[11] y Jolly[47] mencionan que valores de saturación de un MRF dependen de la fracción volumen de la fase dispersa (ϕ), de acuerdo a la ecuación 5. En el gráfico de la figura 21 se puede observar el ajuste que tiene esta ecuación, por ejemplo, si tenemos el valor de saturación del Fe (2.1 T) y la fracción volumen por decir 30%, la saturación del MRF será 0.63 T.

$Ms=\phi Js$	saturación de MRF	Ec. 5
ϕ	fracción volumen de fase dispersa	
Js	saturación del material	

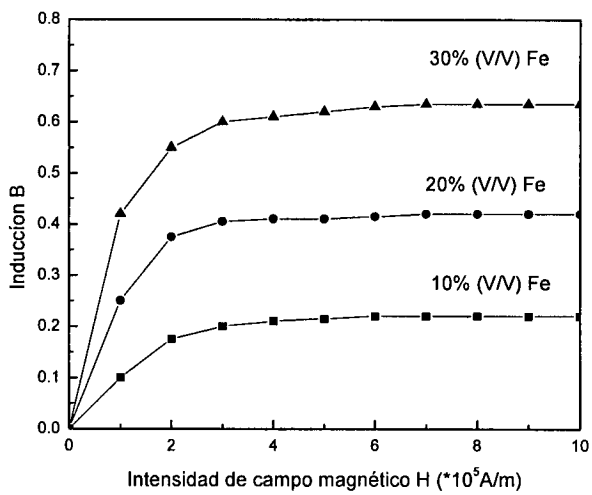


Figura 21. Curvas de saturación de MRF compuesto por Fe.

1.3.3. Caracterización reológica

1.3.3.1. Caracterización reológica de MRF sin campo (off-state)

La caracterización reológica de los MRF sin presencia del campo magnético se logra principalmente por reómetros rotacionales: reómetros de cilindros concéntricos, reómetros de cono y plato, reómetros de placas paralelas y reómetros de doble couette[10]. La figura 22 detalla la configuración y funcionamiento de los cuatro tipos de reómetros rotacionales.

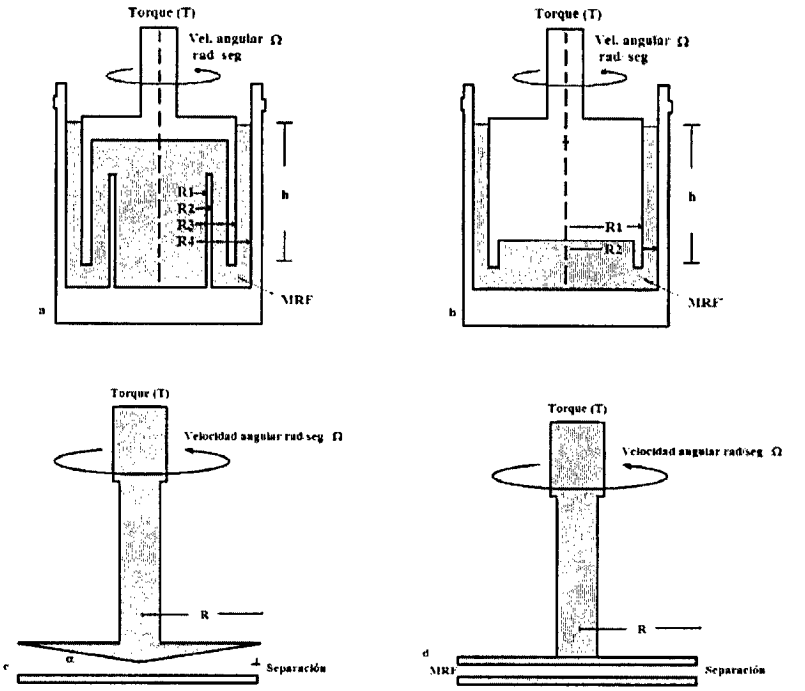


Figura 22. Configuración y funcionamiento de cuatro tipos de reómetros rotacionales: (a) doble couette, (b) cilindros concéntricos, (c) cono y plato y (d) placas paralelas.

La tabla 4. Presenta las ecuaciones 6 a 21 que describen las propiedades reológicas para las diferentes geometrías del equipo de medición Genç[10]. Bird[48] da el detalle de la deducción de algunas de estas ecuaciones.

Tabla 4. Ecuaciones de propiedades reológicas.

Geometría	Esfuerzo de corte	Velocidad de corte	Cedencia	Viscosidad
Cilindros concéntricos	(6) $\frac{T}{2\pi R_{ave}^2 h}$	(7) $\frac{2\Omega R_1^2 R_2^2}{R_{ave}^2 (R_2^2 - R_1^2)}$	(8) $\frac{\theta R_{ave}}{R_2 - R_1}$	(9) $\frac{T(R_2^2 - R_1^2)}{4\pi h \Omega R_2^2 R_1^2}$
Placas paralelas	(10) $\frac{T}{2\pi R^3}$	(11) $\frac{\Omega R}{h}$	(12) $\frac{R\theta}{h}$	(13) $\frac{\pi \Omega T R^4}{2h}$
Cono y plato	(14) $\frac{3T}{2\pi R^3}$	(15) $\frac{\Omega}{\alpha}$	(16) $\frac{\theta}{\alpha}$	(17) $\frac{3T}{2\pi R^3 \Omega}$
Bi-concéntricos	(18) $\frac{T}{2\pi h(R_1^2 + R_4^2)}$	(19) $\frac{\Omega R_4^2}{(R_4^2 - R_3^2)} + \frac{\Omega R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)}$	(20) $\frac{\theta R_4^2}{(R_4^2 - R_3^2)} + \frac{\theta R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)}$	(21) $\frac{T(R_2^2 - R_1^2)(R_4^2 - R_3^2)}{2\pi h}$

