

# Propiedades magnetorreológicas en mezclas de aceite automotriz con partículas metálicas

## Magneto-rheological Properties in the Motor Oil Mixtures with Metallic Particles

Marco Antonio Ardila B.\*  
Álvaro Hernando Forero P.\*\*

### Resumen

Un fluido magnetorreológico (MR) es un líquido aceitoso que exhibe una densidad aproximadamente tres veces mayor que la del agua. A este fluido se le puede cambiar de un estado aceitoso a uno cuasisólido en fracciones de segundo, cuando es expuesto a una densidad de campo magnético [1].

En este artículo se presentan los resultados de un estudio comparativo realizado a dos mezclas de prueba, compuestas por dos tipos diferentes de aceite automotor, para las cuales se hizo variar los niveles de concentración y el tipo de partículas metálicas en suspensión. Luego de ejecutar un procedimiento científico basado en un diseño experimental factorial se observaron cambios significativos en la viscosidad del fluido al variar la densidad del campo magnético para cada mezcla. Esto permite concluir que, para los fluidos experimentados, es factible el proceso de caracterización de componentes y optimización para las relaciones de mezcla en observancia de aplicaciones mecánicas y civiles.

### Abstract

A Magneto-rheological fluid (MR) is an oily liquid around three times the water density. This liquid can be changed in a second fractions from an oily state to a near-solid one, when exposed to a magnetic field's density [1].

Here are presented the results of the comparative study, carried out in two mixtures tests, composed by two different motor oil types, each one of them under went changes in the concentration level and in the metallic particles type in suspension. After carrying out a scientific procedure based upon a factorial experimental design, there were observed significant changes in the fluid viscosity when varying for each sample the magnetic field density. In conclusion, for the tried fluids it is feasible the process to characterize the parts and to improve the composition ratio of mixtures, to project mechanical and civil applications, taking into account the mechanical and civil requirements.

\* Profesor catedrático Escuela de Metalurgia UPTC – Tunja. Investigador Grupo de Carbones y Carboquímica UPTC – Tunja.

\*\* Director Grupo de Investigación en Materiales Siderúrgicos-UPTC.

## Introducción

El desarrollo de nuevos materiales y recursos energéticos para sustitución de otros o para su aplicación en nuevos desarrollos tecnológicos ha sido una constante en años recientes. Esta labor necesita de recursos económicos y de un recurso humano calificado que disponga de sus capacidades para el desarrollo sostenible de estas tecnologías. Es así como se cuenta con avances insospechados en la carrera espacial, en los sistemas de telecomunicaciones, en los sistemas para el control y la automatización de procesos industriales, entre otras áreas.

En la actualidad, el uso de los fluidos magnetorreológicos (MR) se extiende a la industria automotriz [2], al sector militar y de defensa, a la ingeniería civil, la industria de electrodomésticos y la medicina [3], para su aplicación en el diseño de sistemas de suspensión primaria, protección de pasajeros, suspensión de sillas, suspensión de cabinas, protección sísmica en puentes y edificios, lavadoras de ropa y prótesis de articulaciones. El sistema nervioso de futuros robots podría usar fluidos MR para mover articulaciones y extremidades de forma semejante a los seres vivos; igualmente, surgen nuevas ideas para su aplicación en el tratamiento de tumores [4].

En países como Colombia, donde la investigación y el desarrollo tecnológico aún no han alcanzado su mejor nivel, la implementación de principios desarrollados y aplicados en tecnologías de punta es una opción importante para el mejoramiento de técnicas y el aprovechamiento de recursos o la reutilización de productos de desecho.

A partir de estas consideraciones este artículo presenta los resultados de un procedimiento científico experimental que evaluó las capacidades magnéticas de dos mezclas de base aceite preparadas inicialmente en los laboratorios de la Universidad del Norte, en Barranquilla, y posteriormente en los de la Universidad Antonio Nariño y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en Tunja. Al término del análisis de los resultados del experimento, se evidenció una relación entre la viscosidad del fluido y la densidad del campo magnético aplicado alrededor

del fluido, lo que permite afirmar que cada mezcla exhibe propiedades magnetorreológicas que hacen factible su desarrollo para aplicaciones tecnológicas nacionales.

