

MONTAJE Y PRUEBA DE RESISTENCIA DE UN ACTUADOR CILINDRICO TRABAJANDO CON UN FLUIDO MAGNETORREOLOGICO CASERO

Carola Sánchez Zurita¹, Marco Pazmiño Barreno²

¹Estudiante de Ingeniería Mecánica.

²Director de Tesis, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1971, Postgrado EEUU, Universidad Harvard, 1974. Profesor de ESPOL desde 1974.

RESUMEN

Desde el inicio de los tiempos el hombre, por medio de la ciencia y la tecnología, se ha dedicado al descubrimiento y desarrollo de materiales para mejorar su nivel y calidad de vida. Por estas razones, es imperiosa la necesidad de encontrar compuestos que tengan la capacidad de sentir, actuar y controlar. Dichos compuestos son los llamados "materiales inteligentes", los cuales tienen la facultad de cambiar sus propiedades físicas en presencia de un determinado estímulo. Un ejemplo de éstos son los Fluidos Magnetorreológicos (FMR).

Este artículo comienza con los fundamentos teóricos de los FMR: su definición, historia, características, comportamiento, propiedades y aplicaciones. Luego, se describe la obtención experimental del fluido en cuestión. Adicionalmente, se evalúan las propiedades magnéticas y la viscosidad de la suspensión resultante con y sin campo magnético, y variando la temperatura. A continuación, se analiza el Prototipo Magnetorreológico propuesto: los elementos que lo forman, la prueba de resistencia de peso que soporta y su respectivo costo de operación. Para finalizar, se muestran las conclusiones de este estudio.

ABSTRACT

For a long time ago, through of science and technology, man has been devoted to discovery and materials development to improve their level and life quality. For these reasons, it is imperious the necessity to find compounds that have the capacity to feel, to act and to control. These compounds are called "intelligent materials", which have the ability to change their physical properties in presence of a certain stimulus. Examples of these are Magnetorheological Fluids (MRF).

This article begins with the theoretical foundations of MRF: definition, history, characteristic, behavior, properties and applications. Then, experimental fluid obtaining is described. Additionally, the magnetic properties and the viscosity of the resulting suspension are evaluated with and without magnetic field, and varying the temperature. Next, magnetorheological prototype proposed is analyzed: elements that form it, test of weight resistance that supports and its respective operation cost. Finally, conclusions of this study are shown.

INTRODUCCION

Las investigaciones y desarrollo de los FMR comenzaron a principios de 1950. Debido al poco interés que generaron en esta época, los estudios en estas suspensiones fueron abandonados. A partir de 1990, se retomaron los análisis de estos fluidos.

En el presente artículo se muestra la descripción general y la obtención experimental de un Fluido Magnetorreológico, así como también su comportamiento bajo diferentes parámetros de medición y una aplicación práctica y sencilla.

Básicamente, un FMR está formado por partículas de hierro, aceite de baja viscosidad y grasa. Esta mezcla sufre una transformación de estado líquido a semisólido cuando se

encuentra en presencia de un campo magnético. Este cambio es el que hace que estos fluidos tengan diversas áreas de utilización, y que la viscosidad sea su propiedad más importante.

Durante el desarrollo de este trabajo, el dilema principal era la generación del campo magnético. Al principio de la experimentación, se utilizó un esquema complicado de usar, y que no brindaba resultados reales por la falta de distribución homogénea de dicho campo alrededor de la suspensión en cuestión. Por esto, se realizaron modificaciones en el bosquejo inicial, y se optó por el uso de una bobina para la creación del magnetismo.

Con la finalidad de determinar el comportamiento de la viscosidad del FMR, se realizaron 3 ensayos. En el primer experimento se evalúa la viscosidad en condiciones ambientales típicas promedio de la ciudad de Guayaquil, esto es una temperatura ambiental de 27°C y una humedad de 70%. Para la segunda prueba se varía la temperatura a la suspensión para verificar si existe una alteración en el valor de la viscosidad. En el tercer ensayo se muestra la variación de la viscosidad del fluido sin campo magnético con respecto al tiempo.

Teniendo una perspectiva más clara de la conducta de los Fluidos Magnetorreológicos, se procedió a construir, montar y probar un prototipo que usara estas suspensiones, que sea de bajo costo y de fácil empleo. Este modelo consiste en un actuador cilíndrico con una bobina. El objetivo de esta adaptación es comparar su funcionamiento con el de un cilindro neumático operando con un compresor de aire.

