

# CAPITULO 2

## 2. FLUIDOS MAGNETORREOLOGICOS

### 2.1. Definición.

Los Fluidos Magnetorreológicos, o FMRs, son suspensiones no coloidales, compuestos por partículas micrométricas magnetizables, suspendidas en líquidos no magnéticos. Estos fluidos muestran cambios dramáticos en sus propiedades reológicas como resultado de una magnetización inducida en las partículas cuando se aplica un campo magnético.

Las interacciones entre los dipolos inducidos resultantes hacen que las partículas produzcan estructuras en forma de cadenas paralelas al campo, lo cual incrementa la resistencia a fluir del FMR.

Al restringirse el movimiento del fluido, se incrementa la viscosidad y se desarrolla una resistencia en la suspensión; de tal manera que mientras mayor sea el campo magnético empleado, mayor será la energía mecánica necesaria para romper las estructuras formadas. En otras palabras, el cambio generado se manifiesta por el desarrollo del esfuerzo a la fluencia, que crece a medida que aumenta el campo aplicado.

Todo este proceso ocurre en un tiempo de respuesta en el orden de los milisegundos y es reversible.

La importancia de los FMRs radica en su habilidad de suministrar interfaces sencillas, silenciosas y de respuestas rápidas entre controles electrónicos y sistemas mecánicos.

## **2.2. Historia.**

El descubrimiento inicial de los FMRs y el desarrollo de dispositivos que usan estas suspensiones se le atribuye a *Jacob Rabinow* del United States National Bureau of Standards, hechos entre 1948 y 1951. Casualmente, estas investigaciones se presentaron en la misma época que Willis Winslow expuso sus trabajos sobre los Fluidos Electrorreológicos, o FERs.

A finales de la década del 40 y principios de la del 50, se patentaron y se expusieron más publicaciones relativas a los FMRs que a los FERs.

A pesar del auge de los FMRs, poco tiempo después perdieron interés y ya casi no se publicaba información sobre éstos.

Recientemente ha habido un resurgimiento en el estudio de los FMRs por parte de la comunidad científica. Investigadores tales como E. M. Shtarkman, W. Kordonsky, K. D. Weiss y J. David Carlson se han dedicado a desarrollar equipos y sistemas que usen estas suspensiones y tengan aplicaciones industriales.

### **2.3. Diferencias entre FMRs y FERs.**

Típicamente, un FER consiste en una dispersión de partículas sólidas dentro de un aceite aislante.

Willis Winslow, en sus experimentos iniciales, usó partículas sólidas de almidón, piedra, cal, yeso, carbón y silica; las cuales las dispersó en aceites aislantes minerales, parafina y queroseno. Al usar estos tipos de materiales, Winslow fue capaz de demostrar que la resistencia a fluir de ciertos FERs podría aumentar

significativamente por la aplicación de un campo eléctrico de suficiente intensidad. Desafortunadamente, reportes recientes del rendimiento de estos fluidos señalan que son abrasivos, químicamente inestables y propensos a sufrir rápido deterioro.

Por otro lado, los FMRs están formados por partículas microscópicas de un material magnético, dispersadas en un líquido lubricante transportador.

Los dos tipos de fluidos pueden operar directamente desde suministros de poder de bajo voltaje y son menos sensibles a los contaminantes y temperaturas extremas.

Pero, a pesar de que ambas suspensiones tienen características comunes, la principal diferencia en el comportamiento de éstas radica en la magnitud de las fuerzas que son desarrolladas. Los FMRs son 20 a 50 veces más fuertes que los FERs. Además, las diferencias significativas en su operación son de vital importancia cuando se consideran las aplicaciones comerciales.

A continuación se muestra una tabla comparativa de las propiedades típicas de los fluidos Magnetorreológicos y Electrorreológicos.

