# CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

# DESARROLLO DE MATERIALES "INTELIGENTES" CON PROPIEDADES MAGNETOREOLÓGICAS

**CASO DE ESTUDIO**

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:**

## ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

**OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS**

**PRESENTA:**

**ADRIANA BERENICE ARAUZ SOLÍS**

**SALTILLO, COAHUILA** **AGOSTO 2008**

CENTRO DE INFORMACIÓN
03 OCT 2008
RECIBIDO

# CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

# DESARROLLO DE MATERIALES "INTELIGENTES" CON PROPIEDADES MAGNETOREOLÓGICAS

**CASO DE ESTUDIO**

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:**

## ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

**OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS**

**ASESORA:**

M.C. Isaura Gpe. Yáñez Flores

# CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

# DESARROLLO DE MATERIALES "INTELIGENTES" CON PROPIEDADES MAGNETOREOLÓGICAS

**CASO DE ESTUDIO**

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:**

## ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

**OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS**

## EVALUADORES:

**Dra. Rebeca Betancourt Galindo**

**M.C. Adrian Méndez Prieto**

## AGRADECIMIENTOS

Mi principal agradecimiento es para el Señor Jesucristo para Él esta dedicada completamente este logro más en mi vida ¡GRACIAS! por que estuviste en cada momento en que yo estaba realizando este trabajo, por ser mí compañero, mí equipo y darme la fortaleza cuando ya estaba cansada.

Agradezco a mis padres Juanys y Adrian; a mis hermanos Mauricio, Myriam y Lucia; por que este año fue de esfuerzos y sacrificios. Al igual a mis amigas y tías Melida y Teresa Carrizales por abrirme las puertas de su casa y más aún de su persona, son muy especiales en mí vida en este año que a marcado mí vida profesional. Le doy gracias a Dios por su vida.

Agradezco también a mí asesora Isaura Yañez Flores, por todo el apoyo, confianza y atención académica que brinda a todos los estudiantes que hemos estado a su cargo. También a mí amigo y compañero Juan Zavala, ya que juntos pasamos momentos de desesperación, angustia, desaliento, nervios, sacrificios y por supuesto alegrías de lograr este trabajo que nos implicó un doble esfuerzo.

Finalmente agradezco a todo el personal del CIQA que me brindaron un amplio conocimiento para entender la ciencia del plástico, que ahora son mis herramientas básicas de trabajo.

Espero que sea de utilidad esta recopilación de los conocimientos y de información que recabada durante el ciclo escolar 2007 – 2008.

***"No temas por que yo estoy contigo no desmayes por que yo soy tu Dios quien te esfuerza siempre te ayudaré, siempre te sustentaré, con la diestra de mí justicia"***

***Isaías 41:10***

# ÍNDICE

Índice i

**CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN** 1

**CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA** 2

**2.1 Materiales Inteligentes** 2

2.1.1 Características de los materiales inteligentes 3

2.1.2 Clasificación de los materiales inteligentes 3

**2.2 Materiales Magnéticos** 4

2.2.1 Magnetismo 4

2.2.2 Tipos de comportamiento magnético 7

2.2.3 Materiales magneto y electroactivos 10

2.2.4 Fluidos magnéticos 10

**2.3 Generalidades de nanotecnología** 10

2.3.1 Nanocompuestos 11

2.3.2 Métodos de obtención de partículas nanométricas (polvos) 12

**2.4 Ferrofluido (FF)** 15

2.4.1 Métodos de obtención de ferrofluidos 16

2.4.2 Propiedades y aplicaciones de los ferrofluidos 17

**2.5 Fluidos magnetoreológicos (MRF)** 18

2.5.1 Composición de los fluidos magnetoreológicos 21

2.5.2 Propiedades reológicas y magnéticas de los fluidos MRF 24

**2.6 Fluidos electroreológicos** 28

**2.7 Elastómeros magnetoreológicos** 29

**2.8 Caracterización de materialesMRF** 30

**CAPÍTULO 3. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO** 35

Fluidos magnetoreológicos (MRF) 35

Fluidos elastomeros magnetoreológicos (MREs) 40

**CAPÍTULO 4. ÁREAS DE OPORTUNIDAD (APLICACIONES FUTURAS)** 42

Aplicaciones actuales de los MRF 44

**CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES** 48

**CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS** 49

# CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes retos en la actualidad es la producción de nuevos materiales multifuncionales que posean cierto grado de "inteligencia". El término "materiales inteligentes" proviene de la capacidad de éstos de realizar tres funciones principales: percibir un estímulo, procesar esta información y actuar acercándose o alejándose del estímulo.

La nueva generación de materiales inteligentes puede dividirse en dos grandes grupos:

1. Materiales duros y secos, tales como cerámicos y plásticos. En estos materiales se vienen desarrollando trabajos intensos de investigación en el área de semiconductores, cerámicos dieléctricos, películas delgadas ferroeléctricas.

2. Materiales suaves y húmedos, tales como fluidos magneto y electroreológicos, fluidos magnéticos y geles poliméricos.

Algunos de los materiales inteligentes que se han sintetizado están constituidos por una matriz polimérica conteniendo partículas metálicas de tamaños aproximados de 10 nm conocidos como nanocompuestos[1].

Un tipo de los materiales inteligentes ampliamente estudiados, en la actualidad, corresponde a los fluidos magnetoreológicos (MRF por sus siglas en inglés) los cuales son suspensiones de partículas magnetizables de tamaño micrométrico, dispersas en un líquido no magnético. Estos fluidos tienen la habilidad de cambiar sus propiedades reológicas cuando son sujetos a un campo magnético. Su comportamiento reológico es típicamente el de un fluido de Bingham, el cual no fluye hasta que el esfuerzo aplicado exceda un esfuerzo de cedencia; éste es función de la intensidad del campo magnético aplicado. Por otra parte, si en lugar de utilizar partículas de tamaño micrométrico se usan partículas de tamaño nanométrico (10 nm) se obtiene un ferrofluido. El cual consiste de partículas nanométricas (monodominio), dispersas en un líquido y estabilizadas por un surfactante, el cual evita que se aglomeren. El estudio de los fluidos magnetoreológicos (MRF) se ha convertido en un área de investigación de creciente importancia en el campo de la nano o micro industria, así como en la industria de ingeniería de precisión[2].

# CAPITULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 MATERIALES INTELIGENTES

En estos últimos años, el término "inteligente" se ha adoptado como un modo válido para describir una clase de materiales que presentan la capacidad de cambiar sus propiedades físicas en presencia de un estímulo específico.

Los materiales inteligentes, denominados también multifuncionales, son aquellos que tienen la capacidad de cambiar sus propiedades mecánicas o físicas, como por ejemplo: rigidez, viscosidad, forma, color, etc. cuando le es aplicado un estímulo específico. Los materiales inteligentes son materiales que por su microestructura pueden comportarse como sensores, actuadores y controladores[3].

Estos materiales poseen ciertas características, las cuales se describen en la siguiente definición de sistema inteligente:

*Sistema o material que presenta sensores, 'actuadores' y mecanismos de control intrínseco mediante los cuales es capaz de sentir un estímulo, de responder ante él de una forma predeterminada en un tiempo apropiado y de volver a su estado original tan pronto como el estímulo cesa*[4].

Las propiedades de los fluidos inteligentes se han conocido por cerca de sesenta años, sin embargo se convirtieron en objeto de interés, sobre todo con el uso de un fluido magnetoreológico (**MRF**) en la suspensión de algunos automóviles. Otras de sus aplicaciones incluyen frenos y amortiguadores sísmicos, que se utilizan en los edificios en zonas sísmicas activas para amortiguar las oscilaciones que se producen durante un terremoto.

Por otra parte, los materiales compuestos de partículas magnéticas en matrices poliméricas se han producido ya desde hace algún tiempo. En 1981 Rosenweig[5] et. al. estudiaron el comportamiento de partículas estabilizadas magnéticamente polimerizando el fluido de suspensión. En 1992 un grupo de investigación de Toyota desarrolló un elastómero magnetoreológico (MREs) dispersando partículas de hierro en silicón líquido y curándolo. Jolly

et. al. de Lord Corporation y Ginder et. al. de Ford Motor Company, en 1996 desarrollaron MREs para la industria automotriz[6].

### 2.1.1 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES INTELIGENTES

Existe un acuerdo en cuanto a ciertos criterios o rasgos comunes que deben presentar los llamados materiales o estructuras inteligentes:

- Presentan sensores de reconocimiento y medida de la intensidad del estímulo ante el que reaccionará el material.
- A su vez presentan "actuadores", que responden ante dicho estímulo.
- Para controlar la respuesta de una forma predeterminada presentan mecanismos de control y selección de la respuesta.
- El tiempo de respuesta es corto.
- El sistema regresa a su estado original tan pronto como el estímulo cesa.

### 2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES INTELIGENTES

Una clasificación general de estos materiales es la que se muestra en la Tabla 1 donde podemos observar tres principales tipos de materiales inteligentes. El presente trabajo se ha enfocado a los materiales magnetoreológicos, considerando sus potenciales aplicaciones futuras[7].

**Tabla 1. Materiales "inteligentes"**

| **Materiales con memoria de forma** | **Materiales electro y magnetoactivos** | **Materiales foto y cromoactivos** |
|---|---|---|
| Aleaciones con memoria de forma | **Materiales magneto y electroreológicos** | Fotoactivos |
| Polímeros con memoria de forma | Materiales pizoeléctricos | Cromoactivos |
| Cerámicas con memoria de forma | Materiales magneto restrictivos. | |
| Aleaciones con memoria de forma, ferromagnética. | | |

## 2.2 MATERIALES MAGNÉTICOS

Los materiales magnéticos, en general, han encontrado un amplio intervalo de aplicaciones en ciencia y tecnología. Materiales compuestos que pueden consistir de matrices poliméricas rellenas con partículas magnéticas se conocen desde hace tiempo y han sido utilizados como imanes permanentes, núcleos magnéticos y como elementos de fijación o conexión en muchas áreas. Los elastómeros y geles magnéticos representan un tipo de materiales compuestos relativamente nuevos que presentan cierto número de características sumamente interesantes, por lo cual son sujetos a intensa investigación experimental y teórica. Materiales suaves magnéticamente activos son materiales tipo elastomérico que reaccionan a un campo magnético externo y experimentan deformación o esfuerzo mecánico. Se les menciona de varias maneras como polímeros magnetoreológicos, magnetoelastómeros, etc. Una subclase de éstos son los geles magnéticos.

El desarrollo de sistemas poliméricos magnéticamente activos se encuentra fuertemente relacionado tanto con el desarrollo de nanopartículas magnéticas, como con el desarrollo de fluidos magnéticos[7].

### 2.2.1 MAGNETISMO

El magnetismo es el fenómeno por el cual los materiales muestran una fuerza atractiva ó repulsiva hacia otros materiales por la presencia de un campo magnético, ha sido conocido por cientos de años[8].

**Dipolos magnéticos**

Los dipolos magnéticos pueden considerarse como pequeños imanes formados por un polo norte y un polo sur. Los dipolos magnéticos son influenciados por los campos magnéticos. Dentro de un campo magnético, la fuerza del mismo campo ejerce un par que tiende a orientar los dipolos en dirección del campo. Los polos siempre están en pares en los cuerpos magnetizados y es imposible separarlos, si la barra de magneto se corta transversalmente en dos, aparecerán nuevos polos en las superficies cortadas y darán lugar a dos nuevos magnetos.

**Campos magnéticos**

La presencia de un campo magnético rodeando una barra imanada de hierro se puede observar por la dispersión de pequeñas partículas de hierro espolvoreadas sobre un papel colocado encima de una barra de hierro. El campo magnético externamente aplicado, a veces denominado intensidad del campo magnético, se designa por H. Si el campo magnético es generado por medio de una bobina cilíndrica formada por N espiras una junta con otra con una longitud total $l$ y transportando una corriente de magnitud $I$, entonces:

$$H = \frac{NI}{l}$$

Las unidades de H son amperios-vuelta por metro, o simplemente amperios/metro.

**Inducción magnética**

La inducción magnética o densidad de flujo magnético, indicado por $B$, representa la magnitud de campo magnético dentro de una sustancia que es sometida a un campo $H$. Las unidades de $B$ son teslas [o bien, weber por metro cuadrado ($Wb/m^2$)]. Tanto $B$ como $H$ son campos de vectores, y están caracterizados no solamente por la magnitud, sino también por la dirección en el espacio. La intensidad de campo magnético está relacionada mediante

$$B = \mu H$$

El parámetro $\mu$ se denomina permeabilidad[7].

**Permeabilidad magnética**

Cuando colocamos un material ferromagnético dentro de un campo magnético, aumenta la intensidad del campo magnético. Este incremento en la imanación se mide mediante una cantidad llamada permeabilidad magnética, y es una propiedad especifica del medio a través del cual pasa el campo $H$ y en el cual $B$ es medido[7]. La permeabilidad tiene dimensiones de weber por amperio-metro (Wb/A-m) o bien henrio por metro (H/m).

En el vacío,

$$B_o = \mu_o H$$

donde $\mu_o$ es la *permeabilidad del vacío*, una constante universal cuyo valor es de $4\pi \times 10^{-7}$($1.257 \times 10^{-6}$)H/m.

Se pueden utilizar varios parámetros para describir las propiedades magnéticas de los sólidos. Uno de ellos es el cociente entre la permeabilidad en un material y la permeabilidad en el vacío, o sea,

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

aquí $\mu_r$ se denomina *permeabilidad relativa*, y no tiene unidades. La permeabilidad relativa de un material es una medida del grado con que un material puede ser magnetizado, o sea, la facilidad con que se puede inducir un campo B en presencia de un campo externamente aplicado H.

**Magnetización**

Otra magnitud vectorial, *M*, denominada magnetización del sólido, se define mediante la expresión,

$$B_o = \mu_o H + \mu_o M$$

En presencia de un campo *H*, los momentos magnéticos dentro del material tienden a alinearse con el campo y a reforzarlo en virtud de sus momentos magnéticos; el término $\mu_o M$ es una medida de esta contribución[8].