Al final de este estudio, se indican las conclusiones de las pruebas realizadas con el mencionado fluido.

CONTENIDO

Definición.- Los Fluidos Magnetorreológicos, o FMR, 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 ⁽¹⁾.

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. A pesar del auge de los FMR, poco tiempo después perdieron interés y ya casi no se publicaba información sobre éstos ⁽²⁾.

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.

Características de un FMR.- Los tres elementos básicos que conforman un FMR son:

- Partículas magnéticamente polarizables: Es el polvo de hierro. La fuerza máxima desarrollada por un FMR está directamente relacionada con la cantidad de hierro en el fluido.
- Un líquido transportador: Es un lubricante sintético de baja viscosidad.
- Agentes estabilizadores: Es la grasa.

Comportamiento de un FMR.- Los FMR 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.

- a) **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.
- b) **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.

Propiedades de los FMR.-

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 más importante es la Viscosidad, que es la resistencia que presenta un fluido al movimiento provocado por una fuerza cortante; es su fricción interna. La unidad más usual para expresar la viscosidad es el centipoise (cP).

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

TABLA I

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	50 a 100
Aceite de motor SAE 30	150 a 200
Aceite de motor SAE 40	250 a 500
Aceite de motor SAE 60	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	50.000 a 70.000
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:

- Presenta buena capacidad para lubricar superficies.
- Muestra buena compatibilidad con los materiales de sellos más comunes.
- La temperatura de operación oscila entre -40°C hasta 130°C.
- Los FMR pueden trabajar, sin dificultad, bajo presiones estáticas mayores a 17 MPa.
- La densidad varía entre 2 g/cm³ hasta 4 g/cm³.
- El volumen es constante, independientemente si se está aplicando o no un campo magnético.
- El tiempo de respuesta es menor a 10⁻³ segundos.
- Es amigable con el medio ambiente.

Aplicaciones de los FMR.-

- ♦ **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.

Obtención Experimental de un FMR casero.- Para preparar aproximadamente 100 ml de FMR se requiere:

- ♦ 156 gramos de polvo de hierro, tipo Carbonyl, grado CC.
- ♦ 55 gramos de aceite 3 en 1.
- ♦ 5 gramos de grasa blanca de Litio.
- ♦ Un recipiente plástico de 150 ml, de boca ancha y tapa roscable.

Se coloca el aceite y la grasa en el recipiente plástico para agitarlo vigorosamente durante cinco minutos. Se deja descansar la mezcla durante dos horas, y se la vuelve a sacudir por cinco minutos más. Luego, se añade paulatinamente el polvo de hierro y se revuelve. Cuando la suspensión parezca homogénea, se la coloca en un mezclador de pintura y se bate por 10 minutos ⁽³⁾. Para el presente trabajo se prepararon cuatro muestras de FMR, de 300 ml cada una.

El FMR resultante es de color gris oscuro y tiende a asentarse.



Figura 1: Fluido Magnetorreológico resultante.

Viscosidad del FMR.- A fin de tener un panorama más amplio del comportamiento del FMR resultante, se evaluará la viscosidad bajo las siguientes condiciones de prueba:

- ① A temperatura ambiente, aplicando un campo magnético constante.
- ② Variando la temperatura, aplicando un campo magnético constante.
- ③ A temperatura ambiente, sin aplicar campo magnético.

Los experimentos se realizaron en tres muestras iguales de 200 ml cada una.

Descripción de los equipos y materiales utilizados: Para llevar a cabo las pruebas experimentales, se necesitó de vasos de precipitación, bastón agitador, termómetro, bobina, batería, mezclador eléctrico, hidrómetro, Viscosímetro Brookfield, Agitador Magnético – Calentador y multímetro.

Medición de la Viscosidad Puntual del FMR: Para obtener el valor promedio de la viscosidad del FMR se realizó cinco veces el ensayo para cada una de las tres muestras, y se obtuvo un valor promedio para cada medición. Además, se las hizo bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad.



Figura 2: Toma de Viscosidad Puntual del FMR.

El valor promedio de la Viscosidad Puntual del FMR es de **1'646.000 cP**.