**TABLA 2**

**Tabla Comparativa de las Propiedades de FERs y FMRs**

<b><i>Propiedad</i></b>	<b><i>FER</i></b>	<b><i>FMR</i></b>
Esfuerzo de Fluencia	2 – 5 kPa Campo limitado por corto circuito	50 – 100 kPa Campo limitado por saturación
Viscosidad (sin campo)	0.2 – 0.3 Pa-s @ 25°C	0.2 – 0.3 Pa-s @ 25°C
Temperatura de Operación	10°C a 90° (iónico, DC) -25°C a 125°C (no iónico, AC)	-40°C a 150°C (limitado por el fluido transportador)
Densidad de corriente	2 – 15 mA/cm <sup>2</sup> @ 25°C)	Puede ser energizado con imanes permanentes
Gravedad específica	1 – 2.5	3 – 4
Materiales auxiliares	Cualquiera (superficie conductiva)	Hierro, acero
Color	Cualquiera, opaco o transparente	Café, negro, gris opaco

#### **2.4. Diferencias entre FMRs y Ferrofluidos.**

Los ferrofluidos son usualmente confundidos con los FMRs.

Ambos son suspensiones de partículas de hierro dispersas en aceite. La diferencia está en el tamaño de dichas partículas: en los FMRs son micrométricas ( $1 \times 10^{-6}$  m) y de hierro puro; mientras que en los ferrofluidos son nanométricas ( $1 \times 10^{-9}$  m) y de óxido de hierro.

Los ferrofluidos, por tener partículas muy pequeñas, fluyen cuando son atraídos por un campo magnético. Incluso en presencia de un campo muy fuerte, siempre permanecen en estado líquido.

#### **2.5. Rol del Ingeniero Mecánico en la Investigación y Aplicación de los FMRs.**

Dadas las extensas ramas de aplicación de la Ingeniería Mecánica, los FMRs representan un campo de estudio importante que, actualmente, se está desarrollando a pasos agigantados.

Para desarrollar Sistemas Dinámicos Inteligentes se necesitan también de la Ingeniería Química. Esta ciencia se encarga del

desarrollo del fluido; es decir, que presente las siguientes características:

- Efecto Magnetorreológico más fuerte.
- Mayor estabilidad.
- Menor sedimentación.
- Amplio rango de temperaturas de operación.

Junto con la Ingeniería Mecánica se ocupan de estudiar la clasificación del comportamiento reológico de estas suspensiones, y seleccionar la conducta adecuada para cada aplicación industrial específica.

El Ingeniero Mecánico es el encargado de realizar las pruebas correspondientes en los modelos de dispositivos propuestos, y analizar los datos obtenidos; de acuerdo con las necesidades y requerimientos de las compañías solicitantes.

Las principales áreas de servicio de los FMRs son:

- ◆ Aislamiento de Vibración (puentes, edificios, vehículos, etc.).
- ◆ Frenos.
- ◆ Transferencia de torque.
- ◆ Actuadores.

## **2.6. Características de un FMR.**

Los tres elementos básicos que conforman un FMR son:

- Partículas magnéticamente polarizables.
- Un líquido transportador.
- Agentes estabilizadores.

A continuación se describirán cada uno de los materiales mencionados.

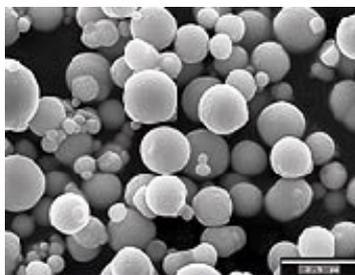
### **2.6.1. Partículas Magnéticamente Polarizables.**

Los FMRs son típicamente formulados usando polvo de hierro Carbonyl (PHC).

El PHC es producido por la descomposición térmica del hierro pentacarbonyl,  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ , el cual es altamente purificado por destilación. Durante el proceso de descomposición las partículas esféricas forman un núcleo, por esta razón se desarrolla una estructura de cascarón.