La magnitud M es proporcional al campo aplicado de manera que:

$$M = \chi_m H$$

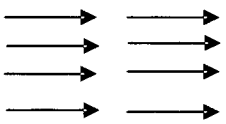
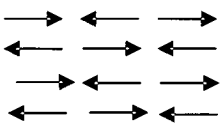
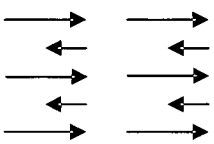
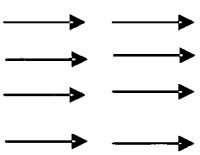
donde $\chi_m$ es la susceptibilidad magnética, la cual no tiene unidades. La susceptibilidad magnética y la permeabilidad relativa están relacionadas de la siguiente manera:

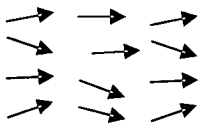
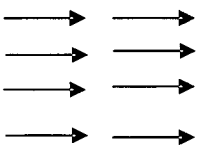
$$\chi_m = \mu_r - 1$$

## 2.2.2 TIPOS DE COMPORTAMIENTO MAGNETICO

El comportamiento de un material (Tabla 2) cuando se le aplica un campo magnético permite su clasificación[9] en:

**Tabla 2. Comportamiento magnético de los materiales**

| | Campo magnético | DESCRIPCIÓN |
|---|---|---|
| **Ferromagnético** |  | Presentan cambios significativos en la magnetización cuando se aplica un campo magnetizante. Se considera la formación de pequeñas regiones llamadas *dominios*, pero las direcciones de magnetización son tales que se cancelan unas a otras y el espécimen no tiene un valor de magnetización neto. |
| **Antiferro-magnético** |  | Estos presentan una tendencia a la alineación antiparalela de los espines que provoca la cancelación de los momentos magnéticos netos, en pocas palabras, existe una alineación de los dipolos magnéticos de los átomos en presencia de un campo magnético, por lo que se tiende a la cancelación de los momentos magnéticos. |
| **Ferrimagnético** |  | También conocidos como *ferritas*, en este caso los iones diferentes poseen distinta magnitud para sus momentos magnéticos y, cuando estos momentos se alinean de forma antiparalela sus momentos magnéticos netos no se cancelan. |
| **Diamagnéticos** |  | El momento magnético neto de cada átomo en el material es cero debido a la mutua cancelación de momentos electrónicos dentro del átomo. Al aplicar un campo magnético se induce una magnetización pequeña contraria al campo magnético aplicado, que desaparece al quitar el campo magnético. |

| | | |
|---|---|---|
| **Paramagnético** |  | Aquí no existe la completa cancelación de los componentes magnéticos de spin u orbitales, por lo tanto hay una tendencia de alineamiento de los momentos magnéticos atómicos cuando un campo externo es aplicado, pero dicha alineación no es perfecta por efecto del movimiento térmico de los átomos. |
| **Super-paramagnético** |  | Aquí cada partícula puede contener más de un dominio magnético, y resulta de la tendencia de los momentos moleculares a alinearse con el campo magnético aplicado, pero cuando este es retirado la magnetización se pierde. |

**Curva de histéresis.**

Cuando un material ferromagnético es magnetizado en una dirección, éste no volverá, a la magnetización cero cuando el campo magnetizante es removido. Debe ser llevado a cero por un campo en la dirección opuesta. Un campo magnético alterno es aplicado al material, esta magnetización trazará un punto llamado lazo de histéresis. La falta de retractabilidad es propiedad de la curva de magnetización llamada histéresis y está relacionada con la existencia del dominio magnético en el material. Una vez reorientado el dominio magnético, éste toma algo de energía y regresa a su estado original. Esta propiedad del material ferro magnético es útil en la memoria magnética. Algunas composiciones de materiales magnéticos pueden tener un magnetización impuesta indefinidamente y ser usados como "imanes permanentes". En la Figura 1 se esquematiza este comportamiento. Desde el estado desmagnetizado (1), a medida que aumenta la fuerza magnetomotriz *(fmm)* H más dominios se van agregando a la alineación paralela hasta que todos están alineados en el estado de saturación (2) donde hay un campo de inducción Bsat. Un aumento de la *fmm* no creará nuevas alineaciones.

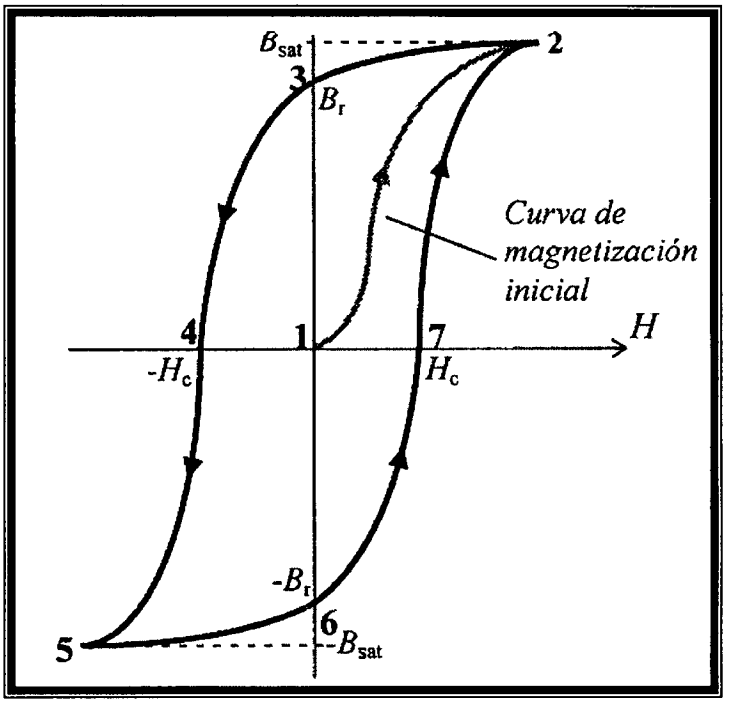



**Figura 1. Curva de histéresis**

Si, en cambio, desde el estado de saturación (2) se disminuye la intensidad de la *fmm* H, se observa que el sistema no sigue la trayectoria previa, dado que los mecanismos de alineación de dominios, los movimientos de las fronteras de dominios y la agitación térmica (*este ultimo factor tiende a un desalineamiento)* son mecanismos altamente no lineales. Cuando la *fmm* llega a cero (3), el material queda magnetizado, creando un campo de inducción residual Br (*remanencia).* Si se aumenta ahora la *fmm* en valores negativos (*o sea en el sentido opuesto de circulación de corriente al de la magnetización inicial),* el material queda efectivamente desmagnetizado al llegar al valor de coercividad –Hc (4). Si se continúa aumentando la intensidad de la *fmm*, se produce una nueva saturación en el sentido opuesto (5) y si desde allí se disminuye la intensidad de la *fmm,* las situaciones anteriores se repiten sobre una curva simétrica en los puntos (6) y (7)[10].

### 2.2.3 MATERIALES MAGNETO Y ELECTROACTIVOS

Estos materiales experimentan cambios en sus propiedades físicas ante la presencia o aplicación de un campo magnético ó eléctrico.

Los materiales de este tipo presentan la capacidad de cambiar su viscosidad aparente o sus propiedades mecánicas en presencia de un estímulo externo. Se dividen en dos categorías dependiendo de la naturaleza del estímulo, magnético o eléctrico, al cual responden mediante un cambio en sus propiedades reológicas y/o mecánicas.

Este trabajo se enfoca al desarrollo y comportamiento de materiales magnetoreológicos (**MR**) con mayor énfasis, en los fluidos magnetoreológicos[7].

### 2.2.4 FLUIDOS MAGNÉTICOS

En algunas ocasiones dentro de la literatura no se hace una distinción clara entre un ferrofluido y un fluido magnetoreológico; todos son suspensiones de partículas con propiedades magnéticas que bajo la influencia de un campo magnético, su comportamiento de flujo cambia[11].

## 2.3 GENERALIDADES DE NANOTECNOLOGÍA

La nanotecnología se ocupa de la creación de materiales, dispositivos y sistemas útiles mediante el control de la materia a escala nanométrica y la exploración de nuevos fenómenos y propiedades (físicas, químicas y biológicas) en esa escala de tamaño. Los dispositivos de tamaños menores de 100 nanómetros (nm) se consideran como productos de la nanotecnología. En la Figura 2 se aprecia la evolución de los materiales con mayor utilidad a través de los tiempos hasta llegar a la actualidad[12].

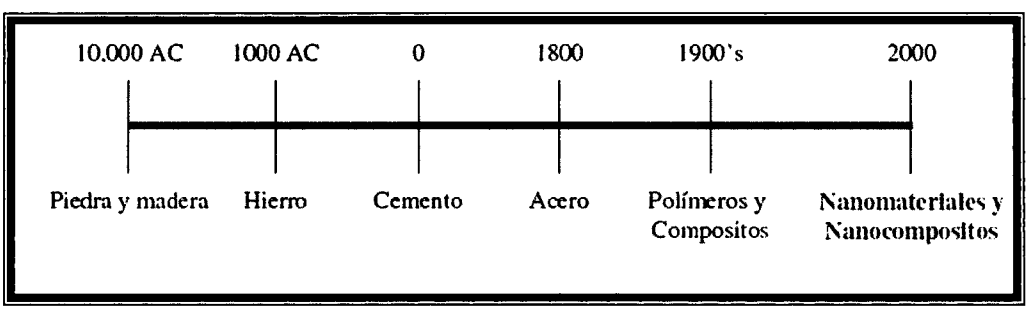



**Figura 2. Evolución de los materiales**

### 2.3.1 NANOCOMPUESTOS

Se define como un nanocompuesto polimérico a los materiales constituídos por la dispersión homogénea de partículas de relleno de dimensiones nanométricas en el interior de una matriz polimérica[13]. Como relleno se usan por lo general nanopartículas de silicato y metálicas.

Las propiedades de los materiales nanocompuestos dependen no solo de las propiedades de sus componentes individuales sino también de su morfología y de sus características interfaciales. La rápida expansión de este campo está generando muchos materiales con propiedades nuevas e interesantes. Esto último puede derivarse de la combinación de propiedades del material nanocompuesto a partir de los constituyentes del sistema[14].

En la Tabla 3 se muestran algunos ejemplos de los diferentes tipos de morfologías cada una utilizada según su aplicación para generar materiales inteligentes[15]:

**Tabla 3. Nanomateriales y Nanotecnología**

| | |
|---|---|
| Materiales nanocristalinos | Nanotubos |
| Nanopartículas | Nanohilos |
| Nanocápsulas | Nanocorreas |
| Materiales nanoporosos | Dendrimeros |
| Nanofibras | Moléculas electrónicas |
| Nanoalambres | Nanofluidos, NEMS |
| Fulerenos | |

## 2.3.2 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE PARTÍCULAS NANOMÉTRICAS (POLVOS)

Las partículas magnéticas de tamaño nanométrico están sujetas a una intensa investigación por su gran potencial de aplicaciones en el almacenaje de datos, ferrofluidos, catálisis, cintas de grabado, etc. Recientemente se han desarrollado nanocristales magnéticos con una distribución de tamaño de partícula uniforme a partir de la oxidación del óxido de hierro a altas temperaturas. Este material es obtenido en forma de pequeñas partículas con dominios simples[16]. Las propiedades de las nanopartículas magnéticas dependen de los diferentes procesos de preparación. Estas nanopartículas se pueden producir eligiendo un método apropiado en la síntesis de las mismas obteniendo un tamaño de partícula, una distribución estrecha de tamaño de partícula, alta pureza y composición adecuada.

### MÉTODO SOL-GEL

Una manera de combinar el método de sol-gel (Figura 3) que utiliza alcóxidos, el cual produce típicamente una red inorgánica, con precursores poliméricos para producir un gel híbrido es utilizar el método de Pechini, el cual está basado en la formación de complejos metálicos entre ácidos α-hidroxicarboxílicos que contienen al menos un grupo hidroxílico, por ejemplo el ácido cítrico, y cationes metálicos. Cuando los quelatos son mezclados con un alcohol polifuncional, como el etilenglicol, una reacción de poliesterificación lleva a la formación de una resina polimérica. Esta misma técnica se utilizó por otros autores como García-Cerda L.A.[17] para la obtención de partículas de ferrita de cobalto.

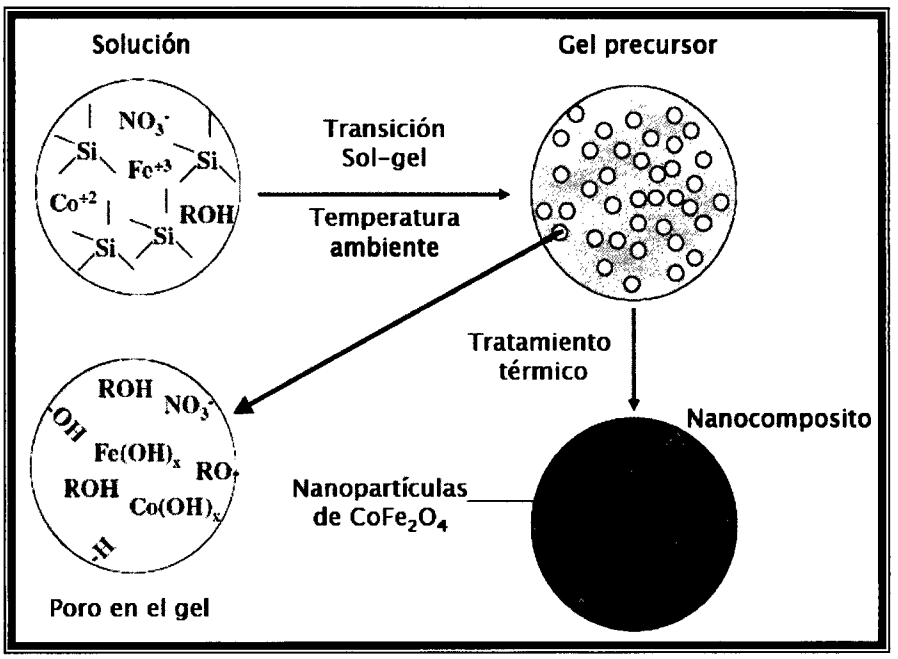



**Figura 3. Síntesis del método Pechini**

## PROCESO DE MICROEMULSIÓN

El método general de preparación de partículas por este medio consiste principalmente de la mezcla de dos microemulsiones con la misma estructura y composición. Las microemulsiones (Figura 4) son dispersiones termodinámica e isotrópicamente estables, transparentes o translúcidas, de un líquido orgánico hidrofóbico en agua. Estas dispersiones ocurren en forma espontánea al mezclar los dos líquidos con una variedad de agentes tensoactivos o surfactantes en proporciones específicas[18]. Las microemulsiones están formadas por al menos tres componentes: dos de ellos insolubles y un tercero llamado surfactante que es amfifílico (puede ser polar o no polar). Para obtener una microemulsión, es generalmente necesario utilizar un agente tensoactivo combinado con un cosurfactante, tal como un alcohol de cadena corta; sin embargo, mediante el empleo de un surfactante adecuado, es posible preparar microemulsiones ternarias en las cuales se no se tiene surfactante[19].Las microemulsiones normales (o/w) e inversas (w/o) poseen una microestructura consistente de pequeñas gotas de la fase dispersa en una fase continua, con diámetros típicos del orden de 10 nm.