En la primera parte del artículo se presenta una breve revisión del concepto de fluido MR y de los materiales empleados para el desarrollo del experimento; en la segunda parte se presentan los detalles del diseño y ejecución del procedimiento experimental ejecutado; en la tercera se presenta el análisis de los resultados obtenidos en el experimento, y en la parte final se presentan las conclusiones y proyecciones de futuros trabajos.

## 1. Fluidos magnetorreológicos (MR)

Un fluido MR es un líquido aceitoso con una densidad promedio tres veces mayor que la del agua. A los fluidos MR se les puede modificar su viscosidad cuando se les sumerge en medio de un campo magnético [5]. Su construcción típica está compuesta por tres elementos. El primero es un material aceitoso, usualmente derivado de un hidrocarburo, que sirve de soporte a un gran número de micropartículas ferrosas. El segundo, usualmente, es hierro carbonilo de alta pureza, con una granulometría promedio entre 3 y 5 mm, adicionado en proporciones del 20 al 40% en masa. El tercer elemento es un aditivo antigravitacional, cuya función es tanto inhibir el efecto de la fuerza gravitacional sobre las partículas de hierro para mantenerlas en suspensión, como mejorar las propiedades lubricantes del fluido y reducir el desgaste generado por los cambios de la viscosidad del material aceitoso [6].

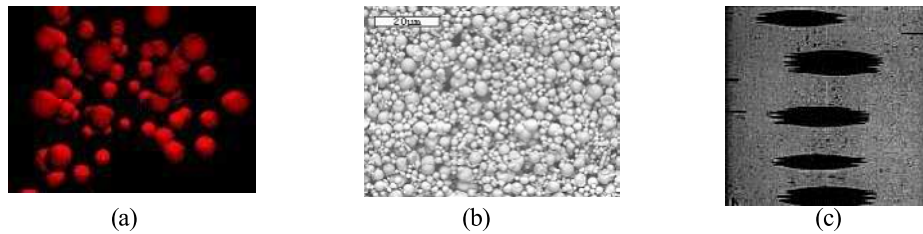
El descubrimiento de este tipo de fluidos se acredita a Jacob Rabinow, mientras trabajaba en la U.S. National Bureau of Standards (actualmente, National Institute of Standards and Technology), hacia 1940. Uno de los mayores impactos de los fluidos MR ha sido la aplicación en soluciones para amortiguar las vibraciones producidas durante los terremotos o las fuertes ráfagas de viento que afectan puentes y edificios [7].

En la figura 1 se observan las micrografías del



comportamiento de un fluido MR ante un campo magnético. En el aparte (a) se observan esferas de carbonilo en suspensión, sin que el fluido esté sumergido en un campo magnético. En el aparte (b) se tienen las mismas esferas de carbonilo, pero ahora

bajo el efecto de un campo magnético continuo. En el aparte (c) se tienen las esferas de carbonilo bajo la acción de un campo magnético pulsante con una intensidad de 1480 A/m. y una frecuencia de 2 Hz.



Fuente: [www.google.com/Institute of Material Science and Applied Mechanics](http://www.google.com/Institute%20of%20Material%20Science%20and%20Applied%20Mechanics), 2004.  
 Figura 1. Micrografías del comportamiento de un fluido MR ante un campo magnético.

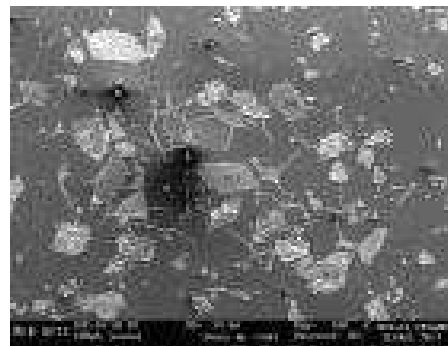
## 2. Materiales empleados en el análisis experimental

Para el desarrollo de las pruebas experimentales de las que da cuenta el presente artículo, se empleó como material metálico la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  o  $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), también conocida como óxido ferroso-férrico u óxido de hierro magnético. Este material exhibe propiedades magnéticas elevadas y se halla compuesto en un 72,4% por hierro y 27,6% restante por oxígeno; a esta relación se le considera magnetita en estado puro. La gravedad específica es aproximadamente de 5 g/cm<sup>3</sup> y cristaliza en red cúbica. Las impurezas más comunes encontradas e íntimamente relacionadas con este mineral son el titanio, magnesio, aluminio, níquel, cromo, vanadio y manganeso [8].