Las condiciones iniciales de este proceso químico determinan las propiedades del PHC, las cuales son:

- Partículas de estructura esférica, sin porosidades.
- Distribución del tamaño de la partícula (diámetro primario de 1 a 8 micrones, dependiendo del requerimiento del dispositivo).
- Alta pureza química (contenido de hierro arriba de 99.5%).
- Bajas impurezas de metales (Silicio, menos de 10 ppm de metales pesados).
- Control del contenido de carbón dentro de las tolerancias adecuadas.
- Alta consistencia.



**Figura 2.1 Vista microscópica del polvo de hierro Carbonyl. [10]**

La fuerza máxima desarrollada por un FMR está directamente relacionada con la cantidad de hierro en el fluido. Mientras más hierro haya, mayor es la fuerza alcanzada. También el contenido de hierro afecta

directamente al esfuerzo a la fluencia del fluido cuando esta sometido a un campo magnético dado.

Para proteger la superficie de las partículas contra el desgaste y la abrasión se utilizan lubricantes, a fin de mantener la tolerancia recomendada entre las caras deslizantes.

Para prevenir el asentamiento, se añade un material que forme redes para evitar esta situación.

#### **2.6.2. Líquido Transportador.**

Dependiendo de la compatibilidad con sellos, rangos de temperatura de operación y aplicaciones, el líquido transportador puede ser agua, hidrocarburos (mineral o sintético) o aceite de silicona.

Si se va a trabajar con un sistema sellado o con un dispositivo que se pueda rellenar, se recomienda emplear los **FMRs a base de agua**, ya que son fáciles de limpiar y contienen ingredientes aprobados por la FDA (Food and Drug Administration).

Si se va a diseñar un dispositivo no sellado y donde la evaporación del agua podría ser un problema, se sugiere utilizar los **FMRs a base de hidrocarburos**, ya sean minerales o sintéticos. Comúnmente este tipo de líquido transportador es el predilecto, ya que los aceites son buenos lubricantes, son durables, muy estables y están disponibles en un amplio rango de viscosidades. Dentro de este grupo, los más usados son los aceites sintéticos polialfaolefinas. Sin embargo, si se escogió experimentar con aceite mineral, se advierte no manejar hule orgánico o temperaturas extremas.

Cabe indicar que la viscosidad del aceite es la propiedad más importante en un FMR. En general se prefiere aceites de viscosidad baja, porque hacen más fluyente al FMR cuando no está energizado. Otra propiedad importante del aceite es su presión de vapor baja, puesto que el fluido no se evaporará y podrá ser usado en un vasto rango de temperaturas.

Si se requiere un buen desempeño en un rango de temperaturas entre 40°C y 100°C, se aconseja usar los

**FMRs a base de aceite de silicona.** No obstante, es importante tomar en cuenta que la silicona es muy difícil de sellar.

En el Apéndice A se encuentra una tabla comparativa de ciertos FMRs con distintos líquidos base fabricados por Lord Corporation.

### **2.6.3. Agentes Estabilizadores.**

Son aditivos que ayudan a prevenir que las partículas de hierro densas se asienten apresuradamente y formen sedimentos fuertes que sean difíciles de mezclar.

En muchos FMRs las partículas de hierro tienden a asentarse, dejando una capa de líquido transportador en la superficie del recipiente o dispositivo portante. Los agentes estabilizadores inhiben el inevitable asentamiento gravitacional y mantienen a los sedimentos suaves. También son usados para mejorar la durabilidad y resistencia a la corrosión.

Los más simples son los jabones metálicos, como estearato de litio o estearato de aluminio. Estos químicos son añadidos a los aceites para formar las grasas.