T = torque

h = altura

R = radio

θ = desplazamiento angular

Ω = velocidad angular

α = ángulo de cono

R_{ave} = radio promedio

1.3.3.2. Caracterización reológica de MRF con campo (on-state)

Para la medición de las propiedades reológicas en presencia del campo magnético se requiere de adaptar al equipo de medición reológica una bobina que produzca un campo magnético en dirección transversal al torque o flujo Park[8]. Un ejemplo de la configuración del equipo para lograr la medición de las propiedades reológicas se presenta en las figuras 23, y 24 donde se esquematiza las partes del sistema en modo de corte[8] y en modo de flujo[7].

El equipo de Park mide el corte de un MRF entre dos placas circulares, el campo se genera por una bobina unida a un cabeza de poder.

El equipo de Dang consiste en un recipiente con una entrada en la parte superior y un ducto de salida en la parte inferior. El MRF se agita continuamente por un dispositivo de mezclado. La entrada al recipiente permite inyectar aire a cierta presión. El flujo de aire, empuja al MRF por el ducto de salida el cual esta adaptado a un imán o electroimán. La cedencia, en la salida del dispositivo, se obtiene realizando un balance de fuerzas sobre un elemento cilíndrico de fluido de radio R_0 y longitud l (ecuación 22). La cedencia es proporcional a la caída de presión requerida para poner al fluido en movimiento[7].

$$(\tau) = \frac{R_0 \Delta P}{2l} \qquad \text{Esfuerzo o cedencia en ductos circulares} \qquad \text{Ec. 22}$$

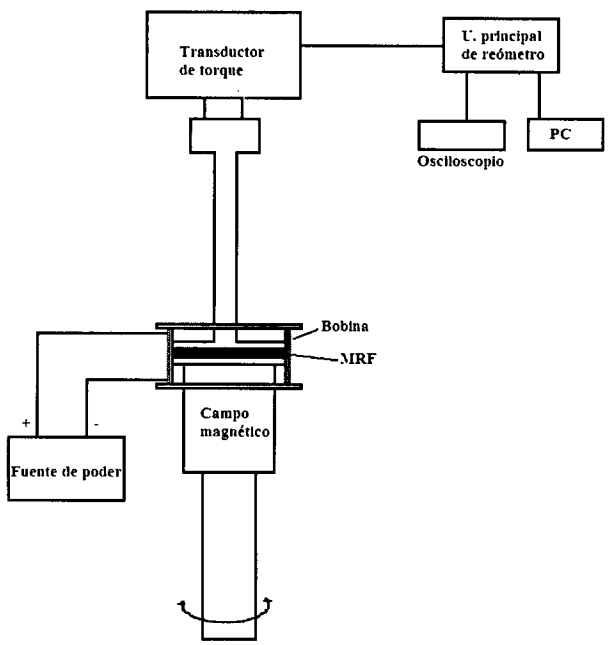


Figura 23. Configuración del equipo para la medición de propiedades reológicas del sistema en modo de corte.

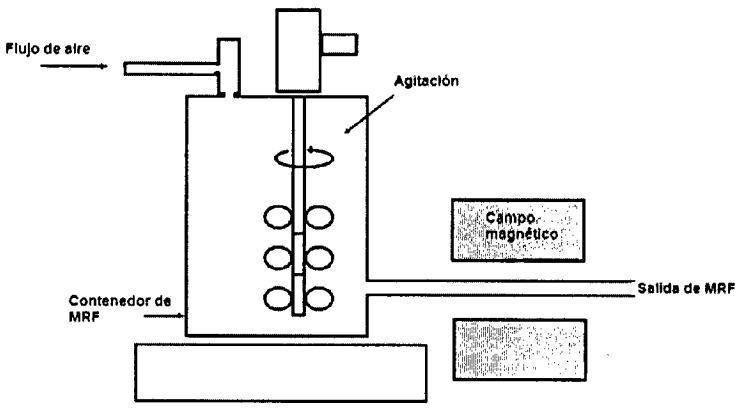


Figura 24. Configuración del equipo para la medición de propiedades reológicas del sistema en modo de flujo.

1.4. Estabilidad de la dispersión

Uno de los principales aspectos a cuidar en la síntesis de los MRF es la estabilidad y la redispersabilidad de las partículas dentro del fluido portador, ya que si éstas no se mantienen dispersas, las propiedades viscosas se verán afectadas en forma.

Factores como tamaño de partícula, viscosidad del fluido portador y diferencia de densidad entre la fase dispersa y el líquido portador, son factores que influyen en la estabilidad de la dispersión[10].

Para medir la estabilidad de una dispersión se utiliza la prueba de sedimentación, la cual se basa en una simple observación visual. La prueba consiste en colocar las muestras en un conjunto de tubos sellados y medir a diferentes tiempos, la fracción de volumen sedimentado. La relación de sedimentación se calcula utilizando la siguiente expresión.

Relación de sedimentación = 1- (fracción de volumen sedimentado)

Fracción de volumen sedimentado = (volumen de líquido flotante) / (volumen de líquido total)

La figura 25 muestra la relación de sedimentación para MRF elaborados por Park[8]. Se observa la relación de sedimentación (en porciento) de partículas de carbonil-hierro a una fracción de volumen (ϕ) de 0.4 con diferentes relaciones en volumen agua/aceite en la fase continua (φ). En este experimento se comparan también partículas recubiertas (TC) y partículas sin tratar (C).