La muestra empleada en el experimento hace parte de un estudio realizado a un yacimiento ubicado en el municipio de Payandé en el departamento del Tolima [9]. A la muestra se le practicaron tanto un análisis químico como un análisis por espectrometría de absorción y análisis por microscopía electrónica, a una con granulometría menor a malla 100.

En la figura 2 se tiene el resultado de una micrografía

de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), a 200X donde se identificaron tres tipos diferentes de fases, las cuales se presentan para su análisis en la figura 3.



Fuente: MEB UPTC  
 Figura 2. Micrografía MEB de la muestra de magnetita.

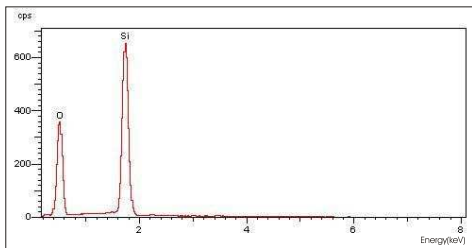
En la tabla 1 se muestran los resultados en porcentaje de los dos primeros análisis mencionados; los elementos no registrados en ella corresponden a inclusiones dispersas de aluminio, oxígeno y algunos otros microconstituyentes que forman compuestos no identificados para este estudio.

Tabla 1. Resultados del análisis químico y de espectrometría

ELEMENTO	ANÁLISIS QUÍMICO	ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN
Hierro	42,3	41,3
Magnesio	0,8	
Silicio	10,6	10,6
Manganeso	0,6	
Calcio	16,5	20,9

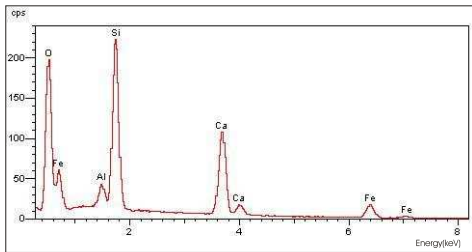
En la figura 3 (a), (b) y (c) se registra el espectro de cada una de las fases de la micrografía.

Figura 3. Espectro de las fases



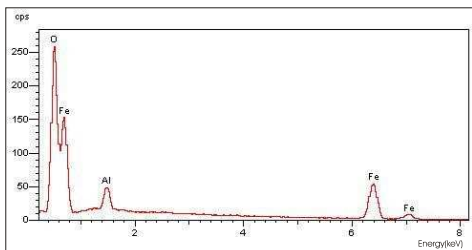
(a)

**Espectro fase (A).** El microanálisis a 5000X muestra alta presencia de oxígeno y silicio, indicando que se trata de granos de silice.



(b)

**Espectro fase (B).** Los picos más altos son de oxígeno, calcio y silicio; sin embargo, el microanálisis a 5000X muestra que los elementos de mayor presencia son: oxígeno, silicio, hierro, aluminio y calcio. Se concluye que este grano es de un silicato aluminoso de calcio y hierro.



(c)

Fuente: MEB UPTC

**Espectro fase (C).** En (C) los picos más elevados son de hierro y oxígeno. En el microanálisis a 5000X se observa la presencia de oxígeno, hierro y aluminio; por lo tanto, esta fase contiene óxido de hierro con trazas de aluminio.

En la tabla 2 se registran los porcentajes de microconstituyentes de cada fase, determinados en el MEB.

Tabla 2. Resultados del Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido.