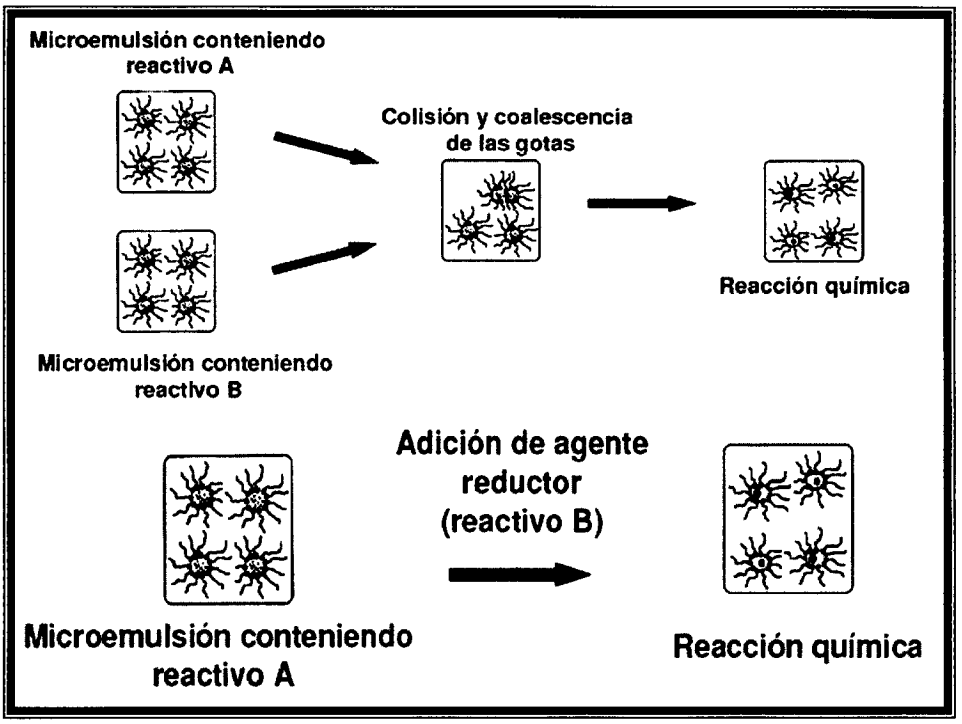



**Figura 4. Proceso de microemulsión**

## CO-PRECIPITACIÓN QUÍMICA

Este método es el más utilizado para la preparación de magnetita altamente dispersa, este método se basa en la siguiente reacción química:

$$FeCl_2 \bullet 4H_2O + 2FeCl_3 \bullet 6H_2O + 8NH_4OH \rightarrow Fe_3O_4 \downarrow + 8NH_4Cl + 20H_2O$$

El método de co-precipitación química (Figura 5) consiste en mezclar soluciones diluidas de $FeCl_2 \bullet 4H_2O$ y $FeCl_3 \bullet 6H_2O$ a 70 °C y, manteniendo una agitación constante, se adiciona una solución en exceso de $NH_4OH$ al 10%. Para obtener un precipitado altamente disperso es preciso limitar el crecimiento de las partículas mediante una agitación intensa de la solución. La sal de amonio $NH_4Cl$, que se forma durante la reacción se descompone fácilmente con la emisión de $NH_3$ gaseoso. Los iones $Cl^-$ y los residuos de las sales disueltas se eliminan del precipitado mediante lavados múltiples, lo cual evita la coagulación de las partículas de magnetita y asegura la interacción de las moléculas del estabilizador con las partículas de magnetita. Una particularidad del proceso es el requerimiento de un 1.5 % de exceso de sal de álcalis, pues sólo

en este caso la reacción de co-precipitación ocurre completamente. Así, la co-precipitación química de magnetita altamente dispersa consiste en la neutralización rápida, durante el calentamiento y la agitación constante, de las sales de hierro di- y tri-valentes por un exceso de solución acuosa de hidróxido de amonio. El precipitado que se forma durante la reacción consiste de partículas de magnetita con tamaños desde 2 hasta 20 nm, y un tamaño de partícula medio de 7 nm. Las propiedades magnéticas de esas partículas son parecidas a las propiedades magnéticas de los monocristales de magnetita $FeO \bullet Fe_2O_3$; la superficie de las partículas posee una buena capacidad de absorción, lo cual es importante para asegurar su estabilidad[20].

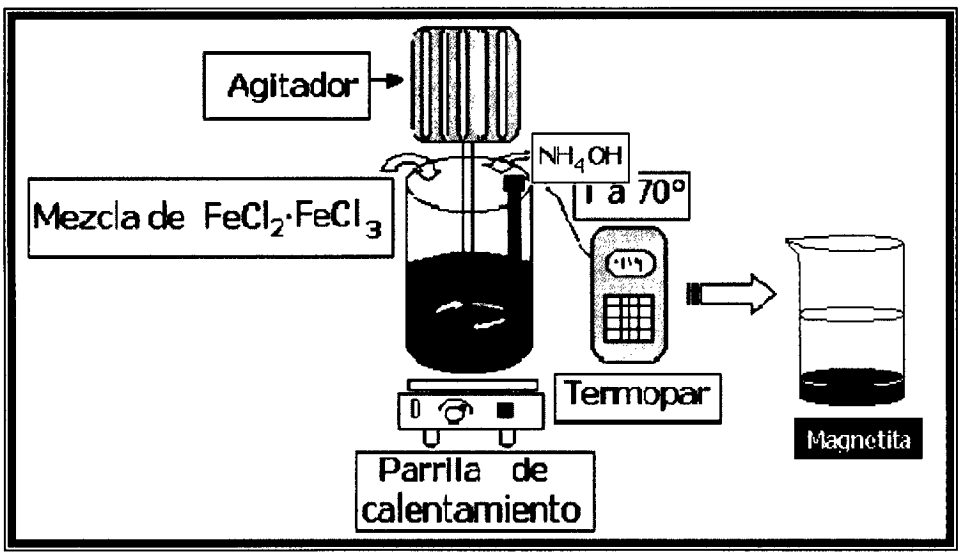



**Figura 5. Método de co-precipitación**

## 2.4 FERROFLUIDO (FF)

Los ferrofluidos son sistemas coloidales de nanopartículas magnéticas monodominio que se encuentran dispersas en líquidos acuosos u orgánicos (líquido portador). Las partículas tienen un tamaño promedio entre 5 – 15 nm y son mantenidas en la solución utilizando ciertos estabilizadores para mantener su estabilidad individual y prevenir su coagulación. Estas partículas son recubiertas con el agente estabilizador, la cual previene la aglomeración aún cuando se aplique un campo magnético intenso al ferrofluido. La estabilidad coloidal y térmica, importante en muchas aplicaciones, es ampliamente influenciada por el tipo de estabilizador. Un ferrofluido típico puede contener 5% en volumen de partículas sólidas magnéticas, 10% de

surfactante y 85% de líquido portador. En la ausencia de un campo magnético, los momentos magnéticos de las partículas están distribuidos al azar. Cuando un campo magnético es aplicado al ferrofluido, los momentos magnéticos de las partículas se orientan a lo largo de las líneas de campo casi instantáneamente y cuando éste es removido, los momentos se distribuyen al azar nuevamente en forma inmediata. En un campo, todo el fluido responde como un líquido magnético homogéneo, el cual se mueve a la región de mayor intensidad del campo magnético. Esto significa que los ferrofluidos pueden ser posicionados y controlados con precisión mediante un campo magnético externo[11].

### 2.4.1 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE FERROFLUIDOS

#### PEPTIZACIÓN QUÍMICA

La preparación de los ferrofluidos se puede realizar a partir del precipitado de magnetita le cual se obtiene por el método de co-precipitación química y enseguida utilizando la técnica de peptización química la cual consiste en transferir las partículas de una fase acuosa a una fase orgánica que contiene un agente estabilizante, debido a que mediante éste es posible evitar la aglomeración de las partículas; los grupos funcionales actúan con las partículas formando una capa monomolecular y la parte de cadena larga del mismo debe de ser compatible con el líquido portador para participar en el movimiento térmico y evitar así la aglomeración de las partículas[21].

#### TRITURACION

Se efectúa a partir de la trituración de partículas de magnetita en un molino de bolas, en presencia de ácido oleico. Las partículas de dimensiones coloidales se forman en el molino como resultado de la trituración de las partículas magnéticas mediante bolas de acero que ruedan dentro de un cilindro horizontal que gira. La trituración en presencia del líquido portador y del estabilizador permite obtener partículas suficientemente pequeñas y garantizar a la vez la estabilidad coloidal del sistema. Este método permite alcanzar el grado necesario de dispersión de las partículas según sea la duración de la molienda[22]. La trituración de la magnetita en seco la máxima reducción que se logra es de tamaños de partícula $\approx$ 60 nm.

### 2.4.2 PROPIEDADES Y APLICACIONES DE LOS FERROFLUIDOS

Las propiedades de los ferrofluidos dependerán de la composición, concentración de nanopartículas, viscosidad, densidad, tamaño de partícula, así como de los factores que involucra la técnica de preparación de estos fluidos[18].

Los ferrofluidos presentan un comportamiento superparamagnético; lo que significa que cada una de las partículas presenta un momento magnético. En la ausencia de un campo magnético aplicado, las partículas se encuentran orientadas al azar y el fluido no presenta una magnetización[19]. Conforme el campo se incrementa, las partículas tienden a alinearse con la dirección del campo. A muy altas intensidades de campo las partículas pueden encontrarse completamente alineadas y la magnetización alcanza su valor de saturación[23].

Los ferrofluidos forman parte de una nueva clase de materiales magnéticos. Estos consisten en nanopartículas magnéticas coloidales dispersas y estabilizadas en un líquido portador que presentan propiedades de flujo y magnéticas, por lo que son de gran importancia tecnológica. Actualmente, entre sus aplicaciones se pueden mencionar algunas como sellos magnéticos en motores, lubricantes en discos magnéticos e instrumentos para memoria óptica. Otras aplicaciones son en instrumentos magnéticos como bocinas, tintas magnéticas para cheques bancarios, unidades de refrigeración magnética, etc.

Los ferrofluidos también tienen aplicaciones en medicina como por ejemplo, liberación controlada de medicamentos, para restringir el flujo sanguíneo en determinadas partes del cuerpo y donde actúan como material opaco para el diagnóstico de imágenes usando rayos X o resonancia magnética nuclear. En la Figura 6 se muestra un fluido magnético de $Fe_3O_4$, bajo la aplicación de un campo magnético[5].

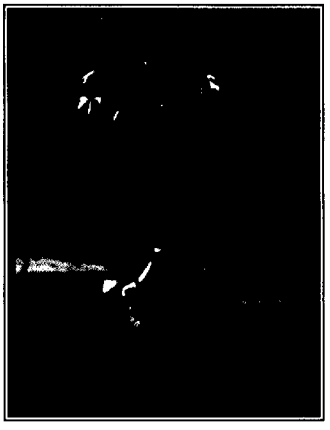


**Figura 6. Ejemplo de un ferrofluido de magnetita**

## 2.5 FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS

Por otra parte, los fluidos magnetoreológicos (MRF) son suspensiones de partículas de mayor tamaño, uno a tres órdenes de magnitud mayores que las partículas coloidales de un ferrofluido, en un líquido portador. Las partículas que constituyen un fluido magnetoreológico contienen cientos de dominios magnéticos. Estos fluidos muestran cambios dramáticos en su comportamiento reológico en respuesta a la aplicación de un campo magnético externo.

Estos fueron reportados por primera vez por J. Rabinow en 1948. Esta clase de fluidos responden con un cambio en su comportamiento reológico de manera instantánea, casi completamente reversible, al momento de ser sometidos a la acción de un campo magnético. Normalmente, este cambio se manifiesta mediante una resistencia al flujo generada de forma proporcional a la intensidad del campo aplicado[25]. Comúnmente los MRF presentan apariencia de aceites sin la aplicación de un campo, pero en presencia de un campo incrementan su viscosidad en varios órdenes de magnitud[26].

Un fluido magnetoreológico se compone de un 20 - 40 % en volumen de partículas de hierro relativamente pura de 3 - 10 micrones de diámetro suspendidas en un líquido portador como el aceite mineral, aceite sintético, el agua o glicol. Así como, una variedad de aditivos[28], similares a los lubricantes para promover la suspensión de las partículas (Figura 7) y formar una solución estable. Las partículas de hierro añaden un límite elástico a los MRF en presencia de un campo magnético, al cambiar de estado líquido a un estado semi-sólido[27].

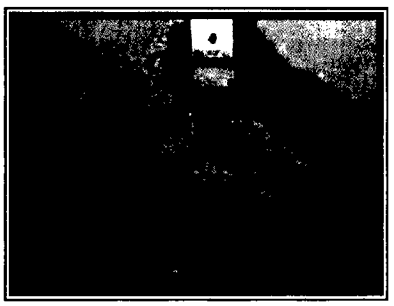


**Figura 7. Solución estable de un fluido MRF**

A diferencia de los ferrofluidos, los materiales magnetoreológicos consisten de partículas magnéticas permeables de tamaño micrométrico, típicamente entre 3 y 5 micrones e igualmente suspendidas en un medio no magnético. Como ya se ha mencionado, con la aplicación de un campo magnético, las propiedades reológicas de estos materiales son alteradas rápida y reversiblemente. El mecanismo responsable de este efecto es la interacción magnética inducida en las partículas metálicas dentro de la matriz. En el caso de fluidos magnetoreológicos, esta interacción mutua de las partículas causa la formación de estructuras en forma de cadenas, alineadas paralelamente al campo magnético aplicado. La rigidez de esta estructura dependerá de varios factores, incluyendo la intensidad y distribución del campo magnético. Un determinado esfuerzo puede dar lugar al rompimiento de esta estructura en forma de cadenas; así, los fluidos magnetoreológicos presentan el comportamiento típico de un plástico de Bingham, en donde existe un esfuerzo de cedencia (Yield Point). Esta es la diferencia más marcada entre un ferrofluido y un fluido magnetoreológico, lo que permite a estos últimos ser utilizados para diferentes aplicaciones. Para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, el modelo de un plástico de Bingham describe de manera efectiva las características esenciales, dependientes del campo, de un fluido magnetoreológico[28].