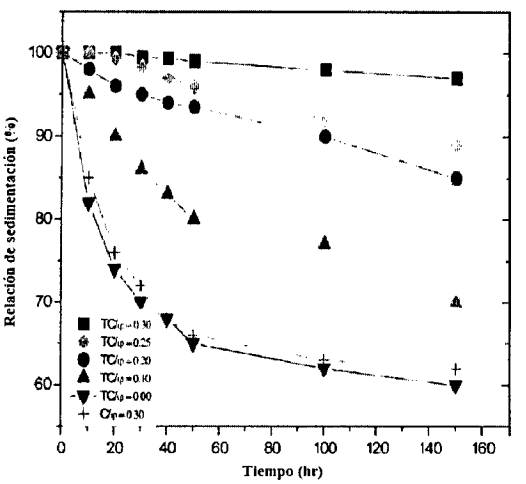


Figura 25. Relación de sedimentación para MRF Park[8].

La figura 26 muestra los resultados de Lim[28]. Se observa en la figura una dispersión de carbonil-hierro (CI) y aceite mineral (MO) con cierta relación en volumen de nanopartículas (FS), también se muestra en el recuadro una fotografía de la prueba de sedimentación.

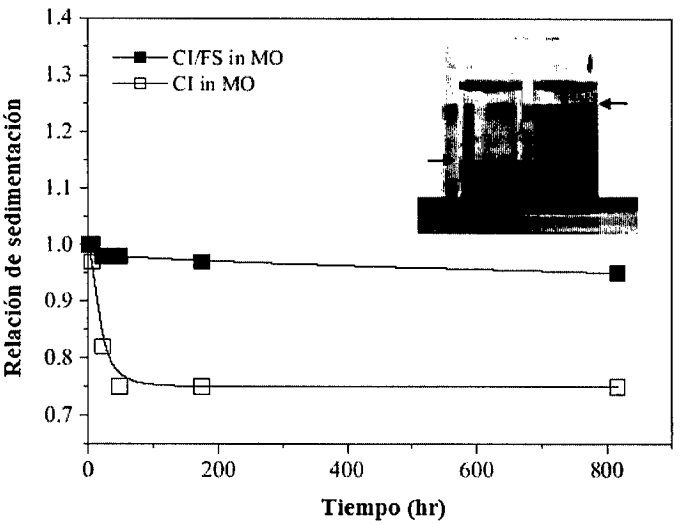


Figura 26. Relación de sedimentación para MRF Lim[28].

1.4.1. Aglomeración de partículas

Una mala dispersión de la fase magnetizable al sintetizar un MRF, así como ciertas condiciones de operación a las que son sometidos estos fluidos, conllevan a un asentamiento de partículas y la formación de aglomerados, lo cual puede acarrear una disminución las propiedades magnéticas del MRF. La formación de una red tixotrópica que estabilice la dispersión puede minimizar este tipo de problemas. Ejemplos de tixotrópicos pueden ser: compuestos generadores de enlace de hidrógeno, aditivos coloidales en el intervalo 0.1-5nm., geles, micropartículas orgánicas, silicatos como la bentonita, dióxido de titanio, alúmina, sílica, sílicas hidratadas Podszun[15].

1.5. Recubrimiento de partículas

Weiss[12] menciona que las partículas de la fase dispersa pueden ser cubiertas o encapsuladas con el fin de prevenir la degradación de las propiedades magnéticas. Los polvos pueden ser recubiertos por diferentes materiales tales como metales no magnéticos, cerámicos, polímeros termoplásticos y polímeros termofijos. En la patente PCT/US93/03487[16] se describe que las partículas magnetizables pueden ser cubiertas por un agente aislante para aumentar la distancia entre partículas y prevenir los aglomerados,

Podszun[15] menciona que, el recubrimiento de las partículas magnetizables por compuestos orgánicos, se puede lograr por: adherencia de fundidos, evaporación, precipitación, solución, y por reacción de monómeros sobre la superficie. En este mismo trabajo se dan ejemplos como recubrir partículas de carbonil-hierro con silanos y poliuretanos. Inherente a la fase dispersa es la abrasión, lo cual puede ocasionar daños en los dispositivos donde se utilizan los MRF. Un recubrimiento de las partículas magnetizables con materiales más suaves tiende disminuye este tipo de problemas.

Capítulo IV
Aplicaciones

Los MRF tienen numerosas aplicaciones dado que se puede controlar sus propiedades reológicas por medio de imanes o electroimanes. Deseablemente, cuando se exponen a un campo magnético, los MRF son aprovechados para incrementar la respuesta de los dispositivos que los contienen, algunas de las aplicaciones más comunes son: absorbedores de choques, embragues, frenos, amortiguadores y actuadores[12, 14].

Klingenberg[6] proporciona una lista de aplicaciones normales y potenciales de los MRF (tabla 5). Vessonen[26] menciona los pros y contras de los MRF. Algo que limita la aplicación de esta clase de fluidos es su precio, el cual oscila entre 500 y 1000 dólares por litro.

Tabla 5. Aplicaciones normales y potenciales de los MRF.