ELEMENTO	FASES		
	(A)	(B)	(C)
Oxígeno	29,6	26,5	60,1
Silicio	70,4	40,7	
Calcio		23,8	
Hierro		4,2	27,6
Aluminio		4,8	12,3

Finalmente, el fluido aceitoso empleado fue de dos tipos, a saber: aceite lubricante automotor de la casa Mobil, referencia 20W40, sin usar, y aceite lubricante automotor de la casa Mobil, 20W50, de primer cambio, el cual contiene partículas metálicas que provienen del desgaste propio del motor durante el primer periodo de trabajo.

### 3. Diseño experimental

El experimento ejecutado obedeció a un diseño factorial de dos réplicas [10]. Se seleccionaron tres factores experimentales a saber: intensidad de campo magnético, identificado como factor A; la concentración de partículas metálicas en la mezcla, identificado como factor C, y el tipo de mezcla definido por la composición, identificado como factor B.

Para el factor A se tomaron tres niveles, a saber: 0 teslas, 0,053 teslas y 0,106 teslas. Para el factor C se tomaron tres niveles a saber: 1,7% de concentración, 3,3% de concentración y 4,9% de concentración. Para el factor B se tomaron dos niveles definidos por el tipo de mezcla, a saber: mezcla 1 y mezcla 2.

Cada mezcla evaluada fue preparada en los laboratorios bajo las siguientes especificaciones: la mezcla 1 se construyó a partir del aceite lubricante automotor Mobil 20W40 sin usar. A este aceite se le

adicionó magnetita de 72,4% de hierro y granulometría por debajo de malla 150, con las variaciones en la concentración de magnetita indicada por los niveles del factor C. La mezcla 2 se construyó a partir del aceite lubricante automotriz 20W50 de primer cambio, modificando la concentración de las partículas metálicas contenidas en él, de acuerdo con los niveles referidos para el factor C.

Es importante anotar que para el experimento no se tuvieron en cuenta los cambios que sufre el aceite usado en sus propiedades fisicoquímicas a causa de las altas temperaturas, la fricción o la granulometría de las partículas.

Las pruebas se realizaron variando la intensidad del campo magnético en tres niveles, en función del tiempo de desplazamiento de un volumen fijo de fluido, para determinar el caudal, en un dispositivo diseñado específicamente para este fin. El caudal registrado debe relacionarse con la densidad de cada una de las mezclas y el Número de Reynolds, para determinar la viscosidad.

Dispositivo para medición de caudal (figura 4). Para el experimento se diseñó un dispositivo compuesto por un par de jeringas conectadas por una manguera cuyo diámetro es de 1/16". Esta manguera fue enrollada en una vuelta en el electroimán, cuyo campo magnético generado es regulado a través de una fuente de voltaje variable [11]. Todos estos componentes fueron fijados y asegurados en una estructura de madera. El análisis matemático de los resultados de las primeras pruebas de funcionamiento permite afirmar que la fuerza aplicada para el desplazamiento del émbolo de la jeringa ubicada en

la parte superior de la estructura fue de 3,7 kg [11]. Por otra parte, el volumen del fluido desplazado fue de 40 ml. La variable de respuesta observada fue el flujo volumétrico del fluido MR. El dispositivo puede observarse en la figura 4.

Figura 4. Dispositivo para medición de caudal



Fuente: Los autores

## 4. Resultados

En la tabla 3 se registran los flujos volumétricos medidos como resultado del experimento aplicado. Luego se desarrolló un análisis de varianza para estimar qué valores afectan significativamente el flujo volumétrico de la mezcla ensayada. En la tabla 4 se registran los resultados del análisis mencionado [10]. El indicador  $F_0$  significa estadístico de prueba, mientras que el indicador  $F_c$  significa estadístico experimental.

Tabla 3 Flujos volumétricos de la experimentación.

(A) INTENSIDAD CAMPO MAGNETICO (Teslas)	(B) MEZCLA TIPO 1			(B) MEZCLA TIPO 2 (C)			
	PARTICULAS METÁLICAS (% en masa)			(C) PARTICULAS METÁLICAS (% en masa)			
	1,7	3,3	4,9	1,7	3,3	4,9	
0	15,267	12,461	9,412	10,554	6,969	6,557	ml/s
0,053	15,385	12,500	9,479	10,638	6,993	6,504	ml/s
	13,605	11,976	9,009	10,499	6,944	6,369	ml/s
0,106	13,652	12,012	8,949	10,363	6,932	6,329	ml/s
	11,869	11,364	8,830	10,178	6,861	6,299	ml/s
	11,834	11,429	8,811	10,256	6,838	6,279	ml/s

Fuente: Los autores

Tabla 4 Análisis de varianza sobre el experimento desarrollado.