Medición de la Viscosidad Puntual del FMR variando la temperatura: En esta prueba se evaluó la viscosidad del FMR a diferentes temperaturas para apreciar su consecuente comportamiento. Al igual que en el experimento anterior, se realizó cinco veces el ensayo a las tres muestras de FMR para cada temperatura específica, y se obtuvo un valor promedio para cada medición. El incremento de temperatura utilizado es de 20°C. Asimismo, se las hizo bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad.

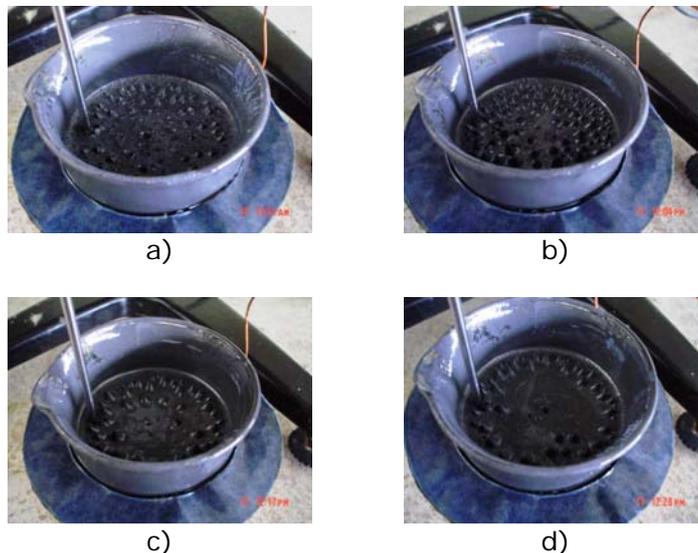


Figura 3: Aspecto del FMR a diferentes temperaturas.
a) A 27°C. b) A 47°C. c) A 67°C. d) A 87°C.

Promediando los resultados obtenidos, se tiene:

TABLA II

Viscosidad Puntual del FMR variando la temperatura

Dato	$T_{prueba\ FMR}$ (°C)	Viscosidad (cP)
1	27	1'648.000
2	47	1'552.000
3	67	1'472.000
4	87	1'400.000

Medición de la viscosidad puntual del FMR sin densidad de campo magnético: Con la finalidad de obtener el valor promedio de la viscosidad del FMR sin densidad de campo magnético, se procedió a medir primero la viscosidad del aceite 3 en 1, para establecer un parámetro de comparación. El resultado de esta evaluación fue **60 cP**. Luego se evaluó la viscosidad de la suspensión. El ensayo se llevó a cabo una vez para cada una de las tres muestras, y se obtuvo un valor promedio para cada medición.

Además, se las hizo bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad.