Aplicaciones normales	Aplicaciones potenciales
Embragues automotrices	Dispositivos para elevadores
Frenos	Amortiguadores para terremotos
Fluidos para pulir	Embragues automotrices
Amortiguadores para sillas	Amortiguadores de MR elastómeros
Amortiguadores en prótesis de rodillas	
Sistemas actuadores	

1. ACTUADORES

Los absorbedores de choques, amortiguadores y actuadores operan de la siguiente manera. Un pistón se mueve a través de un cilindro como resultado de una fuerza ejercida sobre un eje; el pistón fuerza al MRF por un espacio muy estrecho (figura 27) y al aplicar un campo magnético la disipación viscosa libera la energía en forma de calor[3,6] . Existen diferentes configuraciones del espacio por donde se fuerza al fluido dentro de un actuador. En la figura

27 (a) y (b) se muestra esquemáticamente el funcionamiento de un actuador. En modo de flujo, un bypass es colocado afuera del dispositivo donde se aplica el campo. En modo corte, el fluido es forzado a pasar por un estrecho anular.

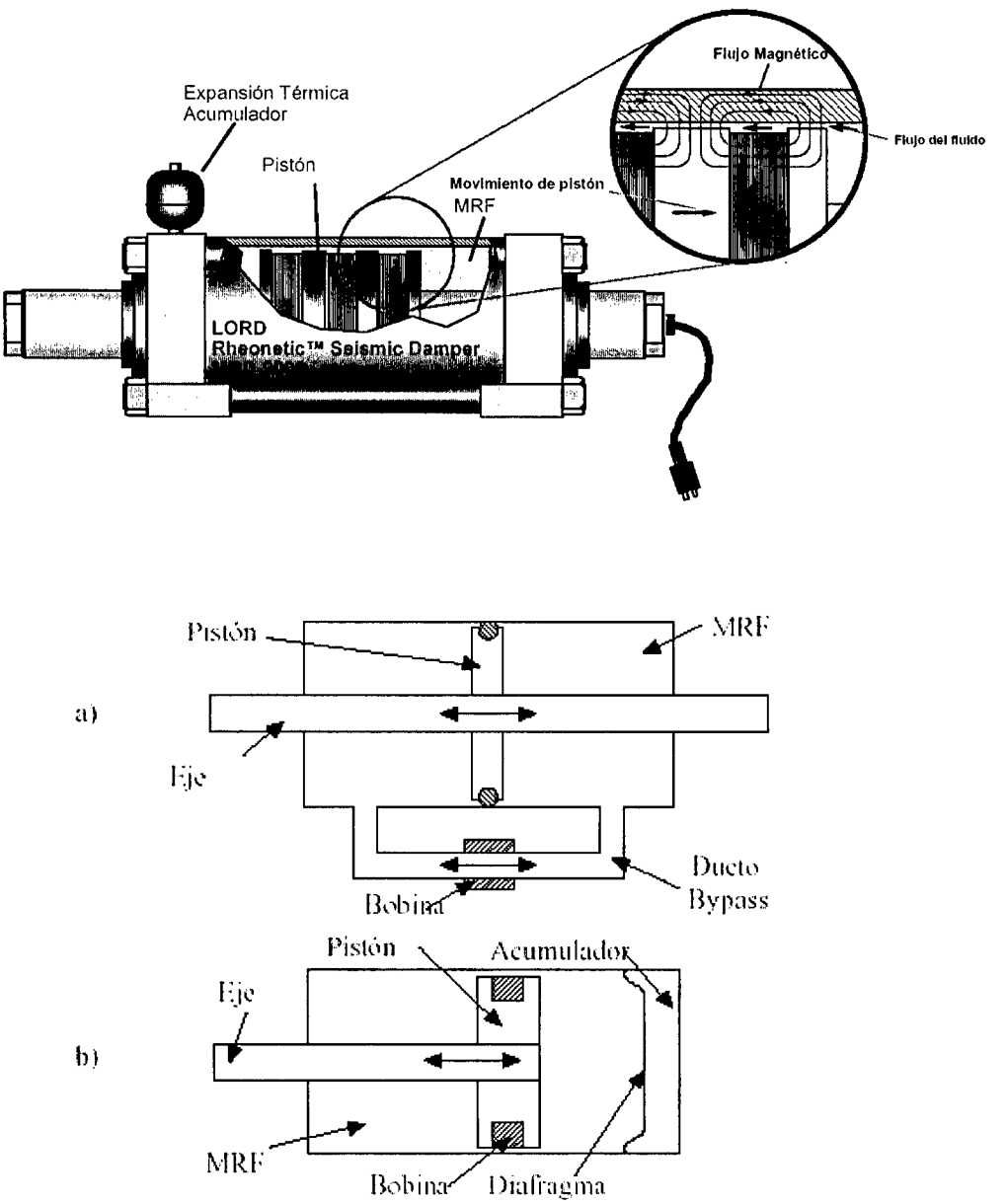


Figura 27. Adaptador y esquema de funcionamiento.

2. PRÓTESIS

La Lord Corporation ha comercializado recientemente prótesis de rodillas donde se ha diseñado un montaje especial con sensores, unidades de control, baterías y un actuador. Este último juega un papel importante en el amortiguamiento [6] (figura 28).