Con la aplicación de un campo magnético las partículas metálicas se orientan en dirección al campo magnético, como ya se ha mencionado, para formar una estructura de cadenas como se esquematiza en la Figura 8. El efecto magnetoreológico se produce debido a la resistencia a fluir causada por este cambio de estructura[29].

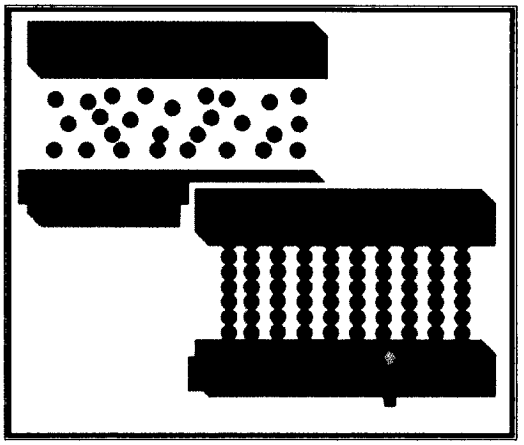


**Figura 8. Comportamiento de un MRF sin y con la aplicación de un campo magnético.**

La Figura 9 muestra la relación típica entre el esfuerzo y la velocidad de corte de un fluido Bingham comparando ésta con un fluido newtoniano. Cuando un campo magnético no está presente el fluido MR se comporta como un fluido newtoniano; es decir, el esfuerzo es directamente proporcional a la velocidad de corte. Cuando un campo magnético está presente, el fluido MR muestra, como ya se ha mencionado, el comportamiento característico de un fluido de Bingham, es decir muestra un esfuerzo de cedencia[30].

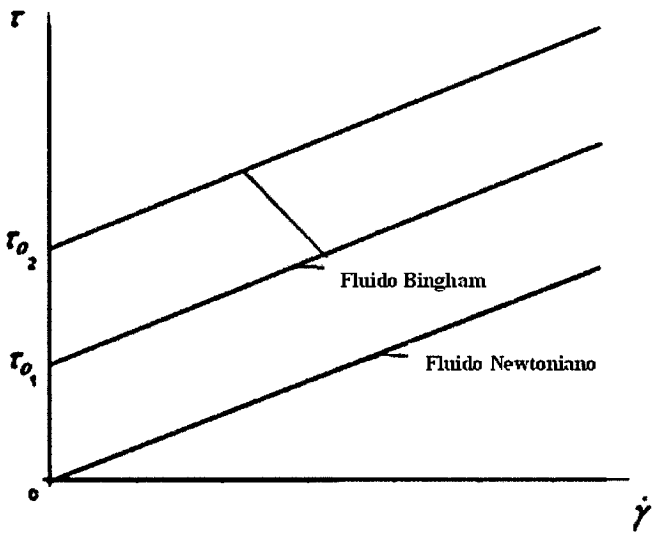



**Figura 9. El esfuerzo de corte ($\tau$) contra velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) de un fluido newtoniano y un fluido magnetoreológico con diferente intensidad de campo**

A velocidad de corte cero existe cierta resistencia a fluir. El esfuerzo provoca una deformación, pero no hay un movimiento continuo. Bajo esta condición, el esfuerzo máximo que puede ser aplicado sin que ocurra movimiento, es el esfuerzo de cedencia ($\tau_0$) y éste es una función del campo magnético aplicado. Para un fluido MR el esfuerzo de cedencia puede ser controlado, aumentando o disminuyendo la intensidad del campo magnético aplicado.

### 2.5.1 COMPOSICIÓN DE LOS FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS

En un fluido magnetoreológico su comportamiento reológico cambia reversiblemente del estado líquido al sólido y éste depende de la intensidad del campo magnético aplicado. Normalmente, en todo fluido la propiedad reológica de viscosidad o resistencia al flujo cambia con otros factores, tales como la composición química, el esfuerzo de corte y la temperatura. Estos parámetros no siempre son fáciles de controlar en muchas aplicaciones ya que están en función de cada situación particular. Se sabe que la viscosidad cambia con la temperatura, la cual no siempre es fácil su control. En el caso de los MRF su viscosidad puede ser controlada en función de la aplicación de un campo magnético. El efecto magnetoreológico obtenido es, como ya lo hemos mencionado, un cambio en las propiedades reológicas del fluido cuando se aplica o no un campo magnético. Los principales componentes (Figura 13) de un fluido MR son: Un líquido portador (fluido base), partículas magnéticas y aditivos como estabilizadores y surfactantes[31].

#### EL LÍQUIDO PORTADOR

También conocido como fluido base; su función principal es de transporte. Para lograr el mayor efecto magnetoreológico, la viscosidad de este fluido debe ser baja y casi independiente de la temperatura y del esfuerzo de corte. Básicamente, sin la aplicación de un campo magnético los fluidos magnetoreológicos se comportan como el fluido base, es decir, de acuerdo a su composición química. Los líquidos comúnmente utilizados como fluidos base o líquidos portadores son aceites minerales, compuestos silico-orgánicos, hidrocarburos, agua, etc. Como con cualquier tipo de partículas suspendidas en un fluido, el fluido base tendrá una mayor viscosidad cuando la concentración de partículas metálicas es muy alta. Es decir, el fluido será más espeso aún sin campo magnético[32].

## PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Las partículas magnéticas son usualmente de hierro carbonilo, polvos de hierro o aleaciones de hierro/cobalto para lograr una alta saturación magnética. La cantidad de polvos metálicos en el MRF pueden ser de hasta un 50 % en volumen. El tamaño de partícula se encuentra, normalmente, en el intervalo de micrómetros y varía dependiendo del proceso de elaboración.

Una de las características de estas partículas magnetizables es que pueden ser de forma irregular; esféricas, aciculares, en forma de agujas o combinación entre ellas. Se prefieren las esféricas ya que se busca un alto grado de acomodo al momento de someter el MFR a la acción del campo magnético[8]. Por otra parte, una combinación de partículas en forma de agujas con tamaño relativamente mayor, mejora notablemente la estabilidad del fluido e incrementa la vicosidad bajo la acción de un campo. El tamaño de estas partículas metálicas puede seleccionarse según la aplicación que se pretenda, para el caso de las partículas de hierro el intervalo de estas se encuentra entre 1 – 10 μm.

## ADITIVOS

Los aditivos pueden ser estabilizadores y surfactantes; así como, agentes de suspensión, modificadores de fricción (lubricantes) y componentes anticorrosivos o antidesgaste. Los materiales de alta viscosidad como por ejemplo, los lubricantes son usados para mejorar la estabilidad del fluido. Los aditivos se requieren para controlar la viscosidad del líquido y la velocidad de sedimentación o precipitación de las partículas metálicas; así como, para evitar la aglomeración de estas partículas durante su uso.

Los componentes de los fluidos magnetoreológicos que son: el líquido portador, las partículas magnéticas y el estabilizador (Figura 10); contribuyen para definir el comportamiento magnetoreológico del fluido magnetoreológico. La densidad va a depender de la formulación y puede ser de aproximadamente de 3-4 g/cm$^3$ . El cambio de alguno de los componentes del fluido dará lugar a cambios reológicos en éste tanto con o sin la aplicación de un campo magnético[33].

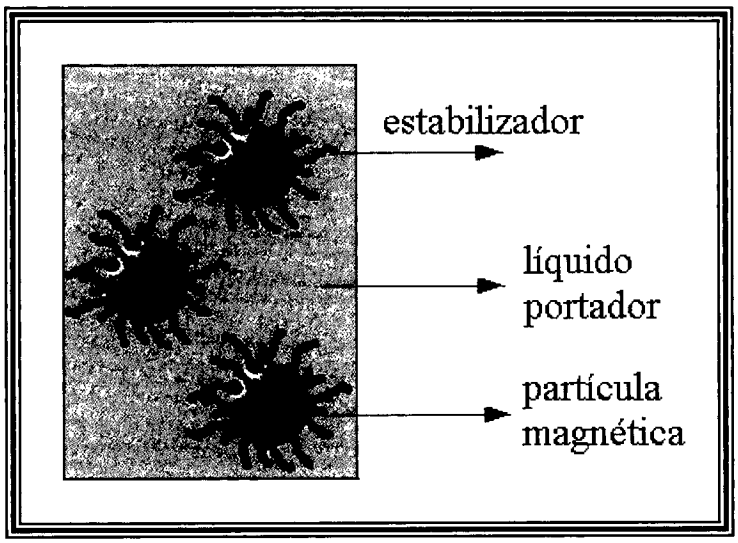



**Figura 10. Composición de un fluido magnético típico**

## REOLOGIA DE LOS FLUIDOS

La palabra *Reología* introducida por Eugen Bingham en 1929, se refiere al estudio de la deformación y el flujo de la materia. Por otra parte, la Real Academia Española define la reología como: *el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluido.*

Una definición más moderna expresa que la **reología** es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir[34]. Las propiedades estudiadas por la reología se pueden medir mediante reómetros, aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte)
- Coeficientes de esfuerzos normales
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio)
- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdida (comportamiento viscoelástico lineal)
- Funciones complejas de viscoelasticidad no lineal

Los estudios teóricos en reología en ocasiones emplean modelos microscópicos para explicar el comportamiento de un material. En el estudio de polímeros, éstos se pueden representar como cadenas de esferas conectadas mediante enlaces rígidos o elásticos.

La *Reometría por su cuenta viene de la palabra griega* rheos *que significa flujo y* metro que significa medida *y se refiere a las técnicas experimentales utilizadas para determinar las propiedades reológicas de los materiales.*

La elección de la técnica experimental adecuada para el estudio de propiedades de flujo depende de las propiedades reológicas que se requiere determinar. Estas pueden ser el esfuerzo de corte, la viscosidad, las propiedades viscoelásticas lineales (módulos, viscosidad compleja, módulo de elasticidad), etc. La reometría oscilatoria bajo un determinado campo es una técnica de medición muy utilizada para caracterizar los fluidos inteligentes, como fluidos magnetoreológicos y electroreológicos ya que es el principal método para cuantificar las propiedades reológicas útiles de estos materiales[34].

### 2.5.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS Y MAGNÉTICAS DE LOS FLUIDOS MRF

Las propiedades reológicas de los fluidos magnetoreológicos son dependientes de la concentración y densidad de las partículas, de la distribución de forma y tamaño de las partículas, de las propiedades del fluido portador, de los aditivos adicionales, del campo aplicado, de la temperatura y de otros factores controlables. Todo esto es importante en el establecimiento de metodologías para optimizar el desempeño de estos fluidos para aplicaciones particulares.

La siguiente Figura 11 muestra el esfuerzo de corte, a una determinada velocidad de corte baja, para cuatro fluidos magnetoreológicos en función de la densidad de flujo magnético. A esta velocidad de corte baja, los datos de esfuerzos de corte son aproximadamente equivalentes a los esfuerzos de cedencia.

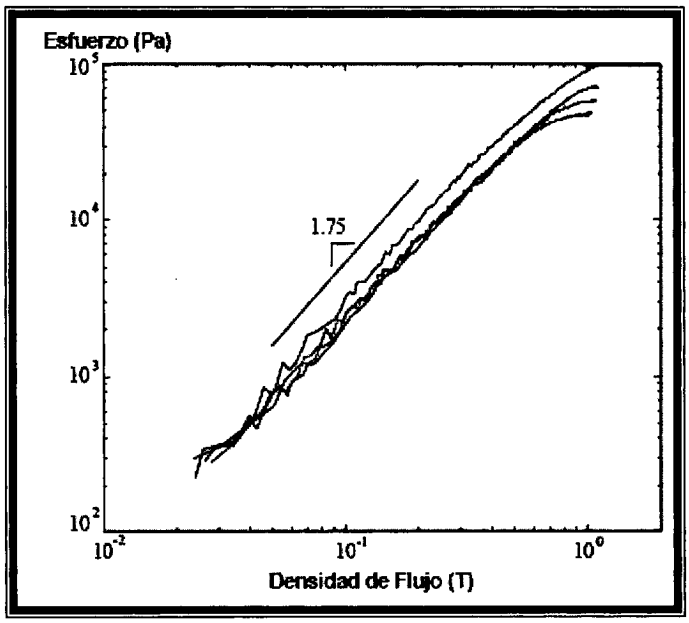



**Figura 11. Esfuerzo de corte en función de la densidad de flujo magnético a una velocidad de corte constante máxima de 26 $s^{-1}$. El orden ascendente de los registros corresponden a un incremento en la fracción de volumen de partículas de hierro.**

En todas las formulaciones de fluidos magnetoreológicos para una aplicación específica, la viscosidad del fluido en ausencia de un campo magnético es predominantemente una función del líquido portador, de los agentes estabilizantes y de la carga de partículas magnéticas[35].

En un fluido magnetoreológico las propiedades magnéticas, así como las reológicas son de gran importancia para las áreas tecnológicas y de investigación científica. Las propiedades magnéticas normalmente se caracterizan mediante gráficas de M-H o B-H donde H es el campo aplicado, M es la magnetización y B es la densidad de flujo magnético. Estas nos proporcionan información sobre la respuesta de estos fluidos al campo aplicado así como nos da información sobre los procesos de magnetización en éstos. Las propiedades magnéticas de estos materiales normalmente se determinan mediante magnetometría de muestra vibrante (VSM). La comprensión de las propiedades magnéticas de los fluidos magnetoreológicos es importante para el diseño de dispositivos basados en estos fluidos. En muchos dispositivos, el fluido representa la mayor respuesta magnética dentro del circuito.

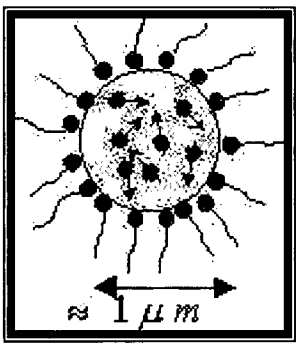



**Figura 12. Momentos dipolares en una partícula magnética.**

Bajo la acción de un campo magnético constante las partículas adquieren un momento dipolar que genera una fuerza atractiva entre las partículas (Figura 12), la cual produce la agregación de las partículas en forma de collares de cuentas alineados con el campo magnético como se muestra en la Figura 13:

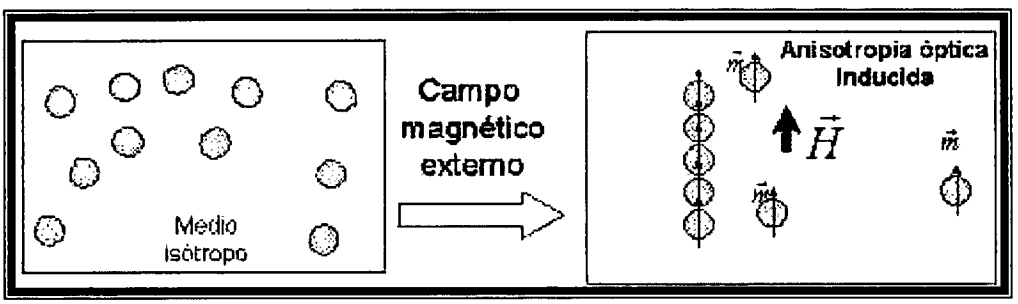



**Figura 13. Alineación de partículas por efecto del campo magnético.**

La formación de estos agregados cambia drásticamente las propiedades mecánicas y reológicas de las suspensiones y es la base de las múltiples aplicaciones prácticas de estos fluidos[36].