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	Fo	Fe
A	58722,1	2	29361,1	1497,6	3,6
B	1190960,5	1	1190960,5	60745,3	4,4
C	1110363,6	2	555181,8	28317,2	3,6
AB	32735,5	2	16367,8	834,8	3,6
AC	27024,8	4	6756,2	344,6	2,9
BC	91423,9	2	45711,9	2331,6	3,6
ABC	20504,8	4	5126,2	261,5	2,9
ERROR	352,9	18	19,6		
TOTAL	2532088,2	35			

Fuente: Los autores

El análisis de varianza muestra que en ningún caso el estadístico de prueba  $F_0$  es mayor al cuadrado medio de ninguno de los factores ni de las interacciones; por lo tanto, se asume que en ningún caso hay efecto significativo sobre la variable respuesta. Sin embargo, se observa también que el cuadrado medio de la interacción entre la intensidad del campo magnético (A) con el tipo de mezcla (B) presenta un ligero acercamiento al estadístico de prueba. Esta misma condición aplica con mayor énfasis para las interacciones entre A con la concentración de partículas magnéticas en las mezclas (C) y entre AB y C. Esta tendencia podría interpretarse como una explicación a los ligeros cambios de caudal detectados durante la experimentación.

Análisis de los residuos y de la adecuación del modelo. Antes de adoptar conclusiones del Análisis de Varianza, se verifica la adecuación del modelo fundamental, para lo cual se hace el análisis de residual, el cual se obtiene a partir de la ecuación (1) y se registra en la tabla 7:

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} \quad (1)$$

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \bar{y}_{ij}$$

Donde:

$e_{ijk}$  Residual de las observaciones

$\hat{y}_{ijk}$  Valor ajustado (promedio de las observaciones de la celda ij-ésima).

Tabla 7. Residuales

INTENSIDAD CAMPO MAGNETICO (Teslas)	MEZCLA ACEITE MAGNETITA			MEZCLA ACEITE PARTIC METAL		
	CONCENTRACIÓN PARTICULAS MAGNETICAS (%)			CONCENTRACIÓN PARTICULAS MAGNETICAS (%)		
	1,7	3,3	4,9	1,7	3,3	4,9
<b>0</b>	-5,9	-1,9	-3,3	-4,2	-1,2	-2,7
	5,9	1,9	3,3	4,2	1,2	2,7
<b>0,053</b>	-2,3	-1,8	3,0	6,8	0,6	2,0
	2,3	1,8	-3,0	-6,8	-0,6	-2,0
<b>0,106</b>	1,8	-3,2	1,0	-3,9	1,2	1,0
	-1,8	3,2	-1,0	3,9	-1,2	-1,0

Fuente: Los autores

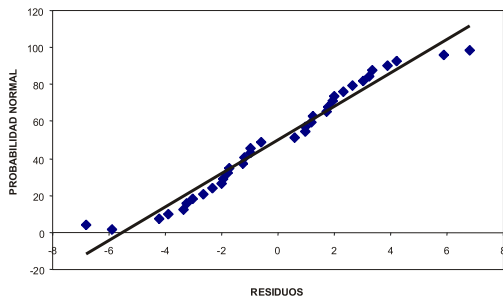


Figura 5. Gráfica de Probabilidad normal de los residuos

En la figura 5 se observan los resultados de aplicar la prueba de ajuste a la curva de probabilidad normal. Se observa que no existen puntos atípicos que rebatan las primeras conclusiones del experimento, como son el que no se detectó un factor significativo sobre el flujo volumétrico de la sustancia.

En la figura 6 se observan los resultados de aplicar la prueba de residuos para la intensidad de campo magnético. En la figura 7 se observan los resultados de la prueba de residuos para el tipo de mezcla y en la figura 8 se observan los resultados de la misma prueba para la concentración de magnetita en la mezcla.