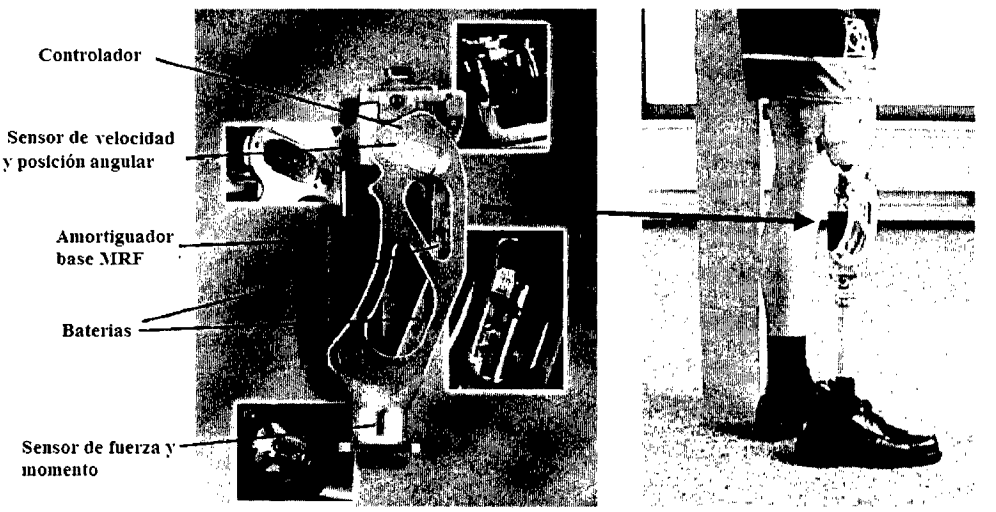


Figura 28. Partes de una prótesis con amortiguador.

3. ESPONJAS CON MRF

Esponjas empapadas con MRF son una nueva manera de usar estos fluidos en aplicaciones de bajo esfuerzo y alto grado de control[49]. La función de la esponja es mantener al MRF localizado en la región activa donde se aplica el campo magnético. La esponja permite el uso de un mínimo volumen de fluido y operar en modo de corte. Además no son necesarios sellos o mecanismos de altas tolerancias. Otro punto importante de las esponjas empapadas con MRF

es que no son susceptibles a la sedimentación por efecto capilar. La figura 29 muestra los componentes de un dispositivo de máquina de lavado.

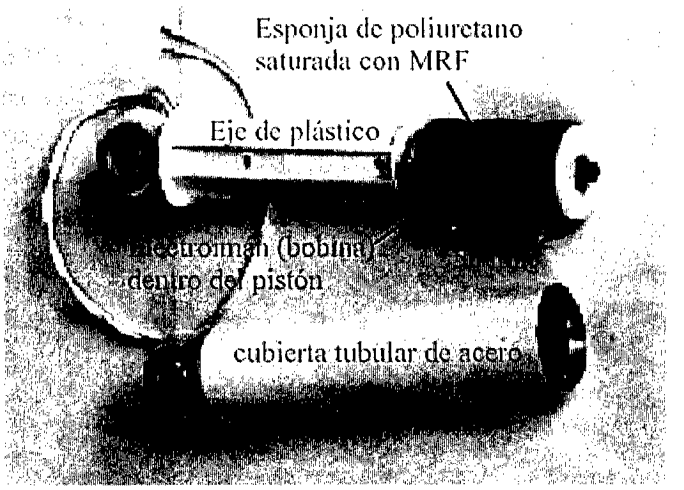


Figura 29. Dispositivo para máquinas de lavado que utilizan esponjas con MRF.

4. EMBRAGUES Y FRENOS

Otra clase de aplicaciones que aprovecha la capacidad de transferencia de torque de estos fluidos, cuando se encuentran en geometrías como cilindros concéntricos o discos paralelos, es en frenos o embragues. Por ejemplo si se llena con un MRF el espacio entre cilindros concéntricos. A campo cero, cuando un cilindro gira, una cantidad pequeña de torque es transferida al segundo cilindro. Sin embargo, cuando se aplica un campo, el fluido incrementa su viscosidad y una considerable fracción del torque aplicado al primer cilindro se transfiere al segundo. En muchos casos un campo suficientemente grande puede provocar que el fluido

solidifique y el segundo cilindro gire con la misma velocidad angular del primero [6]. La figura 30 muestra un embrague y el esquema de su constitución con un MRF.

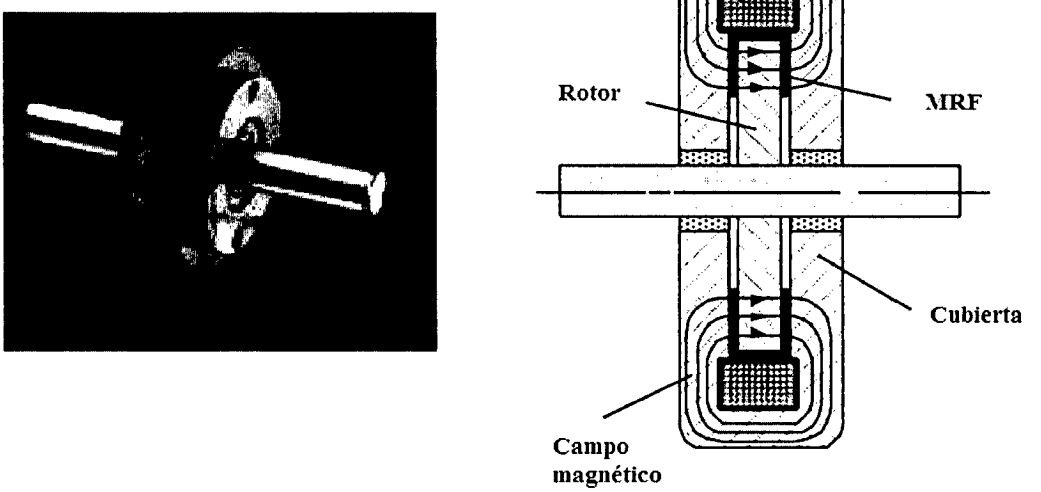


Figura 30. Embrague y esquema de funcionamiento.