## COMPARACIÓN DE UN FERROFLUIDO VS FLUIDO MAGNETOREOLÓGICO

Es importante señalar la diferencia entre un ferrofluido y un fluido magnetoreológico. Como se puede ver en la Tabla 4; los ferrofluidos (FF o fluidos magnéticos) y los fluidos magnetoreológicos (MR) son muy similares, debido a que ambos contienen partículas metálicas de hierro, líquidos portadores y aditivos parecidos. En el caso de los fluidos magnetoreológicos las partículas magnéticas son de tamaños mayores de 1 μm, en comparación con los ferrofluidos con tamaños de partícula menores a 30 nm. Cuando se aplica un campo magnético a los fluidos MRF hay un cambio de líquido a semi-sólido; mientras que el efecto en los FF entre mayor campo magnético se vuelve más fluido. El hierro que contienen los fluidos MRF son capaces de desarrollar esfuerzos de 100 kPa mientras las partículas de FF sólo hasta 10 kPa. La viscosidad depende del campo magnético para MRF, mientras que para los FF esta dependencia es un efecto secundario. El efecto principal en los FF es su orientación hacia la intensidad del campo magnético aplicado; son también sumamente estables debido al tamaño de sus partículas[37].

**Tabla 4. Comparación entre MRF y FF**

| Aspectos importantes | MRF | FF |
|---|---|---|
| Factor de energía λ | >1 | <1 |
| Esfuerzo máximo aplicado | 100 kPa | 10 kPa |
| Tamaño de partícula | Algunas μm | Algunos nm |
| Partículas de material | Carbonil hierro | Oxido de hierro |
| Fracción volumen | Hasta un 50% | Hasta un 10% |
| Estabilidad | Media | Buena |
| Funcionalidad | Esfuerzos de corte controlables | Flujo es controlable |

## 2.6 FLUIDOS ELECTROREOLÓGICOS

Como se ha mencionado previamente dentro de la clasificación de materiales inteligentes podemos encontrar fluidos magnetoreológicos, los cuales han sido ya descritos ampliamente en este trabajo. Sin embargo, no podemos dejar de mencionar los fluidos electroreológicos, ya que tienen un comportamiento muy similar a los fluidos MR. A continuación se describe de forma muy concisa este tipo de materiales y se compara su comportamiento con los fluidos magnetoreológicos, los cuales han sido el objeto abordado en este caso de estudio.

Los fluidos electroreológicos (ERF) son suspensiones de partículas dieléctricas dispersas en un fluido de naturaleza oleosa (Figura 14). Bajo la influencia de un campo eléctrico extremo las partículas se polarizan e interactúan para formar cadenas o estructuras fibrosas, con lo cual se origina un cambio drástico en las propiedades reológicas de la suspensión, la cual puede incrementar su viscosidad hasta en un factor de $10^5$. Lo anterior representa una transición del sistema desde un estado prácticamente líquido a un estado semi-sólido. Este cambio de viscosidad es reversible, por lo que el fluido electroreológico puede volver a su estado original una vez que se retira el campo eléctrico. Estos fluidos electroreológicos suelen clasificarse en dos tipos, uno correspondiente a:

1) Fluidos formados por partículas dispersas:

Se acepta que el origen de la respuesta electroreológica es debido a la agregación de las partículas en suspensión provocada por la polarización de éstas.

2) Fluidos homogéneos:

Se comportan de igual manera que los anteriores pero, gracias a la ausencia de un campo magnético, las partículas pueden llegar a ser de gran utilidad para la microtecnología, permitiendo mayores miniaturizaciones[38].

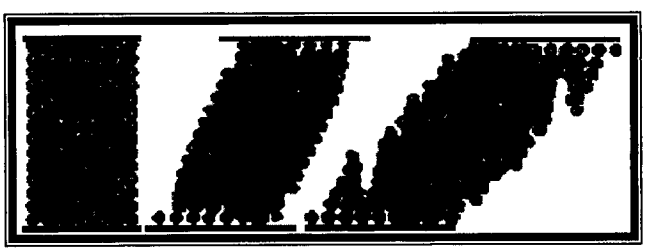


**Figura 14. Efecto del campo eléctrico aplicado a los fluidos elesctroreológicos**

## DIFERENCIAS ENTRE LOS FLUIDOS MRF y ERF

Los fluidos electroreológicos presentan las siguientes características en cuanto a los fluidos magnetoreológicos estos son de 20 - 50 veces más fuertes, son significativamente menos sensibles a los contaminantes y a cambios de temperatura extremos. En la Tabla 5 se muestra un resumen de las diferencia de los fluidos magnetoreológicos en comparación a los fluidos electroreológicos[31].

**Tabla 5. Comparación entre fluidos MR y ER**

| Aspectos Importantes | MRF | ERF |
|---|---|---|
| Esfuerzo de cedencia máximo | 50-100 kPa | 2-5 kPa |
| Intensidad de corriente eléctrica | 2-24 V @ 1-2 A | 2-5 kV @ 1-10 mA |
| Tiempo de respuesta | Algunos milisegundos | Algunos milisegundos |
| Campo operativo | ~ 250 kA/m | ~ 4 kV/mm |
| Densidad de enegía | 0.1 J/cm$^3$ | 0.001 J/cm$^3$ |
| Estabilidad ante impurezas | Buena | Pobre |
| Temperatura de operación | -40 °C hasta 150 °C | -25 °C hasta 125 °C |

## 2.7 ELASTÓMEROS MAGNETOREOLÓGICOS

Por otra parte, se han desarrollado también elastómeros magnetoreológicos (MREs) los cuales responden a la aplicación de campos magnéticos externos[39]. Estos materiales se forman embebiendo partículas magnéticas en sólidos viscoelásticos o en precursores elastoméricos líquidos. Esta clase de materiales compuestos muestran una combinación de buena controlabilidad magnética y propiedades elásticas. Estos sólidos magnetoreológicos consisten en una matriz polimérica sólida en la que se dispersan las partículas férricas, estas pueden ser materiales elastoméricos o espumas. Esta matriz debe presentar un módulo de Young bajo ya que, de este modo, al ser un material flexible permite cierto movimiento de las partículas férricas llegando a producirse alineamientos de las mismas y así aumentar su resistencia ante los esfuerzos de corte o la compresión. Los elastómeros magnetoreológicos (MREs) son compositos viscoelásticos constituidos de un material elastomérico convencional relleno con hierro u otro tipo de partículas magnetizables. En este caso, mediante el entrecruzamiento químico del

elastómero, en presencia de un campo magnético, se forma una estructura de partículas alineadas como cadenas debido a las interacciones inducidas por el campo. El uso de matrices entrecruzadas permite utilizar partículas mas grandes que en las matrices líquidas y cuando se utilizan estas partículas el alinamiento de ellas no es tan necesario para obtener un efecto magnetoreológico importante. El material muestra una dependencia de sus propiedades mecánicas, como el módulo, con la intensidad de campo. Es decir, presenta propiedades magnéticas y mecánicas anisotrópicas (propiedades diferentes en dirección longitudinal y transversal) lo cual permite la construcción de componentes elastoméricos controlables[40].

## 2.8 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES MAGNETOREOLOGICOS

A continuación se resumen las diferentes técnicas experimentales que se utilizan normalmente para la caracterización de estos materiales.

### DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

La difracción de rayos-X es una técnica que nos permite estudiar la disposición de los átomos o moléculas por medio de la interacción de la radiación electromagnética para producir efectos de interferencia con estructuras comparables en tamaño a la longitud de la radiación[41]. En la Figura 18 se presenta el difractograma de rayos X de un ferrofluido, se observa que la estructura cristalina corresponde a la fase de magnetita, ya que los picos característicos localizados en 18, 30, 36, 44, 53, 58, 63 , 73 grados (2θ), están en concordancia con las barras mostradas en la Figura 15, tomadas a partir de un estándar de magnetita[42].

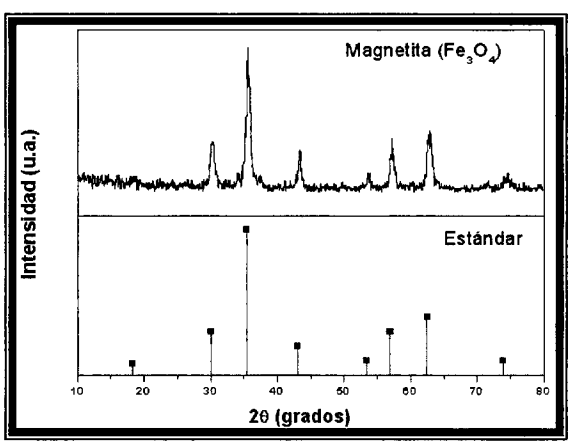



**Figura 15. Espectro DRX de los polvos de magnetita**

## MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, el cual proporciona información morfológica del material analizado. Las principales utilidades del SEM son la alta resolución (~100 Å), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras[43]. En la Figura 16 se muestra una micrografía de una muestra de polvos de hierro carbonilo obtenidas por Genc [44] y et. al:

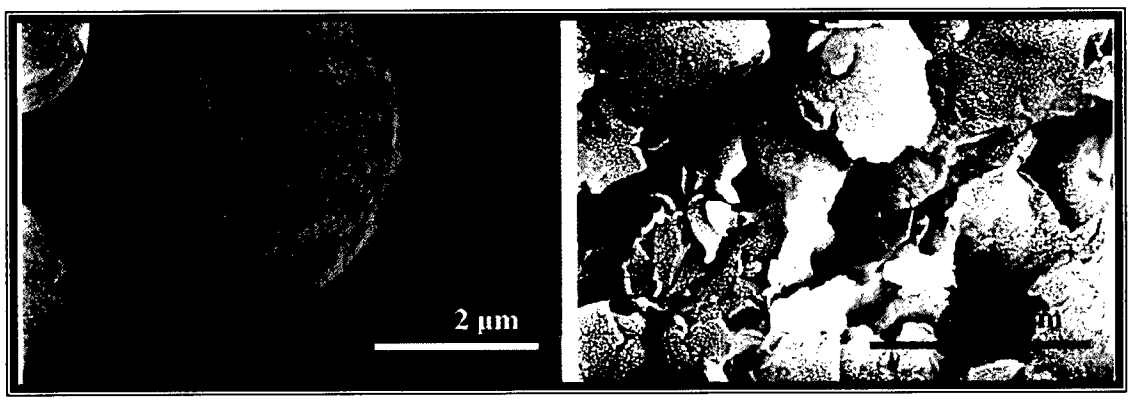



**Figura 16. Micrografías tomadas en el SEM (x20k) de partículas de hierro carbonilo recubiertas de organoarcillas**

## MICROSCOPÍA ELÉCTRONICA DE TRANSMISIÓN (TEM)

La técnica TEM en el estudio de los fluidos magnetoreológicos es similar a la del SEM. Sin embargo el TEM proporciona información de la estructura interna de secciones relativamente más pequeñas a 100 nm. También se puede estudiar en las muestras defectos planares[45]. En la Figura 16 se muestra un análisis por TEM de las partículas de magnetita; a partir de la adición de un metal como precursor (sales metálicas o metales alcoxidos) por un proceso sol-gel. Este método facilitó la inducción del óxido de silicio con una alta carga de el oxido metálico[46]. Sin embargo las partículas son principalmente incrustadas en las paredes de la sílice, como se muestra en la Figura 17:

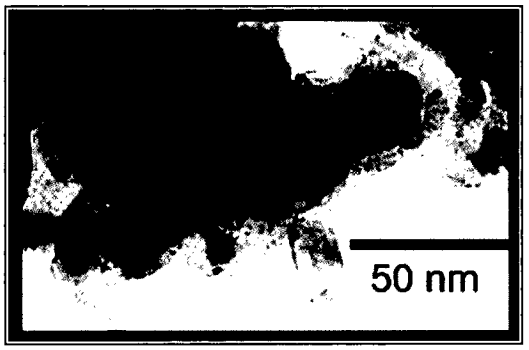



**Figura 17. Micrografía de TEM para la muestra tratada a 900 °C por 2 h.**

## MAGNETOMETRÍA DE MUESTRA VIBRANTE (VSM)

La técnica de magnetometría aprovecha la propiedad que poseen algunos materiales de adquirir un momento magnético neto; permitiendo conocer las propiedades magnéticas de un material como son la magnetización de saturación (Ms) y la magnetización de remanencia (Mr).

La Figura 18 muestra la curva de magnetización para polvos de magnetita; su comportamiento magnético corresponde al tipo de materiales superparamagnéticos, ya que no muestra curva de histéresis lo que nos dice que son materiales magnéticamente suaves, es decir se desmagnetiza al retirar el campo magnético[47].

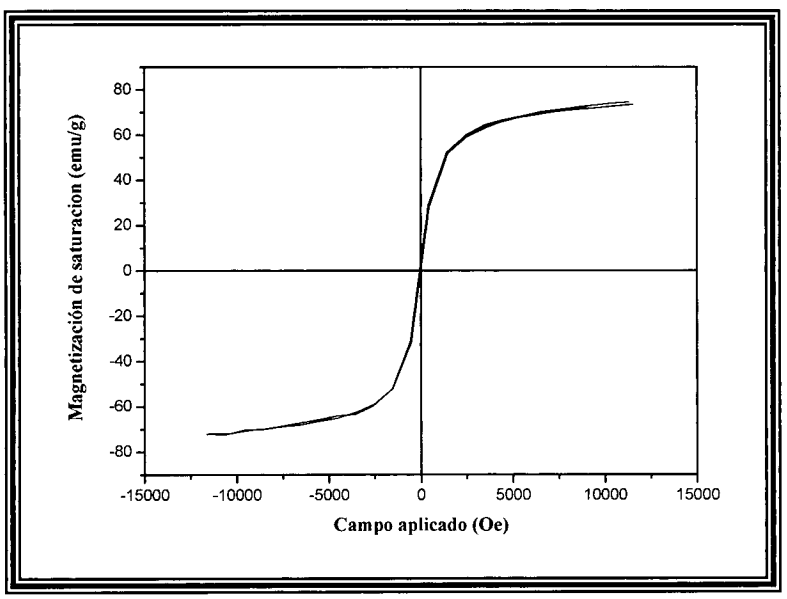



**Figura 18. Curvas de magnetización de materiales superparamagnéticos (magnetita).**

## REOMETRÍA OSCILATORIA

La reometría oscilatoria (Figura 19) se lleva a cabo utilizando una celda magnética con una geometría de cono-plato o platos paralelos, en donde uno de los platos está rotando, se utiliza para medir el flujo de materiales viscoelásticos.