## **2.7. Comportamiento de un FMR.**

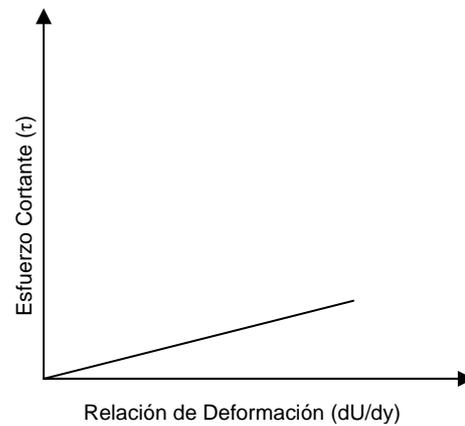
Los FMRs varían su comportamiento y consistencia de acuerdo a la ausencia o aplicación de un determinado campo magnético. De aquí se tiene que un FMR actúa como un Fluido Newtoniano o como un Fluido No Newtoniano.

### **2.7.1. Comportamiento de un FMR como un Fluido Newtoniano.**

Un FMR presenta esta conducta cuando no existe un campo magnético aplicado. Su consistencia es similar a la de un aceite de motor.

Se dice que un Fluido es Newtoniano cuando el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) es directamente proporcional a la relación de deformación ( $dU/dy$ ) en la dirección perpendicular al plano del esfuerzo.

El agua y la glicerina son ejemplos de Fluidos Newtonianos.



**Figura 2.2 Comportamiento de un Fluido Newtoniano. [4]**

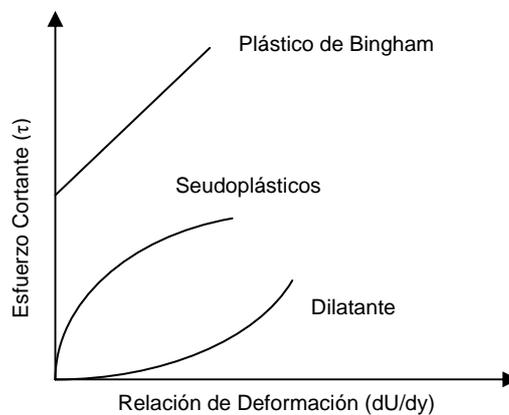
### **2.7.2. Comportamiento de un FMR como un Fluido No Newtoniano.**

Un FMR actúa de esta manera cuando se está aplicando un campo magnético. Su consistencia es similar a la mantequilla de maní.

Un fluido es No Newtoniano cuando el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) no es directamente proporcional a la relación de deformación ( $dU/dy$ ).

Los tipos más comunes de Fluidos No Newtonianos son los Seudoplásticos (soluciones poliméricas, suspensiones

coloidales, pulpa de papel en agua), Dilatantes (suspensiones de almidón y de arena) y los Plásticos de Bingham (suspensiones de arcilla, lodos de perforación, pasta de dientes, FMRs).



**Figura 2.3 Comportamiento de un Fluido No Newtoniano. [4]**

## 2.8. Propiedades de los FMRs.

### Propiedades Reológicas.

Dependen de la concentración y densidad de las partículas, del tamaño de la partícula y su perfil de distribución, de las propiedades del líquido transportador, de los aditivos adicionales, del campo aplicado, de la temperatura, etc.

La relación entre estos factores es muy compleja; sin embargo, es importante establecer metodologías para optimizar el rendimiento de los FMRs para aplicaciones específicas.

También es necesario considerar la viscosidad del fluido en ausencia de un campo magnético, ya que ésta es una función del líquido transportador, de los agentes de suspensión y de las características físicas de las partículas.

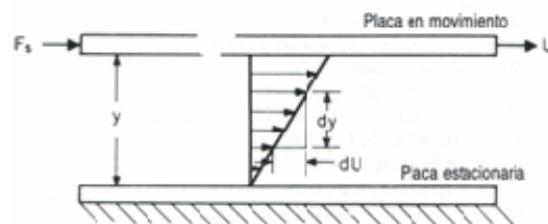
**Viscosidad:** Es la resistencia que presenta un fluido al movimiento provocado por una fuerza cortante; es su fricción interna. Esta resistencia se debe a la cohesión de las moléculas y a la transferencia molecular de una capa a otra, lo que establece un esfuerzo tangencial o cortante.