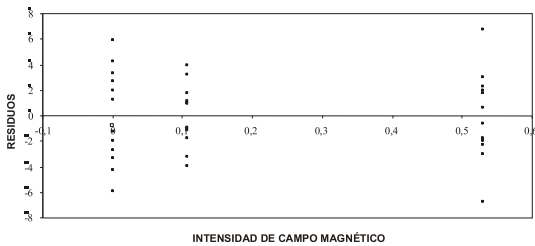


Figura 6. Gráfico de Residuos contra Intensidad de Campo Magnético.

De la figura 6 se puede observar un comportamiento simétrico que podría interpretarse como un error durante la fase del diseño experimental. Sin embargo, a partir de los resultados del análisis de varianza y de la prueba de ajuste a la curva de probabilidad normal, se desecha esta primera afirmación.

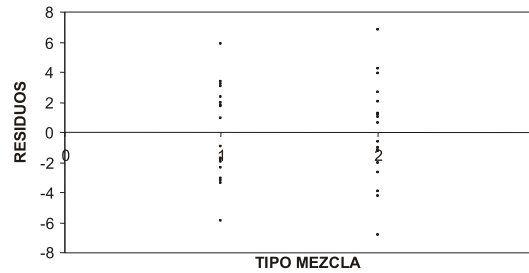


Figura 7. Gráfico de Residuos contra Tipo de Mezcla.

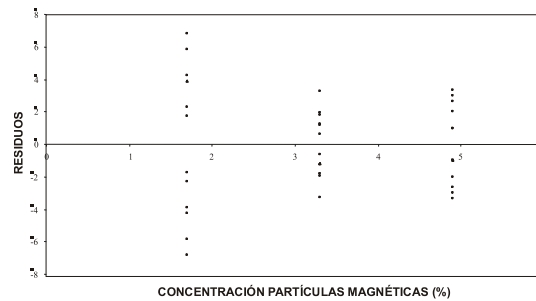


Figura 8. Gráfico de residuos contra la Concentración de Partículas Metálicas.

De la figura 7 y de la figura 8 se observa un comportamiento heterogéneo en la distribución; esto es, no se detecta ningún tipo de uniformidad o tendencia de comportamiento, lo que respalda los resultados de normalidad del experimento.

Para definir el conjunto de condiciones bajo las cuales se tiene un factor que incide significativamente sobre la viscosidad del fluido, inferida a partir de las variaciones del flujo volumétrico, se generaron promedios por cada combinación del experimento ejecutado y se realizó un análisis comparativo de medias. Esta prueba se analiza a través del criterio del análisis de Tukey y se procede como sigue:

Análisis por comparaciones múltiples. Para establecer diferencias específicas entre niveles de los factores correspondientes al tipo de mezcla (B) y concentración de partículas magnéticas (C) en función de la Intensidad del Campo Magnético (A), se aplicó una prueba Tukey, de acuerdo con la ecuación (2). Los resultados se registran en la tabla 8.

$$T_{\alpha} = q_{\alpha(N,f)} \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (2)$$

INT CAMPO	MZCMAGNETITA			MZC PART MET		
MAGNET	1.7	3.3	4.9	1.7	3.3	4.9
0	42.4	12.2	11.7	4.1	1.1	4.5
0.053	86.9	27.1	15.6	9.5	3.3	6.0
0.106	44.4	14.9	4.0	5.3	2.2	1.5
PRUEBA DE TUKEY						
Nivel de significación $\alpha = 0.005$				MSE 19.6		
Niveles Campo Magnético N = 3				n (replicas) 4		
Grados de libertad del error f = 18				$q_{\alpha}(N,f) = 3.61$		
				T 0.05 = 8.0		

Tabla 8. Diferencias entre promedios de factores

La comparación permite ver que el caudal varía significativamente en la mezcla de magnetita, cuando su concentración es de 4,9% y la intensidad del campo magnético aplicada es de 0,106 Teslas. En el caso de la mezcla de partículas metálicas, el nivel que no sugiere cambio significativo en el caudal del fluido corresponde a la concentración de 1,7% con intensidad de campo magnético de 0,053 Teslas. En términos generales, el fluido de prueba que presenta mejor comportamiento como fluido MR es el aceite automotor de primer cambio.