Las principales ventajas de esta geometría es que la limpieza y la carga son fáciles y la velocidad de corte es uniforme, por lo tanto el esfuerzo de corte y la viscosidad estarán en función de la velocidad de corte[48].

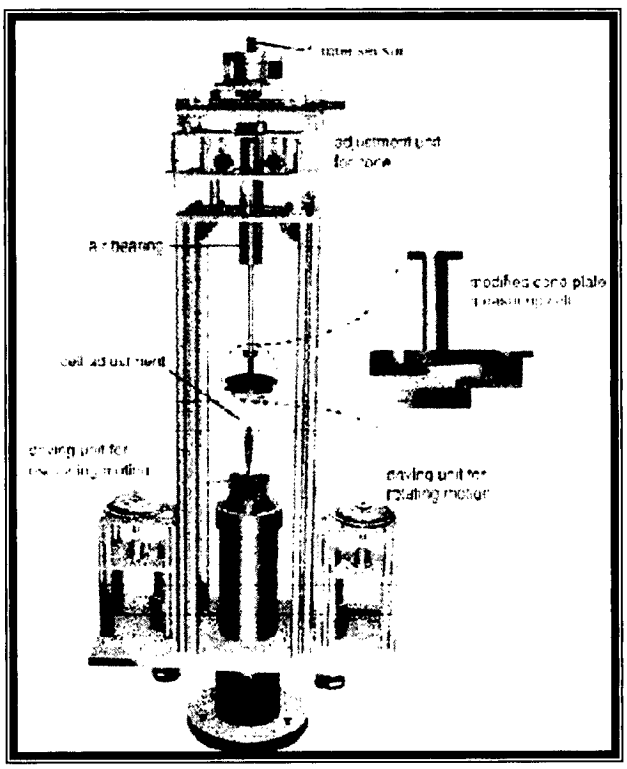


**Figura 19. Funcionamiento de un reómetro cono-plato**

En la Figura 20 se muestra un ejemplo del comportamiento reológico de un material magnetoreológico, evaluado con y sin la aplicación de un campo magnético[49]:

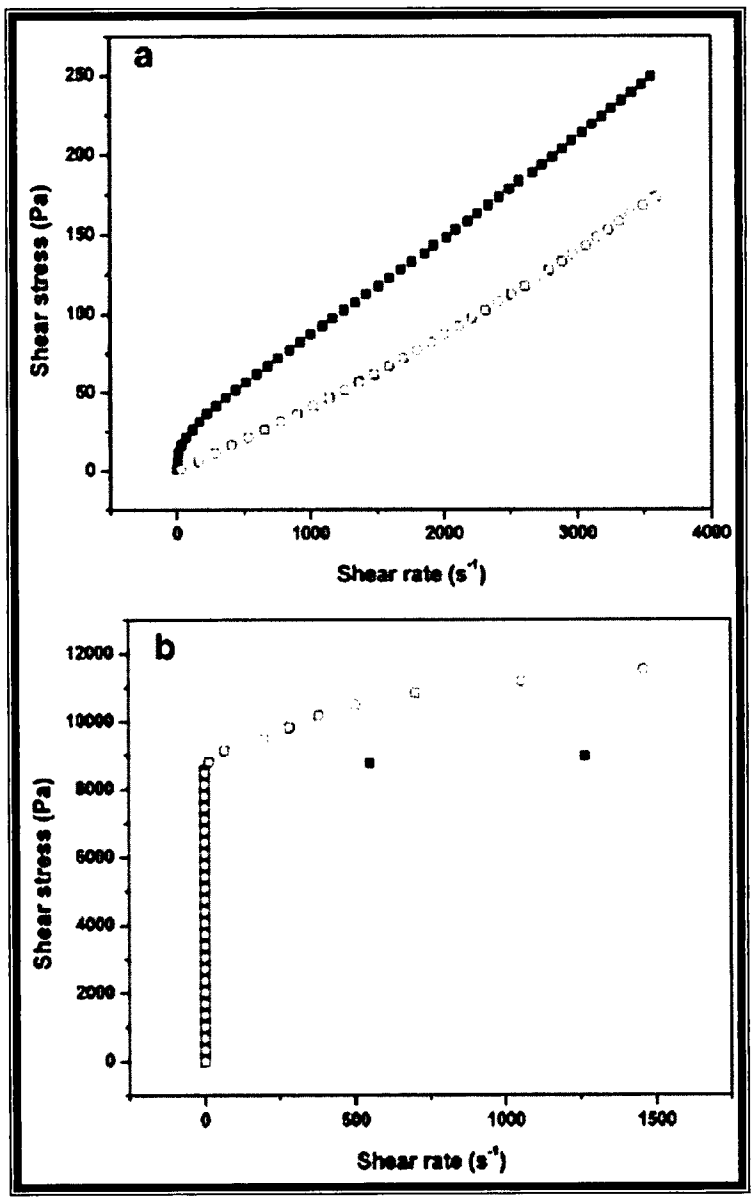



**Figura 20. El esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte, la suspensión contiene 10 % en volumen de partículas de hierro a diferentes concentraciones, a) sin campo magnético b) con campo aplicado.**

# CAPITULO 3: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

En este capítulo se presentará de forma resumida la información más reciente sobre la preparación de materiales magnetoreológicos.

## FLUIDOS MAGNETOREOLOGICOS

En un artículo reciente (López[50], et. al. 2008) obtuvieron MRF por medio de la dispersión de arcillas en un disolvente de baja polaridad. Las dispersiones se prepararon mezclando mecánicamente, durante 5 minutos el keroseno y la arcilla. Esto garantiza una dispersión homogénea de las partículas de arcilla en el keroseno. Después, los polvos de hierro se agregaron a las dispersiones de arcilla en keroseno, la mezcla resultante se agitó mecánicamente por 5 min. Enseguida, las muestras se sometieron a un sonificador Branson (modelo 450) para garantizar la homogeneidad final requerida. El propósito de este trabajo fue mejorar la estabilidad del fluido MR con la presencia de la arcilla. El uso de arcillas coloidales se ha utilizado en la preparación de composites magnéticos ya que permiten reducir la sedimentación de partículas en suspensión y el desgaste entre las superficies en movimiento. La adición de partículas de arcilla mostró ser adecuada para estabilizar fluidos magnetoreológicos contra la agregación y sedimentación de las partículas, sin enmascarar sus propiedades "inteligentes". También se reporta que un mecanismo adicional que contribuye a la reducción de la velocidad de sedimentación de las partículas es la adhesión arcilla-hierro, lo cual se probó mediante microscopía electrónica y dispersión de luz.

En otro trabajo de estos mismos autores (López[49], et. al. 2008) utilizaron diferentes surfactantes en la preparación de MRF para analizar su efectividad como dispersantes. Encontraron que la dispersión de partículas de hierro puras en portadores no polares es bastante pobre, en este tipo de líquidos portadores el uso de lecitina, acido oleico, mejora la dispersión de estas partículas. Por otra parte las partículas de hierro puras se dispersan bastante bien en portadores polares y los surfactantes utilizados no mostraron ninguna mejora en la dispersión[51].

Guerrero Sánchez et. al. reporta la preparación de MRF usando como líquido portador algunos líquidos iónicos[51]. El proceso de mezclado consistió en el mezclado mecánico por 15 minutos a 2400 rpm a temperatura ambiente y evaluaron sus propiedades reológicas y magnetoreológicas. Concluye que el uso de los líquidos iónicos da lugar a MRF con bajas

velocidades de sedimentación sin utilizar aditivos estabilizantes. Las velocidades de sedimentación, en este caso dependen de la clase de líquido iónico utilizado y de la concentración de las partículas magnéticas dispersadas.

Por otra parte Hideya Nishiyama[52] et. al. (2005), como se muestra en la Tabla 6, prepararon dos fluidos MR con diferente tamaño y forma de las partículas, de la siguiente manera: El S1 y S2 consisten en partículas de hierro esféricas de tamaños de 6 μm o agujas de hierro respectivamente. Se formó una película fluida de espesor de 100 μm, diluyendo las partículas al 20% en keroseno, entre una placa delgada de silicón y una cubierta de vidrio, bajo un campo magnético horizontal. El campo magnético aplicado es uniforme y su dirección es perpendicular a la muestra del fluido MR. Los autores caracterizan los fluidos obtenidos y comparan su comportamiento con un fluido comercial MRF-132DLD de Lord (muestra comercial).

Reportan que al aumentar el campo magnético se incrementó el tamaño de los agregados y la coalescencia de partículas tanto para el fluido de Lord como para el S1, que tiene partículas esféricas. Mientras que el S2, con partículas tipo aguja, no mostró ningún cambio. Por otra parte el S1 mostró la mayor viscosidad aparente y el mayor esfuerzo de cedencia; así como buenas características de amortiguamiento a ciertas condiciones de densidad de flujo[52].

**Tabla 6. Composición de los MRF sintetizados**

| | **Muestra de Referencia Comercial** | **S1** | **S2** |
|---|---|---|---|
| **Partículas de material** | hierro | hierro | hierro |
| **Diámetro de partícula (μm)** | 1~ pocas esferas | 6 esferas | 0.5 * 0.05 agujas |
| **Concentración en masa (wt%)** | 80.74 | 80 | 30 |
| **Líquido portador** | aceite | Hidrocarburo | Aceite de silicón |

Por otra parte, Shibayama[53] et. al. (2005) prepararon fluidos magnetoreológicos y estudiaron sus propiedades de abrasión como lo es el desgaste debido al uso nanocargas inorgánicas. Prepararon la magnetita precipitada y el hierro metálico recubierto con silica por medio de una reacción química. El hierro metálico recubierto con silica, que se dispersó en el MRF, se preparó mediante la reducción de la magnetita precipitada. La magnetita es produjo mezclando $FeSO_4$-$7H_2O$ y $Fe_2(SO_4)_3$. y ajustando el pH con NaOH. La temperatura se mantuvo en 343 K por 120 min. La magnetita recubierta con silica fue recuperada y posteriormente reducida en atmósfera de hidrogeno a 823-873 K con gas $N_2$. El hierro recubierto con silica es finalmente obtenido como se muestra en la siguiente Figura 21:

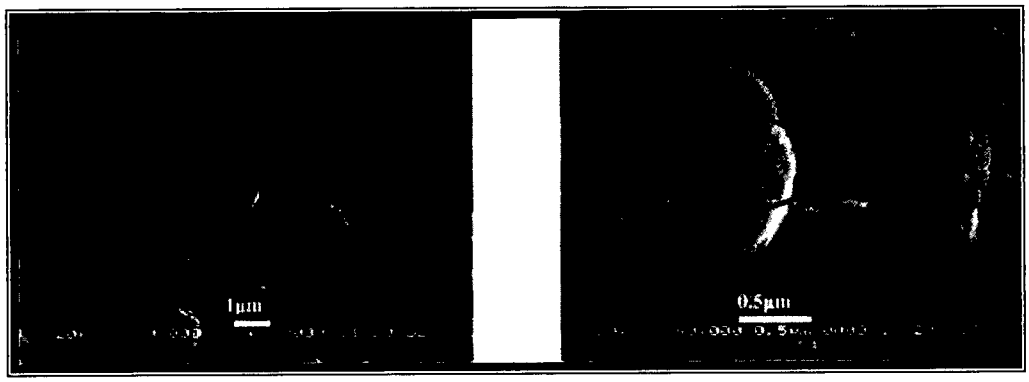
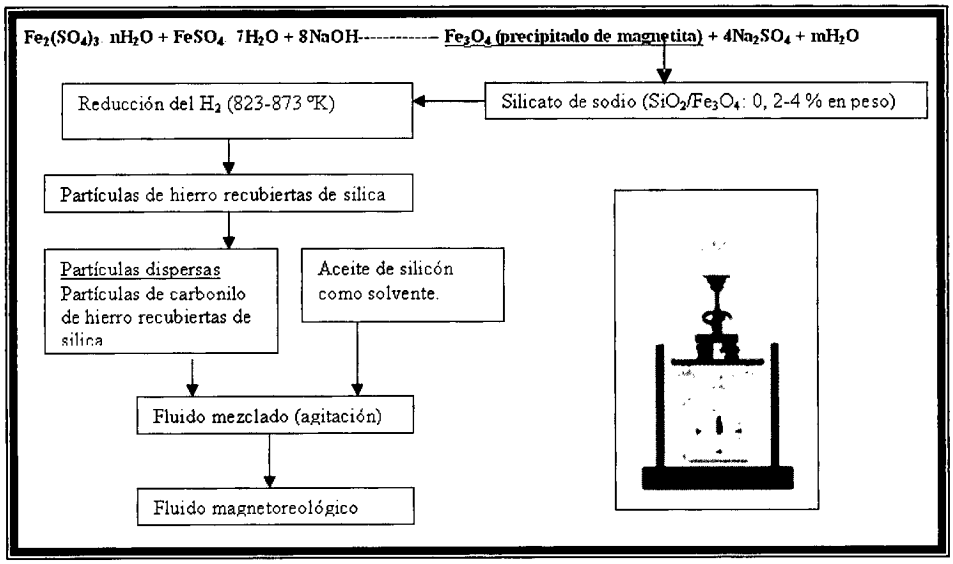



**Figura 21. Imagen SEM de la reducción y recubrimiento de las partículas de hierro con silica ($SiO_2/Fe_3O_4$: 3.0 wt %)**

Los fluidos magnetoreológicos se prepararon usando las partículas de hierro recubiertas con silica (de diámetros de 0.3-0.8 x $10^{-6}$m) o partículas de carbonilo de hierro (de diámetros de 1.6-1.9 x $10^{-6}$ m) en un líquido portador o aceites (Figura 22). Se utilizaron diferentes tipos de aceites de silicón (SH200cv, 10000cSt). La concentración de partículas de hierro se mantuvo en un 25 % en volumen en el fluido magnetoreológico. Se evaluaron las características magnetoreológicas mediante un viscosímetro de cono - plato.