La viscosidad de las sustancias varía de acuerdo al estado de la materia y a la temperatura a la cual se encuentra. En los **líquidos** predomina la cohesión; y cuando ésta disminuye al aumentar la temperatura, también disminuye la viscosidad. En los **gases** la cohesión es relativamente débil; como consecuencia, la mayor actividad molecular que se produce al aumentar la temperatura provoca un incremento en la transferencia molecular, con el

correspondiente aumento en la viscosidad. En los **sólidos** la cohesión es muy fuerte, por lo que la viscosidad tiende al infinito.

Existen dos clases de viscosidad: dinámica (o absoluta) y cinemática. Sólo se definirá la viscosidad dinámica por ser objeto de estudio del presente trabajo.

*Viscosidad Dinámica o Absoluta ( $\mu$ ):* Es la relación del esfuerzo cortante ( $\tau$ ) a la razón de deformación ( $dU/dy$ ). Ilustrando esta definición, se tiene:



**Figura 2.4 Flujo de una sustancia entre placas paralelas. [2]**

Entonces se puede escribir que:

$$\mu = \frac{\tau}{(dU/dy)} \quad (2.1)$$

La unidad más común que se utiliza para expresar la viscosidad dinámica es el *Centipoise (cP)*.

La siguiente tabla presenta la viscosidad aproximada de ciertas sustancias conocidas.

TABLA 3

## Viscosidades Aproximadas de Sustancias Conocidas

<i>Material</i>	<i>Viscosidad Aproximada (cP)</i>
Agua @ 21°C	1 a 5
Sangre o Kerosene	10
Anticongelante	15
Aceite de motor SAE 10 o Aceite de maíz	50 a 100
Aceite de motor SAE 30 o Sirope	150 a 200
Aceite de motor SAE 40 o Aceite de Castor	250 a 500
Aceite de motor SAE 60 o Glicerina	1.000 a 2.000
Miel	2.000 a 3.000
Melaza	5.000 a 10.000
Sirope de chocolate	10.000 a 25.000
Salsa de tomate o Mostaza	50.000 a 70.000
Pasta de tomate o Mantequilla de maní	150.000 a 250.000
Manteca de cerdo	1'000.000 a 2'000.000
Empaste para pared	5'000.000 a 10'000.000
Masilla para ventana	100'000.000

**Propiedades Magnéticas.**

Es necesario entenderlas para diseñar un dispositivo basado en FMRs.

En muchos equipos, los FMRs representan la mayor reluctancia (resistencia al flujo magnético) dentro de un circuito magnético.

Estas propiedades también contribuyen a comprender el carácter y la formación de las estructuras de las partículas dentro del fluido.

**Lubricidad:** En general, los FMRs son ligeramente abrasivos. No obstante, para que esta condición afecte la durabilidad de estos compuestos depende de ciertos factores asociados con la composición del fluido y el diseño del dispositivo. Las bandas y otros materiales de cojinetes, que están en contacto corredizo con FMRs, son comúnmente áreas de abrasión crítica. La capacidad de los FMRs para lubricar las superficies corredizas se reflejará en la predisposición al desgaste de dichas áreas.

**Asentamiento:** En escalas micrométricas, donde la diferencia de densidad entre una partícula y el fluido circundante existe, el

asentamiento en los FMRs debe ser considerado mientras se lo está formulando.

La aplicación específica determina la cantidad de asentamiento que debe ser controlada y como debe ser medida.

En general, el asentamiento está regido por el carácter reológico del medio de suspensión, las propiedades superficiales de las partículas magnéticas y la presencia de agentes superficiales activos. En un dispositivo, el asentamiento puede estar ligeramente influenciado por la presencia de campos remanentes, la orientación y la geometría del equipo.