5. PULIDO DE SUPERFICIES

En *LLE* Review vol. **72**[50] y **96**[51] se reporta la aplicación de estos fluidos en el pulido de superficies. Existen dos técnicas para el pulido de superficies, una es la de plato horizontal giratorio y otra es la de volante giratorio. En las dos técnicas, la preparación previa del MRF incluye cierta cantidad de partículas abrasivas. En la primera, el MRF se vierte sobre el plato y se aplica un campo magnético con un electroimán por la parte inferior. En la segunda, (figura 31) el líquido es vertido en el volante giratorio de manera vertical y el campo magnético se

distribuye de manera radial desde el centro del volante. En ambos casos se produce un gradiente del campo magnético, con una mayor concentración de partículas abrasivas en la superficie externa. El pulido o acabado de la muestra se logra por el corte del movimiento del fluido por la muestra montada en un husillo.

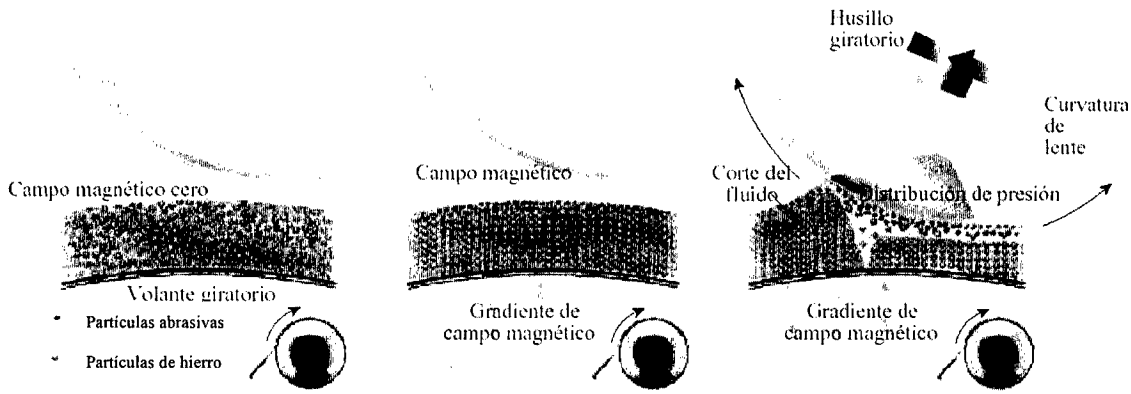


Figura 31. MRF en acabado superficial

6. APLICACIONES EN MEDICINA

Aplicaciones de extrema importancia son las que tienen fines benéficos en medicina. Se han publicado en artículos relativamente recientes, Sheng[31], Liu[52] y Flores[53], simulaciones sobre el uso de MRF para ocluir conductos en el sistema vascular. El objetivo de estos trabajos es colapsar tumores suspendiendo el flujo sanguíneo hacia ellos, utilizando las propiedades de partículas magnéticas en el torrente sanguíneo. La figura 32 presenta un diagrama de como se realizan estas investigaciones.

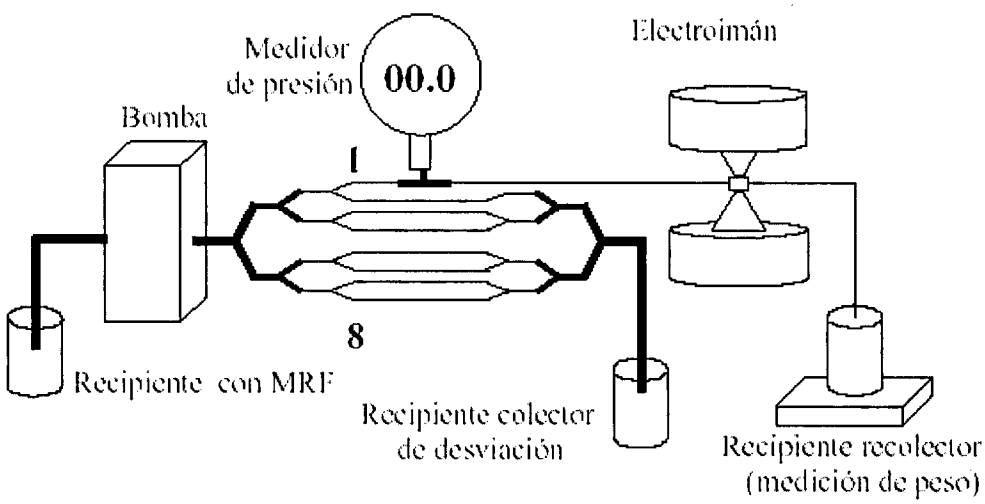


Figura 32. Esquema para simular conductos vasculares.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

1. CONCLUSIONES

- Las tablas 1 a 3 dan las bases de tamaño y tipo de partícula, porcentajes, y compuestos comúnmente empleados en la síntesis de un MRF.
- La fase dispersa puede ser sintetizada o comercial.
- El elemento portador puede ser constituido, además de los compuestos mencionados en la tabla 1, por un FF.
- El diagrama de flujo dado en la parte de Estado de Arte en el capítulo III muestra los pasos principales para la síntesis de esta clase de fluidos.
- La caracterización por las diferentes técnicas mencionadas (DRX, SEM, MET, OM, reológica a campo cero y reológica con campo magnético) marcan las propiedades de partida y finales al sintetizar un MRF.
- La estabilidad de la dispersión es una prueba a través del tiempo que asegura las propiedades del fluido a campo cero.
- El recubrimiento de las partículas magnetizables puede ser una opción para la estabilidad de sus propiedades, al someter los MRF a un campo magnético.
- En la caracterización reológica de un MRF con campo (on-state) debe adaptarse un elemento generador de campo magnético, que podría ser la parte más compleja del equipo de torque.
- Aplicaciones comunes de los MRF son: absorbedores de choques, embragues, frenos, amortiguadores, actuadores, pulido de superficies.
- Las aplicaciones en medicina de estos fluidos son de trascendencia para el ser humano.