**Figuras 22. Preparación de los MRF (procedimiento experimental) y esquema experimental de la abrasión.**

Encontraron que el incremento en el campo magnético aplicado da lugar a un aumento de los esfuerzos de corte y de cedencia. Es decir estos se comportan como fluidos de Bingham bajo campos magnéticos altos[53].

Nicholas Rosenfels[54] et. al. (2002) reporta la preparación de fluidos magnetoreológicos a partir de la síntesis de nanopolvos de hierro, para lo cual utilizó la técnica de síntesis plasma mediante microondas (MPS). Prepararon MRF basados en polvos nanométricos, micrométricos así como mezclas de los dos. Esta técnica utiliza microondas que genera un plasma por ionización, disociación y recombinación de moléculas de gas. Las altas temperaturas vaporizan los precursores, los cuales promueven reacciones químicas a nivel molecular en presencia de las microondas. Estos vapores son rápidamente enfriados para formar los nanopolvos de hierro. Los nanopolvos de hierro fueron sintetizados por precursores de carbonilo de hierro según la siguiente reacción:

$$Fe(CO)_5 \rightarrow Fe\,(s) + 5CO \uparrow (g)$$

Los vapores de hierro pentacarbonilo fueron incorporados directamente a la zona del plasma, donde ocurre la disociación del pentacarbonil a hierro y monóxido de carbono. El gas Argón se utilizó para transportar el precursor dentro de la cámara de plasma donde el calentamiento rápido de los polvos da lugar a la disociación.

Estos autores encontraron que los fluidos basados en partículas nanométricas e hibridas mostraron mayores esfuerzo de cedencia que los preparados con partículas micrométricas, a campo cero. Por el contrario con la aplicación de un campo magnético los MRF con partículas micrométricas mostraron el mayor esfuerzo de cedencia[54].

Otro tipo de fluidos magnetoreológicos los cuales contienen nanotubos de carbono (CNT) han sido análizados debido a que presentan propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas únicas. La utilización de CNT se ha visto impedida debido a la dificultad que éstos presentan para su manipulación a escalas muy finas. Por lo que estos autores analizan que la magnetización de éstos puede permitir su manipulación de forma más adecuada. Esta magnetización se puede llevar a cabo a través de la hibridización con ciertos materiales magnéticos, tales como hierro, níquel, cobalto, etc. Existen tres procedimientos reportados para elaborar composites magnéticos de CNT:

a) encapsulación del material magnético
b) incorporación del material magnético dentro de las paredes
c) deposición en la superficie exterior del nanotubo

Todos han mostrado que imparten características magnéticas al nanotubo. Sin embargo también pueden modificar al nanotubo de cierta manera. En este trabajo los autores revisan la literatura existente sobre la magnetización de nanotubos de carbono y su diferentes aplicaciones. Algunas de las técnicas reportadas permiten la elaboración de nuevos fluidos magnetoreológicos interesantes ya que combinan las características magnéticas con las características conductoras de los nanotubos de carbono, lo cual abre un campo interesante de aplicación para estos fluidos.

Uno de los retos para la investigación futura en este campo es el desarrollo de nuevos fluidos magnetoreológicos en los cuales se logre impedir la sedimentación de las micropartículas magnéticas seleccionando adecuadamente las partículas y el líquido portador. Alguno autores consideran que en este sentido se podrían utilizar ferrofluidos concentrados o líquidos iónicos como líquidos portadores y el uso de fibras ferromagnéticas como partículas[55].

## ELASTOMEROS MAGNETOREOLÓGICOS (MREs)

Los elastómeros magnetoreológicos (MREs) son una nueva clase de materiales inteligentes los cuales pueden ser controlados por medio de la aplicación de un campo magnético extremo. Las partículas magnéticas son añadidas en los precursores elastoméricos sólidos o líquidos. Los MREs son una clase de materiales inteligentes sumamente interesantes debido a que son estables y con propiedades mecánicas controlables. Los elastómeros magnetoreológicos son los análogos sólidos de los fluidos magnetoreológicos.

A. Fuchs[56] et. al. (2007) desarrollaron y caracterizaron materiales MREs con alta resistencia al medio ambiente, a la degradación y con excelentes propiedades mecánicas[56]. Por medio de un polibutadieno-PU-MREs con alta rigidez se obtuvo a altas concentraciones de partículas de hierro (60% en peso). Obteniendo como resultado final una mayor rigidez al aplicar un campo magnético. Por otra parte, se desarrollaron mezclas MREs de silicona/polibutadieno (Figura 23) con una buena compatibilidad y excelente rendimiento mecánico y térmico.

**Figura 23. Microscopía óptica de la mezcla silicona al 5 % en peso con el MREs: sin campo magnético (izquierda) y con campo magnético (derecha).**

G. Y. Zhhou and Z.Y. Jiang[57] (2004) reportan una técnica de análisis de la deformación de un elastómero magnetoreológico (MREs) y un compuesto elastomérico ferromagnético (EFC) mediante la aplicación de un campo con tecnología de punta. Los experimentos revelan los siguientes resultados: La deformación de los MREs y EFC por efecto de un campo magnético están relacionadas con la intensidad del campo, MRE mostraron más rigidez que los EFC en la dirección de la estructura de cadenas.

M. Lokander, B. Stenberg[58] (2003) investigaron sobre el mejoramiento del efecto isotrópico (efecto MR) de los materiales magnetoelásticos, demostrando que este efecto varía con partículas de hierro grandes, ya que estas partículas son independientes de la matriz del material, además el efecto magnetoreológico puede incrementarse mediante la adición de plastificante[58]. Otra conclusión de estos investigadores fue que para aumentar el efecto magnetoreológico, es necesario aumentar el campo magnético, aunque la materiales muestren una saturación magnética alta.

En otra investigación M. Lokander, B. Stenberg[59] (2003) explican un efecto similar con una baja concentración de partículas de carbonilo de hierro, debido a la alta dispersión que muestran las partículas, se encuentra una alta estabilidad en estos compuestos ya que muestran buenas propiedades reológicas y un efecto MR controlado.

L.V. Nikitin[60] et. al. (2003) prepararon materiales magnetoelásticos dispersando partículas ultra-finas y de mayor tamaño en matrices de hule natural y sintético, concluyen que la aplicación de un campo magnético durante el curado de la muestra tiene efecto sobre las propiedades elásticas y la forma de la muestra. Además la muestra presenta propiedades diferentes en la dirección del campo y en la dirección transversal a éste (anisotropía)[60]. Otro trabajo[61] de estos mismos autores (2004) mostró que la aplicación de un campo magnético dió lugar a grandes efectos de deformación y un considerable aumento en el módulo de Young[61].

En conclusión lo que se busca con estos trabajos de investigación es evitar la sedimentación de las mezclas, para lograr una mayor estabilidad y por tanto una mayor eficiencia en los fluidos magnetoreológicos.

# CAPITULO 4: ÁREAS DE OPORTUNIDAD

Este capítulo se enfocará a presentar de manera concreta las principales aplicaciones o áreas de oportunidad que se ha encontrado reportado para la tecnología de los fluidos MR, los cuales han salido ya de los laboratorios para su aplicación comercial, siendo utilizados en diversos productos dispositivos y sistemas inteligentes.

Cuando no existe la aplicación de un campo magnético, el líquido fluye libremente. Al aplicarle un campo magnético, las partículas se adhieren a lo largo del flujo generado por el campo magnético. La formación de estas cadenas de partículas, restringe la circulación del fluido por lo tanto el límite elástico del fluido se incrementa. Aumentando o disminuyendo la intensidad del campo permite el control de las propiedades reológicas del fluido y, por tanto, la amortiguación (el embrague/fuerza de frenado)[62]. Existen dos modos básicos en los que pueden operar estos dispositivos magnetoreológicos que son el modo de flujo de presión conducida (modo válvula) y el modo de corte directo, cada uno para aplicaciones específicas como se muestra en la Figura 24:

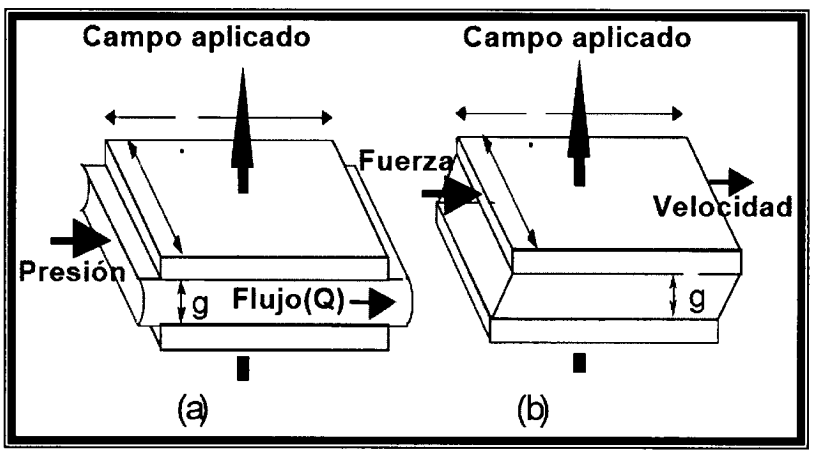



**Figura 24. Modos básicos de operación de dispositivos de fluidos controlables: a) modo de flujo de presión conducida, b) modo de flujo de corte directo.**

Por otra parte se encuentran los sistemas inteligentes que poseen sensores, actuadores y controladores a continuación se describen cada uno de estos componentes utilizados en la aplicación de materiales inteligentes:

**Sensores**

Un material sensor es aquel que detecta una señal (dato de entrada). Algunos materiales o aparatos, como las fibras ópticas, aparatos microelectromecánicos o alambres de guía de onda acústica, se ubican dentro del compuesto para sensar cambios en el medio circundante. Para ser usados como sensores, algunos compuestos son embebidos en otro compuesto, de matriz polimérica por ejemplo (Figura 28). La fibra óptica puede sensar temperatura, deformación, campos eléctricos y magnéticos o presión.

**Actuadores**

Uno de los materiales más comúnmente usados como actuadores son los fluidos magnetoreológicos (MR) y electroreológicos (ER). Los elastómeros magnetoreológicos son un ejemplo de material que se utilizan como actuadores (Figura 28). Los fluidos MR se utilizan, por ejemplo, en la amortiguación de las vibraciones de lavadoras o aparatos para hacer ejercicio, y los fluidos ER se utilizan en válvulas, así como para reducir ruido y vibraciones en vehículos.

**Controladores**

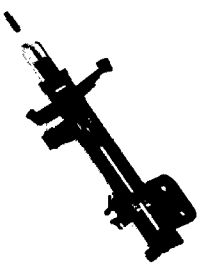
Los sensores y actuadores pueden introducirse en otros materiales para formar compuestos inteligentes. Los controladores se usan para acoplar funcionalmente estos dos elementos. Los controladores basados en microprocesadores reciben la señal de los sensores, y luego envían una señal correspondiente a los actuadores para producir la respuesta del material. Actualmente se están investigando y desarrollando algunos 'cerebros artificiales', que tienen un procesamiento autoadaptivo, para ser usados en algunas aplicaciones como en la industria aeronáutica similares a las células nerviosas de los seres vivos[26].

## APLICACIONES ACTUALES DE LOS MRF

### Automotriz y área militar

A continuación se ilustran diferentes tipos de dispositivos donde se utilizan los fluidos magnetoreológicos. Se puede observar en la Tabla 7 su principal uso es como amortiguadores[27]:

**Tabla 7. Aplicaciones de los MRF como amortiguadores**

| Aplicación | Esquema | Beneficios | Año |
|---|---|---|---|
| Área militar, como amortiguador en vehículos de combate como los tractores y los llamados orugas. | | Mejora de movilidad y la velocidad de conducción segura<br><br>La reducción de los choques debido a las vibraciones<br><br>La reducción de desgaste de la suspensión | 2006 |
| Amortiguador modelo: RD-1005-3 Utilizado en asientos de suspensión. | | Mejor precisión<br>Tiempo de respuesta corto<br>Funcionamiento silencioso | 2007 |
| Delphi MagneRide | | Suspensión con alto rendimiento para automóviles comerciales y confiabilidad en sensores, frenos y válvulas. | 2005 |
| BMW, Audi, Ferrari y ofrecer la MagneRide en diversos modelos |  | Los MRF utilizados como suspensiones controlables; sustituyendo al tradicional líquido hidráulico | 2007 |

**Aeronáutica y agrícola**

La industria aeronáutica se encuentra desarrollando alas de rigidez variable que responden a la carga del viento de forma activa para conseguir distintos objetivos como por ejemplo la disminución de cargas de fatiga, optimización aerodinámica, etc. En la Figura 25 se muestra un flap de un ala con actuadores. La idea es reemplazar los actuadores hidráulicos convencionales por sistemas basados en materiales inteligentes en concreto por aleaciones de memoria de forma. De esta forma se consigue una evidente disminución de peso y el sistema resultante es más sencillo, eficiente y compacto[27].