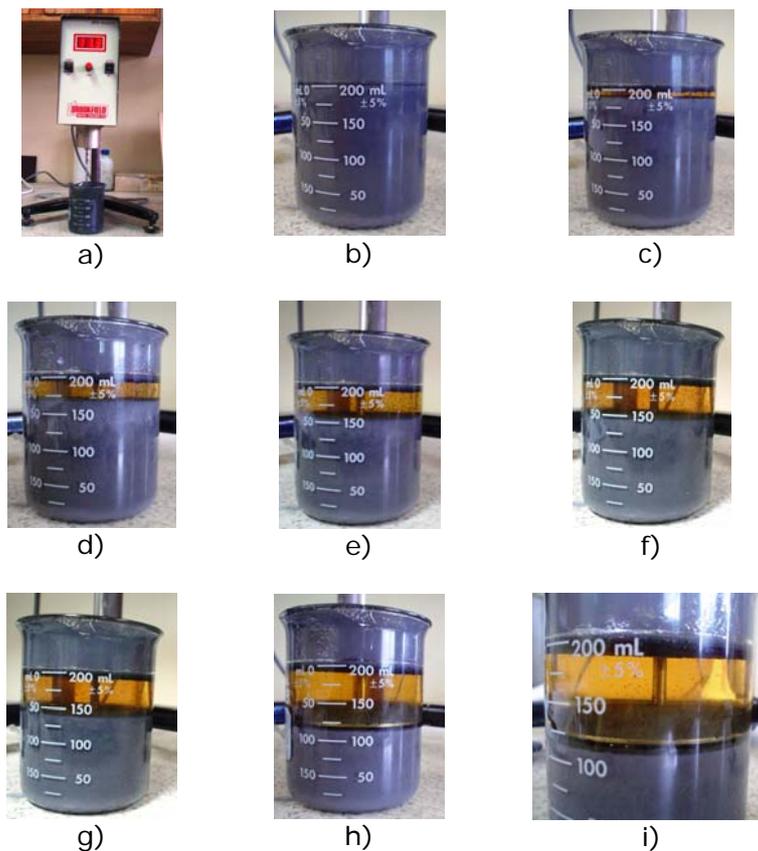


Figura 4: Asentamiento del FMR. a) y b) Al inicio. c) A los 120 minutos. d) A los 240 minutos. e) A los 360 minutos. f) A los 480 minutos. g) A los 600 minutos. h) e i) A los 1540 minutos.

Los datos obtenidos (promedio) son:

TABLA III

Datos y Resultados obtenidos en la prueba de Viscosidad Puntual del FMR sin densidad de campo magnético

<i>Dato</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Viscosidad (cP)</i>
1	0	15.840
2	120	14.400
3	240	19.040
4	360	14.640
5	480	18.400
6	600	16.320
7	1540	80

Construcción, Montaje y Prueba de Resistencia de un Prototipo Magnetorreológico.- Se muestra una aplicación sencilla de los FMR. El prototipo propuesto es un actuador cilíndrico, el cual va a ser sometido a una fuerza de compresión (peso), y se evaluará la resistencia que presente dentro de un contexto estático. Además, se presentará un breve análisis de los costos de operación de dicho equipo.

Características de los elementos a emplear para la construcción y montaje del Prototipo: Además del FMR, la bobina y la batería (fem), se va a precisar de Actuador Cilíndrico, caballete de sujeción del cilindro, racor, manguera, aceiteras, perfil C (base),

pernos, arandelas y tuercas de sujeción, masas patrón, tuerca y placa de soporte de las masas.

Procedimiento experimental: Se procede a acoplar el caballete con el canal para montar el actuador cilíndrico. Luego se conectan los racores con las aceiteras por medio de las mangueras. Se llena una aceitera con FMR y se lo introduce en el cilindro. Al conectar la bobina con la manguera se comienza a añadir masa, hasta que el vástago del actuador descienda. Entonces, ésta masa es el valor límite que se utiliza para el análisis hidrostático del cilindro.



Figura 5: Funcionamiento del Prototipo (Actuador Cilíndrico).

Tabla de datos y resultados: Para encontrar la masa máxima que soporta el FMR dentro del actuador cilíndrico, se comenzó a colocar cargas sobre éste. Entonces, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

TABLA IV

Datos y Resultados de la Prueba de Resistencia del Prototipo

Dato	Masa (g)	Movimiento en el vástago
1	100	No
2	500	No
3	1.000	No
4	1.500	No
5	2.000	Si, comienza a descender
6	1.600	Si, comienza a descender
7	1.550	Si, comienza a descender
8	1.510	Si, comienza a descender
9	1.501	Si, comienza a descender

Entonces, la carga límite que puede soportar el vástago del actuador cilíndrico sin moverse es **1,5 Kg**.

Análisis del resultado obtenido: Por tratarse de un análisis hidrostático, con la masa máxima se puede determinar la fuerza generada en el actuador cilíndrico porque no existe una fuerza de empuje. Entonces, la fuerza está dada por:

$$\text{Fuerza} = \text{masa} \times \text{gravedad} = 1,5 \text{ Kg} (9,8 \text{ m/s}^2) = \underline{14,7 \text{ Newton}}$$

Para hallar el valor de la presión generada se tiene que encontrar el área y el volumen de la suspensión dentro del actuador. Si el radio del cilindro es 0,0125 m, se tiene que:

$$\text{Area}_{\text{FMR}} = \pi r^2 = \pi (0,0125 \text{ m})^2 = \underline{4,91 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

El valor máximo de la presión del prototipo MR propuesto está dado por:

$$F = P_{FMR} A_{FMR}$$

$$P_{FMR} = \frac{F}{A_{FMR}} = \frac{14,7 \text{ Newton}}{4,91 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$P = 29.938,90 \text{ Pa} = 0,29 \text{ bar} = 4,34 \text{ psi}$$

Costos de operación del Prototipo: Dado que el actuador funciona con una batería, el único costo que habría que considerar sería el de la recargada ésta. La batería opera dentro de los rangos requeridos de potencial eléctrico durante 72 minutos. El prototipo va a trabajar como cualquier cilindro neumático, es decir sólo breves instantes; por lo cual, en el más crítico de los casos, la fem usada durará un día. Para que la fuente de voltaje vuelva a estar apta, se usará un *Cargador de Batería*.