2. RECOMENDACIONES

- Materiales con alta saturación y baja coersitividad se recomiendan como fase magnetizable en la síntesis de los MRF.
- En la elaboración de un MRF se recomienda un tamaño de partícula menor a 10 μm.
- Se recomienda utilizar diferentes tamaños o una distribución de tamaños de partícula en la elaboración de un MRF, ya que esto permite un mejor llenado de los sitios intersticiales, entre partículas relativamente grandes, por partículas pequeñas.
- Una de las desventajas de los MRF es el asentamiento de las partículas cuado el fluido permanece estático por demasiado tiempo, para evitar esto y asegurar la estabilidad de la dispersión se debe considerar siempre el uso de adecuados surfactantes y de aditivos.
- En la medición de cualquier propiedad durante la síntesis de un MRF, la calibración de los equipos disminuye los errores implícitos.
- Con el objeto de aportar un entendimiento más profundo en el tema, así como establecer e incrementar las aplicaciones, la interacción partícula surfactante, el recubrimiento de partículas magnetizables, el comportamiento directo en dispositivos y la dinámica reológica, son temas que aun están poco desarrollados y que pueden ser casos de estudio recomendados en la investigación de los MRF.

Apéndice

1. Magnetismo en los medios materiales

a).- Magnetización de material/ vol., **M**

Suma de todos los momentos individuales de los electrones y los núcleos atómicos por unidad de volumen del material, al alinearse en una misma dirección

b).- Intensidad de campo magnético, **H**

Campo de inducción magnética generado al aplicar una corriente en una bobina

c).- Susceptibilidad magnética, χ_m

Relación de magnetización del material y la intensidad del campo magnético

$\chi_m = \mathbf{M} / \mathbf{H}$

d).- Inducción magnética (densidad de flujo magnético), **B**

e).- Permeabilidad magnética, $\mu=\mu_0(1+\chi_m)$

f).- Saturación

Valor constante alcanzado al magnetizar cierto material (valor máximo de **M**)

2. Unidades en magnetismo

Cantidad	Símb.	Unidades CGS	*Factor	Unidades SI
		$B=H+4\pi M$		$B=\mu_0(H+M)$
Densidad de flujo magnético	**B**	gauss (G)	10^{-4}	Tesla (T), Wb/m^2
Flujo magnético	**Φ**	maxwell (Mx) $G*cm^2$	10^{-8}	webers (Wb)
Fuerza magnetomotriz	**U**	Gilbert (Gb)	$10/4\pi$	Ampere (A)
Intensidad de campo magnético	**H**	oersted (Oe)	$10^3/4\pi$	A/m
Magnetización/vol	**M**	emu/cc	10^3	A*m
Magnetización/masa	**σ**	emu/g	1	$A*m^2/kg$
Momento magnético	**m**	Emu	10^{-3}	$A*m^2$
Susceptibilidad/vol	**χ**	adimensional	4π	Adimensional
Susceptibilidad/masa	**κ**	adimensional	4π	Adimensional
Permeabilidad (vacío)	**μ_0**	adimensional	$4\pi*10^{-7}$	Wb/A*m
Permeabilidad (mat.)	**μ**	adimensional	$4\pi*10^{-7}$	Wb/A*m

Bibliografía

1. Delivorias R. P., Eindhoven University of Technology. Dep. of Mech. Eng. *Report No MT04.18,* Research on Smart Materials: Application of ER and MR fluid in an Automotive Crash Energy Absorber, Eindoven, March 16, 2004.
2. Ginder y cols., US Patent 5,549,837, Aug., 27, 1996.
3. Carlson D. J. What Makes a good Fluids? 8th International Conference on Electro-rheological Fluids and Magneto-rheological Suspensions, *Nice, July* 9-13, 2001.
4. Phulé P. P. *Smart Materials Bulletin.* Feature. February 2001. 7-10.
5. Jolly R. M. y cols. *Internal Publication.* Properties and Applications of Commercial MR-Fluids. Lord Corporation Thomas Research Center.
6. Klingenberg D. J. *AICHE journal* 2001, **47**, No. 2, 246-249.
7. Dang A. y cols. *Ind. Eng. Chem.* Res. 2000, **39**, 2269-2274.
8. Park J. H. y cols. *J. Coll. Inter. Sc.* 2001, **240**, 349-354.
9. Cupich Rdz. M. y F. J. Elizondo. G. Ponencia, *Sesión de Vibraciones Mecánicas.* V Congreso Mexicano de Acústica, Querétaro, Qro., Méx. 17 y 18 Sep. 1998.
10. Genç S. Doctoral Dissertation. Synthesis and properties of Magnetorheological (MR) fluids. July, 2002. University of Pittsburgh. 2002.
11. Donado P. F. Tesis Doctoral. Fluidos Electro y Magneto-Reológicos: Teoría y Experimento. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla Pue. 2002.
12. Weiss y cols. US Patent 5,900,184. May 4, 1999.
13. Chin, G. Y., *Magnetic Materials:* An Overview, in Encyclopedia of Advanced Materials.
14. Weiss y cols. US Patent 6,027,664. **2000**, Feb. 22.
15. Podszun y cols. US Patent 5,989,447. **1999**, Nov. 23.
16. US Patent WO 93/21644 PCT/US93/03487.
17. Kashevskii B. É. y cols. UDC 532.584:537.84. © Plenum Publishing Corporation **1989** 368-371.
18. Popplewell J. y cols. J. Magn. Magn. Mater. 1995, **149**, 53-56.
19. Felt D. W. y cols. *J. Intelligent Mat. Sys. Structures.* Sep. 1996, **7**, 589-593.
20. Janocha H. Sensor and Actuators. A 2001, **91**, 126-132.