**Compatibilidad:** La siguiente tabla muestra la compatibilidad de ciertos FMRs con materiales típicos de sellos.

TABLA 4

**Tabla de Compatibilidades de ciertos FMRs con Materiales de Sellos  
(fabricados por Lord Corporation)**

<b><i>Fluido Reonético</i></b>	<b><i>Líquido Base</i></b>	<b><i>Fluoro-elastómero</i></b>	<b><i>Hierro</i></b>	<b><i>Acero Inoxidable</i></b>
<b><i>MRF-336AG</i></b>	Silicona	Buena	Buena	Buena
<b><i>MRF-122-2ED</i></b>	Hidrocarburo	Buena	Buena	Buena
<b><i>MRF-132AD</i></b>	Hidrocarburo	Buena	Buena	Buena
<b><i>MRF-132LD</i></b>	Hidrocarburo	Buena	Buena	Buena
<b><i>MRF-240BS</i></b>	Agua	Buena	Buena	Buena
<b><i>MRF-241ES</i></b>	Agua	Buena	Buena	Buena

**Temperatura de Operación:** Este rango depende del líquido transportador del FMR.

Los fluidos basados en aceite pueden trabajar en intervalos de -40°C a 130°C; los basados en silicona operan entre -40°C a 150°C; y los basados en agua se emplean para temperaturas entre -10°C a 70°C.

A muy bajas temperaturas, por ejemplo a  $-40^{\circ}\text{C}$ , los fluidos basados en agua se vuelven un poco sólidos; los basados en aceite se tornan extremadamente viscosos, pero siguen siendo fluidos; y los basados en silicona presentan poco cambio en su comportamiento. A pesar de que estos últimos son los que se desenvuelven mejor a estos niveles de temperatura, presentan problemas en el sellado del dispositivo.

**Presión:** Los FMRs pueden trabajar, sin dificultad, bajo presiones estáticas mayores a 17 MPa. Los fluidos basados en silicona son los más aptos para operar a presiones mayores, ya que pueden soportar más de 344 MPa.

**Densidad:** Está dada por el líquido transportador y por el contenido de hierro. Normalmente, varía entre  $2\text{ g/cm}^3$  hasta  $4\text{ g/cm}^3$ .

**Volumen:** Un FMR no cambia su volumen, independientemente si se está aplicando o no un campo magnético.

**Tiempo de respuesta:** En general, el tiempo de respuesta del fluido es menor a  $10^{-3}$  segundos.

En muchos dispositivos este tiempo no sólo está limitado por el fluido, también depende de la inductancia del electroimán y del rendimiento de la impedancia de la fuerza electrónica.

**Amigable con el medio ambiente:** Los FMRs no afectan la capa de ozono porque no están formados por CFCs.

### 2.9. Vida Util de un FMR.

Dependiendo de las condiciones de una determinada aplicación, eventualmente todos los FMRs presentan cierto grado de deterioro. Un ejemplo de esto es el espesamiento del fluido. Generalmente, la cantidad de deterioro depende de la tasa de esfuerzo cortante y de la temperatura.

Una medida que ha demostrado utilidad en la estimación de la vida esperada de un FMR en una aplicación particular es la relación *LDE (Energía Disipada de Vida)*, que es la energía mecánica total convertida en calor por unidad de volumen de FMR durante la vida de un dispositivo. Está dada por:

$$LDE = \frac{1}{V} \int_0^{\text{Vida}} P \cdot dt \quad (2.2)$$

donde  $P$  es la potencia mecánica instantánea convertida en calor en un dispositivo MR, y  $V$  es el volumen de FMR en el dispositivo.

Se considera un buen FMR al que tiene una relación LDE en el orden de  $10^7 \text{ J/cm}^3$ , antes de que el fluido comience a espesarse.

### **2.9.1. Vida Operativa de un FMR.**

Está completamente ligada al diseño del dispositivo y al nivel de disipación de energía requerido del fluido.

### **2.9.2. Tiempo de almacenamiento de un FMR.**

Depende del fluido. Normalmente, excede los seis meses.