Figura 6: Cargador de Batería.

Se procede a calcular la potencia de este equipo:

$$\text{Potencia} = \text{Intensidad} \times \text{Voltaje} = 5 \text{ Amperios} (110 \text{ Voltios}) = 550 \text{ W} = \underline{0,55 \text{ KW}}$$

Sabiendo que el costo de 1 KWH es de \$ 0,10, el costo de operación diario de la recargada de la batería es:

$$\text{Costo de operación diario} = \text{Potencia} \times \text{tiempo de funcionamiento} \times \text{Factor}$$

$$\text{Costo de operación diario} = 0,55 \text{ KW} \times 5 \text{ H} \times \left(\frac{\$ 0,10}{1 \text{ KWH}} \right)$$

$$\underline{\underline{\text{Costo de operación diario} = \$ 0,275}}$$

Si a este costo de operación lo multiplico por un mes laboral (20 días), se obtiene el costo de operación mensual del dispositivo MR:

$$\text{Costo de operación mensual} = \text{Costo de operación diario} \times \text{tiempo} = \$0,275 (20 \text{ días})$$

$$\text{Costo de operación mensual} = \$ 5,50$$

CONCLUSIONES

De acuerdo a la experimentación desarrollada en esta tesis, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. En el presente trabajo se construyó, montó y probó un actuador cilíndrico que usaba Fluido Magnetorreológico. Aunque este prototipo no llegó a los parámetros de

operación de un cilindro neumático (de 1 a 10 bar), ofrece una alternativa de solución cuando las presiones usadas son iguales o menores a 0,29 bar.

2. Cuando el Fluido Magnetorreológico se encuentra magnéticamente estimulado, se vuelve una suspensión muy pastosa. Por esto, el valor de la viscosidad (1'646.400 centipoise), era el esperado.
3. Cuando aumentamos la temperatura a un Fluido Magnetorreológico que tiene una densidad de campo magnético aplicada, disminuye su viscosidad (de 1'648.000 a 1'400.000 centipoise). Esto es algo que se esperaba porque la viscosidad es una propiedad sensible a las variaciones térmicas.
4. La viscosidad del Fluido Magnetorreológico sin densidad de campo magnético disminuyó (15.840 a 80 centipoise). Este hecho se esperaba porque la suspensión tiende a separarse, porque no tiene aditivos viscosificadores que retarden el proceso de asentamiento (fluido casero). También, la velocidad de caída variable de las partículas de hierro provocó la fluctuación en los valores de la viscosidad.
5. La viscosidad del Fluido Magnetorreológico completamente asentado (80 centipoise), era ligeramente mayor a la del aceite 3 en 1 (60 centipoise). Esta diferencia se debe a que la suspensión también tiene grasa en su composición, lo que aumenta el valor de la viscosidad.
6. La masa máxima que puede soportar el Prototipo Magnetorreológico sin presentar movimiento es de 1,5 Kilogramos. Esto generó una fuerza de 14,7 Newton.
7. El costo mensual de funcionamiento del Prototipo Magnetorreológico propuesto es de 5,50 dólares. Este valor corresponde al consumo energético del cargador de la batería; ya que el actuador cilíndrico funciona con una fem.

REFERENCIAS

1. Mark R. Jolly, Jonathan W. Bender, y J. David Carlson, Julio 2006, Properties and Applications of Comercial Magnetorheological Fluids, http://www.lord.com/Portals/_default/LordDocuments/root/white_papers/rheonetic/prop5.pdf
2. J. David Carlson, D. M. Catanzarite y K. A. St. Clair, Comercial Magnetorheological Fluid Devices, Julio 2006, http://www.lord.com/Portals/_default/LordDocuments/root/white_papers/rheonetic/Commercial_MR_Fluid_Devices.pdf
3. J. David Carlson, Julio 2006, <http://literature.lord.com/root/other/DIY-MRFluid.pdf>