21. Walid H. El-Aouar. M. Sc. Thesis Degree. Finite Element Analysis Based Modeling of Magneto Rheological Dampers. Virginia Polytechnic Institute and State University. 2002, Sep. 23, Blacksburg Virginia.
22. Wang X. y Gordaninejad F. *J. Intelligent Mat. Sys. Structures.* 1999, Vol. 10, **No 8**, 601-608.
23. Wang X. y Gordaninejad F. Damping and Isolation. Proceedings of SPIE conference on Smart Materials and Structures. Ed. D. J. Inman, 2001, **4331**, 82-91.
24. Bashtovoi G. V. y cols. J. Magn. Magn. Mater. 2002, **252**, 315–317
25. Tian Y. y cols. *Physical review E.* 2003, **67**, 051501.
26. Vessonen I. VTT Symposium 225. VTT Industrial Systems, Smart Materials and Structures VTT Research Program 2000-2002, Espoo, Finland, 4th Dec., 2002. p. 33-66.
27. Craig B. AMPTIAC *Technical Staff, Rome, NY.* AMPTIAC Quarterly. **7**, No 2, 2003, p. 15-19.
28. Lim S. T. y cols. *J. Magn. Magn. Mater.* In Press.
29. Chaudhuri A. y cols. *J. Magn. Magn. Mater.* In Press.
30. Parekh K. y cols. *J. Magn. Magn. Mater.* 2005, **289**, 311-313.
31. Sheng R. y cols. *J. Magn. Magn. Mater.* 1999, **194**, 167-175.
32. Hernández I. Oscar. Tesis de grado. M. C. Ing. Cerámica., Síntesis, Caracterización y Análisis Estructural de Perovskitas Triples $A_3B_2WO_9$ ($A = Ba^{2+}, Sr^{2+}$, $B = Ln^{3+}, In^{3+}, Y^{3+}$). Cinvestav Saltillo. Saltillo Coah. **2002**, Mayo 16.
33. Garza. G. M. Tesis de grado. M. C. Ing. Cerámica., Síntesis y Caracterización de Perovskitas Complejas $A_3B_2MoO_9$ ($A = Ba^{2+}, Sr^{2+}$, $B = Ln^{3+}, In^{3+}, Y^{3+}$). Cinvestav Saltillo. Saltillo Coah. **2002**, Febrero 15.
34. Montemayor S. M. y cols. *Superficies y Vacío.* 2002 **17(2),** 21-24.
35. Zao X. P. y J. B. Yin. Chem. Mater 2002, **14**, 2258-2263.
36. Wen W. y cols. Appl. Phys. Lett. 1997, **71(17)**, Oct. 2529-25331.
37. Salazar A. G. Doctoral Thesis. Synthesis, Characterization and Applications of Iron Oxide Nano-particles. KTH Materials Science and Engineering. Stockholm, Sweden 2004
38. Galindo C. G. y cols. *Langmuir* 2005, **21**, 4410-4419.

39. Treviño M. M. E. Tesis de grado M. C., Polimerización de Acetato de Vinilo en Microemulsiónes Normales Estabilizadas con Una Mezcla de Bromuros. Universidad Autónoma de Coahuila. F. C. Químicas, Saltillo Coah. 1998.
40. Rao C. N. y J. Gopalakrishnan Second Edition Cambridge University Press. 1997.
41. Suryanarayana C. y M. G. Norton. *X-ray Difraction a Practical Approach.* Plenum Press-New York and London.
42. Pant R. P. y cols. *J. Magn. Magn. Mater.* 1995, **149**, 10-13.
43. Apuntes de Microscopía Electrónica. Materia: Técnicas de caracterización. Maestría en Ciencias en Ing. Cerámica 1999.
44. Klingenberg D. J. y Zukoski IV C. F. *Langmuir.* 1990, **6**, 15-24.
45. Viota J. L. y cols. *J. Col. Inter. Sc.* 2001, **284**, 527–541.
46. J. de Vicente y cols. *J. Magn. Magn. Mater.*2002, **251**, 100-108.
47. Jolly R. M. y cols. *Smart Mater. Struct.* 1996, **5**, 607-614.
48. Bird R. B. y Autores. Dynamics of Polymeric Liquids **vol. 1** Fluid Mechanics.
49. Chrzan M. J. y Carlson J. D. 8th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach CA. March 2001.
50. *LLE* Review vol. **72** (197-207).
51. *LLE* Review vol. **96** (239-249).
52. Liu J. y cols. *J. Magn. Magn. Mater.* 2001, **225**, 209-217.
53. Flores A. G. y J. Liu. European Cells and Materials 2002, **3**, Suppl. 2, 9-11.