## 5. Conclusiones

Los resultados experimentales muestran ligeros cambios de caudal, que relacionados con el Número de Reynolds y la densidad de cada fluido [12] definen los cambios de viscosidad que sugieren la presencia de propiedades magnetorreológicas en los dos tipos de mezcla, a medida que se incrementa la concentración de partículas magnéticas y la intensidad del campo magnético.

El hecho de que en el análisis de varianza no se observe efecto significativo de ninguno de los factores, ni de sus interacciones, sobre la viscosidad

de los fluidos, se explica al comparar algunas variables de los fluidos magnetorreológicos (FMR) de alta tecnología con las mezclas de prueba, así:

PROPIEDAD	FLUIDO MR	MEZCLA 1	MEZCLA 1
Partículas	Hierro alta pureza	Óxido de hierro	Metal composición desconocida
Geometría de partículas	Esferas	Desconocido	Desconocido
Granulometría de partículas	3 a 5 micras	Menor a malla 150	Desconocida
Contenido de partículas	20 a 40%	Máx. 4,9%	Máx. 4,9%
Líquido de suspensión		Móvil 20W40	Móvil 20W50 (usado)
Aditivos antigraavitacionales	Aplicados según fabricante	No aplicados	No aplicados

Tabla 9. Comparativo de características entre fluidos MR de alta tecnología y las mezclas de prueba.

Las mezclas probadas presentan variación en su fluidez ante la aplicación de un campo magnético, de forma homóloga al comportamiento de los Fluidos Magnetorreológicos. Esta condición justifica la profundización de este estudio preliminar, hasta caracterizarlas con el fin de probar posibles aplicaciones en dispositivos mecánicos y procesos.

## 6. Referencias

- [1] G. Yang, B. F. Spencer, J.D. Carlson and M. K. Sain: "Large-Scale MR fluids dampers: modeling, and dynamic performance consideration", Engineering Structures, 24 (3), pp. 309-323, 2002.
- [2] [www.inovacaotecnologica.com.br/fluidos magnetorreologicos poderao revolucionar suspensoes de veiculos.htm](http://www.inovacaotecnologica.com.br/fluidos-magnetorreologicos-poderao-revolucionar-suspensoes-de-veiculos.htm)
- [3] <http://www.lord.com/Aplicaciones>
- [4] [www.astroseti.org/fluidos magnetorreologicos asombrosos](http://www.astroseti.org/fluidos-magnetorreologicos-asombrosos)
- [5] I.A. Brigadnov, A. Dorfmann, "Mathematical modeling of magnetorheological fluid", in continuum Mech. Thermodyn. No. 17, pp. 29-42, February 2005.



- [6] Lord Materials Division, "Designing with MR Fluids", Engineering Note, Lord Corporation, Thomas Lord Research Center, Cary, NC, November 1999.
- [7] M.R. Jolly, J.D. Carlson and J.W. Bender, "Properties and applications of commercial rheological fluids," SPIE 5th Annual International Symposium on Smart Materials and Structures, San Diego, CA, 15 March, 1998.
- [8] Cornelis, Klein y Cornelius S., Hurlbut: Manual de Mineralogía. 4 ed. Barcelona: Reverté, 1996. pp. 299-303.
- [9] Forero Pinilla, Álvaro H. y Acosta Hernández, Yesid Rolando: Diseño de un concentrador magnético tipo tambor. Tesis de grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2004.
- [10] Montgomery, Douglas: Diseño y Análisis de Experimentos, segunda edición. México: Edit. LIMUSA- WILEY, 2002.
- [11] Resnick, Robert; Holliday, David: Física, cuarta edición. México: Edit. CECSA, 1982.
- [12] Cartesegna, Domenico: Manual del químico y del ensayador: Colección de métodos de análisis y ensayos. La Paz: América, 1972.

Fecha de recepción: 5 de junio de 2006  
 Fecha de aprobación: 5 de julio de 2006