## **2.10. Diseño de dispositivos MRs.**

El comportamiento de los FMRs, producto de la polarización inducida en partículas suspendidas por la aplicación de un campo externo, provoca la interacción entre dipolos inducidos resultantes. Esta conducta hace que las partículas formen estructuras columnares, paralelas al campo aplicado, que restringen al fluido por el incremento en las características viscosas de la suspensión. La energía mecánica necesaria para que la fluencia de la

microestructura aumente a medida que crece el campo aplicado resulta en un campo dependiente del esfuerzo a la fluencia.

En ausencia de un campo magnético, el FMR presenta un comportamiento Newtoniano. Pero, cuando existe un campo, el comportamiento de un FMR es comúnmente representado como un plástico Bingham que tiene resistencia a la fluencia variable.

Considerando esto, se tiene:

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau < \tau_y \quad (2.3)$$

donde  $\tau$  son los esfuerzos del fluido,  $\tau_y$  es el esfuerzo a la fluencia dependiente,  $H$  es la intensidad de campo magnético,  $\dot{\gamma}$  es la tasa del esfuerzo cortante y  $\eta$  es la viscosidad plástica (a  $H = 0$ ).

Por debajo del esfuerzo a la fluencia, el material se comporta viscoelásticamente, esto es:

$$\tau = G \dot{\gamma}, \quad \tau < \tau_y \quad (2.4)$$

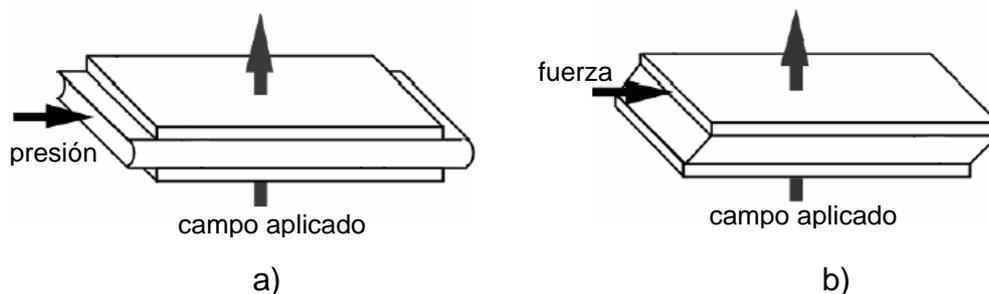
donde  $G$  es el módulo de elasticidad al esfuerzo cortante, y es dependiente del campo magnético.

### 2.10.1. Geometrías Comunes.

De acuerdo a sus condiciones básicas de operación, los dispositivos que usan FMRs pueden trabajar de las siguientes maneras:

- a) Modo de presión manejada por el flujo o de polos fijados. Incluye servoválvulas y amortiguadores.
- b) Modo de esfuerzo directo o de polos relativamente movibles. Comprende embragues, frenos y dispositivos de bloqueo.
- c) Modo de límite de película. Es usado en movimiento lento y aplicaciones de alta fuerza.

A continuación se presenta un diagrama de los dos principales modos de operacionales de los dispositivos MRs.



**Figura 2.5 Modos básicos de operación de los FMRs. a) Modo de presión manejada por el flujo. b) Modo de esfuerzo directo. [11]**

### **2.11. Aplicaciones de los FMRs.**

Actualmente, se utilizan dispositivos MRs en:

- ◆ Industria Automovilística: Para el control de la vibración, transmisión de torque variable, desarrollo de sistemas de amortiguación, frenos rotatorios y embragues.
- ◆ Industria de la Construcción: Para neutralizar las vibraciones causadas por movimientos telúricos y vientos.
- ◆ Industria Mecánica: Válvulas.

En un futuro cercano, se presume que entre los potenciales usos de estos fluidos estarán:

- + Telescopios con espejos magneto-líquidos.
- + Miembros protéticos para humanos.
- + Soportes activos para motores.
- + Amortiguadores de carga para ser usados en el espacio.
- + Cinturones de seguridad ajustables y bolsas de aire en automóviles.
- + Robots con movimientos semejantes a los humanos.