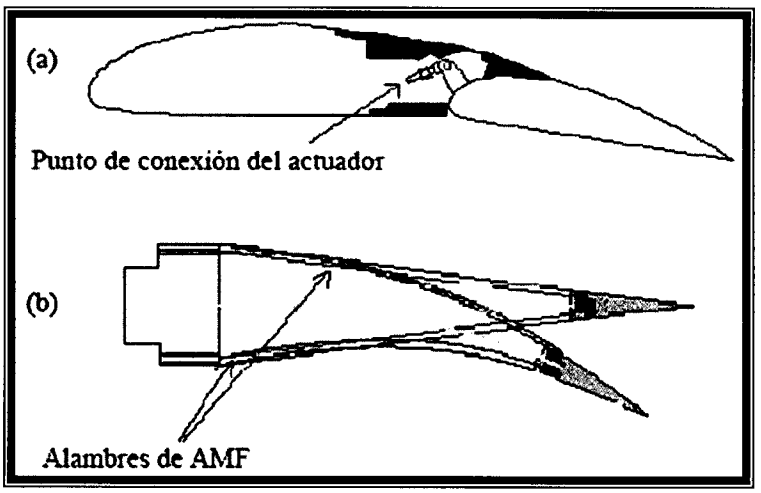



**Figura 25. Aplicación de los MRF en aeronáutica**

Utilizados también en amortiguadores de helicópteros y en asientos, así como en los dispositivos de seguridad en caso de un accidente. Esto disminuye el choque transmitido a cada uno de los pasajeros, en la columna vertebral, con lo que se reduce el riesgo de lesiones permanentes durante un accidente. Las ventajas de tales diseños son muchas. Los operadores experimentan menos fatiga y reducen los problemas de salud, se logran aumentos en la productividad debido estas a mejoras. La Figura 26 muestra un amortiguador de fluido magnetoreológico diseñado para utilizarse en un sistema de suspensión semi-activo de asiento en vehículos de carga para travesías largas o trabajos pesados:

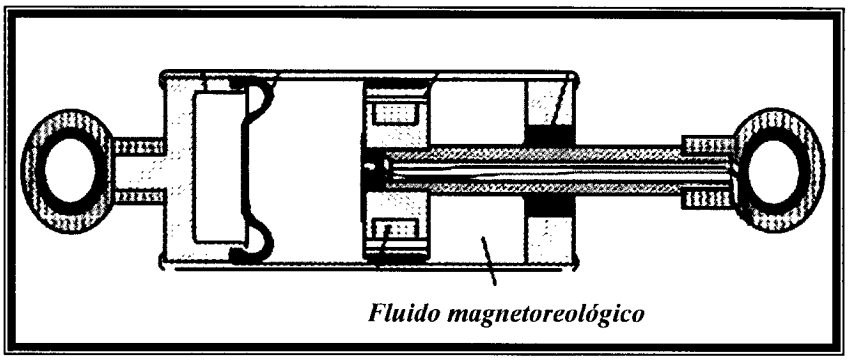



**Figura 26. Amortiguador MRF (Rheonetic RD-1001/4)**

## Protección Sísmica

Una aplicación muy interesante para los materiales inteligentes es su utilización para la protección de los edificios y sus ocupantes por medio de nuevas tecnologías, tales como los MRF como dispositivos de control en la base de aislamiento, distribuyendo los sistemas de amortiguación que protegen contra los terremotos y réplicas. Por medio de una alta fuerza disipativa (Figura 31), mitigando la actividad sísmica; con una rápida respuesta a tiempo, esta tecnología permite la utilización de dispositivos más pequeños que los normalmente utilizados en sistemas hidráulicos o mecánicos[60].

### Control de Vibración sísmica en estructuras

La prueba del incremento en el crecimiento de la tecnología de dispositivos magnetoreológicos es que se han diseñado y construido amortiguadores de tamaño apropiado para aplicaciones en ingeniería civil. Para el diseño nominal, fueron elegidos una fuerza máxima de amortiguamiento de 200,000 N y un intervalo dinámico de diez. La Figura 27 muestra un diagrama esquemático de un amortiguador de fluido magnetoreológico de gran escala[27].

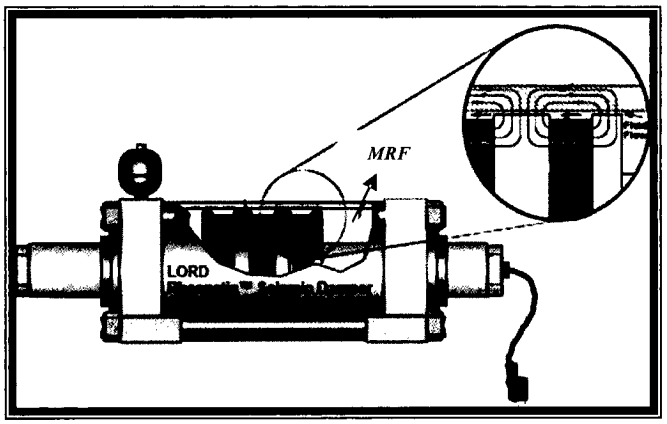



**Figura 27. Amortiguador sísmico de MRF (Rheonetic MRD-9000)**

## Prótesis Mixta

Se muestra en la Figura 28, un dispositivo que mejora la movilidad de las prótesis mixtas al utilizar dispositivos como los fluidos magnetoreológicos, tienen la ventaja de tener una alta precisión casi instantánea[4,27,60].

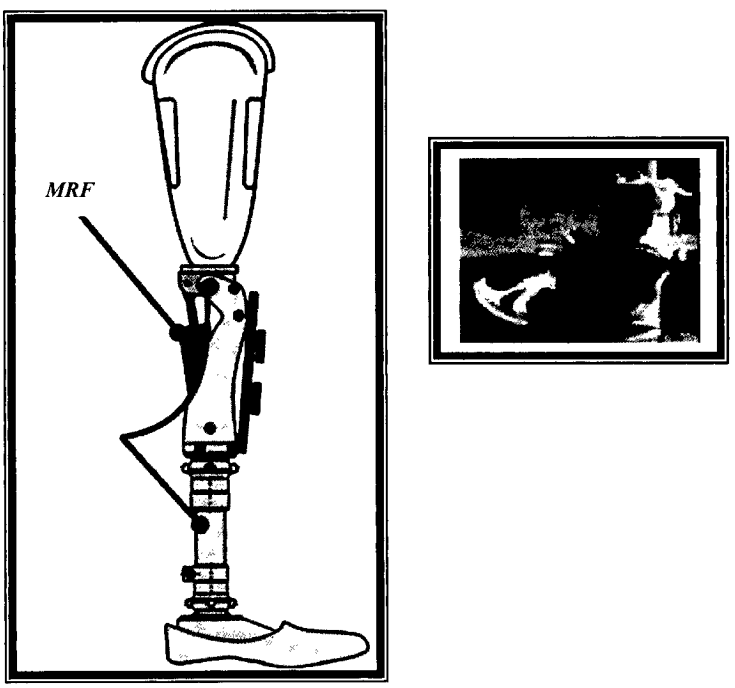



**Figura 28. Aplicación de los MRF en una prótesis mixta**

# CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los materiales inteligentes tienen la capacidad de sentir, actuar y controlar dispositivos magnéticos y eléctricos en la actualidad.

Los materiales magnetoactivos, un tipo de materiales inteligentes, responden a la aplicación de un campo magnético o eléctrico con un cambio en sus propiedades físicas.

Los fluidos magnetoreológicos (MRF) y electroreológicos (ERF) (fluidos inteligentes) pueden cambiar su viscosidad, drásticamente y de manera reversible, cuando se someten a un campo magnético y eléctrico, respectivamente.

La utilización de materiales inteligentes, tales como los fluidos magnetoreológicos, proporciona nuevas formas de controlar movimientos, vibraciones, flujo aerodinámico, etc., en diferentes tipos de dispositivos o sistemas.

Los fluidos magnetoreológicos pueden utilizarse en modo de corte directo y en modo válvula.

Los sistemas o dispositivos, con base en fluidos magnetoreológicos, utilizan la capacidad de controlar la viscosidad del fluido mediante la aplicación de un campo magnético.

Uno de los retos para la investigación futura en este campo es el desarrollo de nuevos fluidos magnetoreológicos en los cuales se logre impedir la sedimentación de las micropartículas magnéticas seleccionando adecuadamente las partículas y el líquido portador.

# CAPITULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


1) Arauz Solís Adriana Berenice. *Tesis de Licenciatura "Preparación de un fluido magnético compuesto de nanopartículas de magnetita y nanoalambres de plata"*, (Universidad Autonóma de Coahuila/ CIQA) Mayo (2008)

2) Jolly Mark R., Bender Jonathan W., and Carlson J. David, SPIE 5th Annual Int. *Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, Vol. **15** March (1998)

3) Arias Maya Luz Stella, Vanegas Useche Libardo; *Scientia et Technica*, UTP. ISSN 0122-1701,No 25, 143- 148, Agosto (2004)

4) MATELLANES, L., CUEVAS, J.M., CLEMENTE, R. y ALLUÉ S., *Materiales y Estructuras "Inteligentes"* (2004)

5)Ronald E. Rosensweig. Fluidos Magnéticos. *Investigación y Ciencia.* Barcelona. No.75, 62 – 71, Diciembre (1982).

6) Testa A. M. et al ;*Journal of Applied Physics;* **90**(3); 368-371(2001)

7) Novakova A. A. et al; *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 258-259, 354-357(2003)

8) Hao T. *Adv. Colloid Interface Sci*; 97: 1- 35(2002)

9) Parker R.J.; Wiley Interciencia; (1990)

10) Saldívar Guerrero Rubén. Tesis doctorado *"Obtención de Fluidos Magnéticos y Caracterización de su comportamiento magnetoreológico"* CIQA (2004).

11) Scherer C. and Figueiredo Neto A. M.; *Brazilian Journal of Physics* **35** *(3A)September(2005)*

12) Pomogailo A.D., Kestelman V.N.; *Springer Series*; Materials Science (2005)

13) Wolfgang Herrmann, Munich U.; *Chem. Eng. Technol. 21*(7), 549 (1998)

14) Euroresidentes, *Diccionario de Nanociencia*: Nanocomposites; España (2000)

15) García Cerda Luis Alfonso; *"Síntesis y caracterización de materiales compuestos nanoestructurados".* Curso Corto, CIQA (Noviembre 2006).

16) Salazar A.G. Doctoral Tesis; "Syntesis, Characterizacion and Applications of Iron Oxide Nano-particle"; KTH Materials Science and Engineering. Stockhom, Sweden (2004).

17) S. M. Montemayor, L. A. García-Cerda, J. R. Torres; *Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío.* 17(2), 21-24, Junio (2004)

18) Yoon M. et al; *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*;265, 357-362 (2003)

19) D. Jiles, *"Introduction to Magnetism and Magnetic Materials",* Chapman and Hall, (1991).

20) Berkovsky B. M., *Magnetic Fluids Engineering Aplications* Oxford Univeristy.

21) Miskolczy Kaiser G., *Journal of Applied Physics*, 41, 3, (1970).

22) S.S. Papell, U. S. Patent 3, 215, 572 (1965).

23) Hantrell R.W., Popplewell J., Charles S.W.,*IEEE Transactions on Magnetics*, 14, 975 – 977(1978).

24) Jolly R.M. y cols. International Publications. Properties and applications of Commercial MR-Fluids. Lord Corporation Thomas Research Center.

25) Park J.H. et. al., *J. Coll. Inter. Sci.,* 240, 349-354(2001).

26) Holm a,b, J.-J. Weis c,1; *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 133 – 140 C. (2005)

27) M. Zubieta, S. Eceolaza, M. J. Elejabarrieta, M. M. Bou-Ali*; X Congreso Nacional de Materiales*, 18-20 Junio (2008)

28) Ginder John M; *MRS BULLETIN* / AUGUST (1998).

29) Parekh K. Y cols. *J. Magn. Magn. Mater;* **289,** 311-313 (2005)

30) http://www.liquidsresearch.com/products/magnet.asp

31) Olabi G., Grunwald A.; *Materials and Desing*;**(28)**; 2658-2664 (2007)

32) Donado P. F. Tesis Doctoral. *Fluidos Electro y Magnetorhelogicos: Teoría y Experimento.*Benemérita Universidad Autonóma de Puebla, Puebla Pue. 2002

33) Rosensweig Ronald E.; Ann rev. Fluids Mech 1987. 19: 437-63. Annual Reviews Inc. All rights reserved. Magnetic Fluids.

34) Bregni Dr. Carlos, "Reología", *Departamento de Tecnología Farmaceútica y bioquímica.* Universidad de Buenos Aires.(cbreghi@ciudad.com.ar)35) Echeverría y M. A. Rubio, (1995)

36) Melle, S., Fuller, G.G. y Rubio, M. A., *Physical Review E.*, **61**(4) 4111-4117*(2000).*

37) Melle Sonia, Calderón Oscar G. Rubio, Miguel A. , Fuller Gerald G.; video microscopy experiments and simulations results; *ELSVIER*; J. Non-Newtonian Fluid Mech. 102 135–148(2002)

38) Li W. H. , Du H., Guo N. Q.; Materials Science and Engineering A00 1-7(2003).

39) Fuchs, A. et.al. *J.Appl.Polym.Sci.* 105, 2497(2007).

40) www.interempresas.net

41) Ramírez V. Eduardo, Guillermo Martínez C, *Manual: "Análisis y Evaluación de Plásticos",* Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA 2001).

42) JCPDS, International Center for Powder Difraction Data: Swarthmore, PA;No. 19-629 (1989)

43) Unidad de Microscopía Electrónica, Centro de Investigación y Control de la Calidad, Instituto Nacional del consumo, Ministerio de Sanidad y Consumo, Madrid, España.

44) Genc S. Doctoral Dissertation. *Síntesis ana properties of Magnetorheological (MR) fluids.* University of Pittsburg July (2002)

45) Tian Y. y cols. *Physical review E.* **67**; (2003)

46) Garcia C., *Angew. Chem. Int. Ed.,42,*1526 (2003)

47) Viola J. L. et. al. Col. J. Inter. Sc., Vol. **284**, 527-541 (2001)

48) Real Grajales Karla Yadira, Tesis de Licenciatura, *Instituto Politécnico Nacional*; CIQA (2006).

49) López-López Modesto T., Kuzhir Pavel, Bossis Georges, Mingalgov Pavel; RHEOL Acta 47: 787-796 (2008)

50) López-López Modesto T., Gómez-Ramírez Ana, D. G. Durán Juan, and Fernando González Caballero; *American Chemical Society* Vol. **24**, 7076-7084 (2008).

51) Guerrero-Sánchez Carlos, Lara-Ceniceros Tania, Jimenez-Regalado Enrique, Rasa Mircea, and Schubert Ulrich S, *Advanced Material,* Vol. **19**, 1740-1747 (2007)

52) Nishiya Hideya, Katagiri Kazunari, Hamada Katsuhisa, Kikuchi Kazuto; *Internacional Journal of Modern Pysics b*; Vol. **19**(7,8 and 9), 1437-1442 (2005).

53) Shibayama A. and Otomo T., Akagami Y., Shimada K., Fujita T.; *International Journal of Modern Physics B*; Vol. **19**(7, 8 and 9), 1121-11-27 (2005).

54) Rosenfels Nicholas and Wereley Norman M., Radakrishnan Radhakumar and Sudarshan Tirulai S.; *Internacional Journal of Moderns Physics b*, Vol. **16** (17) and (18), 2392 -2398 (2002)

55) Samouhos Stephen, McKinnley Gareth; *J. OF FLUIDS ENGINEERING,* **129;** (4) PP.(2007)

56) Fuchs A., Zhang Q., Elkins J., Gordaninejad F., Evrensel C., *Journal of Applied Polymer Science,* Vol. **105**, 2497-2508 (2007)

57) Zhhou G. Y. and Jiang Z.Y., *Smart Materials and Sturctures*, Vol. **13**, 309-316 (2004)

58) Lokander M., Stenberg B., *Polymer Testing*; Vol. **22**, 677–680 (2003)

59) Lokander M., Stenberg B.; *Polymer Testing;* Vol. **22**, 245–251 (2003)

60) Cupich Rodríguez Miguel, Elizondo Garza Fernando J., *Ingenierías*, Jul-Dic,**1** (2) (1999).