

# Modelamiento de Fluidos Magnetoreológicos (FMR) Producidos con Magnetita Mineral

Para citar este artículo /  
To reference this article /  
Para citar este artigo.  
Molina, G. Claudia P., &  
Triviño, R. María D., &  
Ardila, B. Marco A (2014).  
Modelamiento de Fluidos  
Magnetoreológicos (Fmr)  
Producidos con Magnetita  
Mineral. Ingenio Magno. Vol  
5, pp. 120 - 127

## MODELLING OF MAGNETORHEOLOGICAL FLUID PRODUCED BY MINERAL MAGNETITE

Claudia P. Molina G, M.Sc.  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de  
Colombia, Tunja-Colombia  
e\_mail: claudia.molina@uptc.edu.co

Pilar Triviño R, M.Sc.  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de  
Colombia, Tunja-Colombia  
e\_mail: pilar.trivino@uptc.edu.co.

Marco A. Ardila B, M.Sc.  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de  
Colombia, Tunja-Colombia  
e\_mail: marco.ardila@uptc.edu.co.

Alonso Hernández M, M.Sc.(e)  
Universidad Santo Tomás, Tunja-Colombia  
e\_mail: alonso.hernandez@usantoto.edu.  
co.

Recepción: 2014 - 7 - 30 \ Aceptación: 2014 - 12 - 30

### RESUMEN

Esta investigación establece la correlación entre los resultados del cambio de densidad de un FMR, expuesto a un campo magnético de intensidad variable, con los resultados de la simulación del sistema por elementos finitos, en ANSYS. A nivel de laboratorio se prepararon doce muestras de FMR, con: magnetita mineral como material magnético molida a 325, 400 y 500 mallas; aceites 20W30 y 20W50 como fluidos de transporte y aditivos anti gravitacionales y antiaglomerantes. Con el FMR de mayor estabilidad fisicoquímica (baja reactividad y sedimentación), se realizaron pruebas de variación de la densidad, en función de la intensidad de un campo magnético. La correlación de los resultados de las pruebas de laboratorio con los resultados de la simulación, fue de 0.92, lo cual indica que la predicción del comportamiento de la densidad del FMR, en presencia de un campo magnético de intensidad variable, es un procedimiento confiable.

**Palabras Claves:** Campo magnético, Elementos Finitos, Fluido Magnetoreológico, Simulación.

### ABSTRACT

This investigation was focused on establishing a correlation between the density results found by varying the magnetic field strength applied to an FMR, with regards to the finite element simulation in ANSYS. For this FMR 12 samples were prepared with mineral magnetite meshes 325, 400 and 500 as a magnetic material and commercial 20W30 and 20W50 oils as carrier fluids and anti gravitational and anti agglomeration additives. After obtaining the FMR, the most stable sample was selected to carry out the density tests of the magnetic field in a laboratory setting. In the simulation phase the pre-processing of the model was performed to define the geometric model, the parameterization of material and geometric properties of the model, the model meshing defining loads and boundary conditions. The validation of the simulation with respect to laboratory results generated a correlation of 0.92, revealing that through the simulation it is possible to establish the behaviour of the FMR density in the presence of a magnetic field.

**Keywords:** Finite Elements, Magnetorheological Fluid, Magnetic Field, Simulation.

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de los materiales inteligentes [1], se puede transformar energía fotovoltaica, termoeléctrica, piezoeléctrica, electrostrictiva o magnetostrictiva, entre otras, y tienen propiedades múltiples, que pueden ser modificadas usando agentes externos [2]. Dentro de esta clasificación están los materiales piezoeléctricos, electro y magnetostrictivos y electro y magnetoreológicos [3]; de esta manera se abre un sin número de posibilidades para experimentar nuevas aplicaciones.

Los fluidos magnéticos, compuestos por partículas magnéticas sólidas de tamaño muy pequeño, con alta densidad suspendidas en un líquido portador, en ausencia del campo magnético se comportan como newtonianos; pero un campo magnético externo hace que las partículas se ordenen en dirección de las líneas del flujo magnético. (Gráfica 1).



FIGURA 1. A. Partículas suspendidas.  
B. Partículas alineadas con campo magnético.

Para que sean estables, se debe disponer de partículas magnéticas monodispersas de tamaños controlados, separadas y protegidas de la aglomeración y oxidación de las partículas metálicas [5].

## 2. MARCO TEÓRICO

**2.1 Fluidos Magnetorreológicos:** Se define como un sistema formado por partículas de carácter ferromagnético o ferrimagnético, entre 0.1 – 10  $\mu\text{m}$ ., suspendidas en un fluido portador, con capacidad de variar su fluidez de manera rápida y significativa en presencia de un campo magnético moderado. Este sistema puede cambiar desde

un estado de fluido normal de baja viscosidad, hasta un fluido con elevado esfuerzo de alta viscosidad. Las variables responsables de las características y propiedades de los FMR [6] son: tipo, tamaño, distribución, geometría, y cantidad de partículas magnéticas; con respecto al fluido portador, viscosidad, comportamiento térmico y químico, aditivos para control de sedimentación, tixotropía y estabilidad. El esfuerzo necesario para llegar al punto de fluencia se llama 'esfuerzo de fluencia' o esfuerzo umbral, habitualmente es de 50-100 kPa para campos magnéticos aplicados de 150-250 kA/m (~2-3 kOe) y una viscosidad sin campo magnético de 200-300 mPas a 25°C. Las propiedades magnéticas dependen a su vez de las propiedades intrínsecas de las partículas magnéticas. Una partícula que responde al campo magnético rota en su propio momento; en el sólido la rotación sucede dentro de la partícula, que se conoce como relajación de Néel. En el FMR también ocurre la rotación por difusión rotacional Browniana [7].

### 2.2 Método de los Elementos Finitos:

El MEF, es un método numérico avanzado que permite obtener una aproximación de la solución de un problema de contorno, asociado a una ecuación diferencial, ordinaria o en derivadas parciales, bajo ciertas condiciones de frontera [8]. Muchos problemas en ingeniería han sido descritos en términos de ecuaciones de diferenciales parciales, las cuales no se pueden resolver con métodos analíticos clásicos. El MEF es una aproximación numérica por la cual esas ecuaciones pueden ser resueltas. Millones de ingenieros y científicos en el mundo usan el MEF para predecir el comportamiento de sistemas, para diseñar y realizar análisis [9].

## 3. METODOLOGÍA DESARROLLADA

La investigación es de tipo experimental, en cuatro fases: Fase I: Estudio y análisis del marco teórico y del estado del arte. Fase II: Modelamiento del sistema FMR [10]. Fase III: Experimentación. Fase IV: Validación. Gráfica 3.

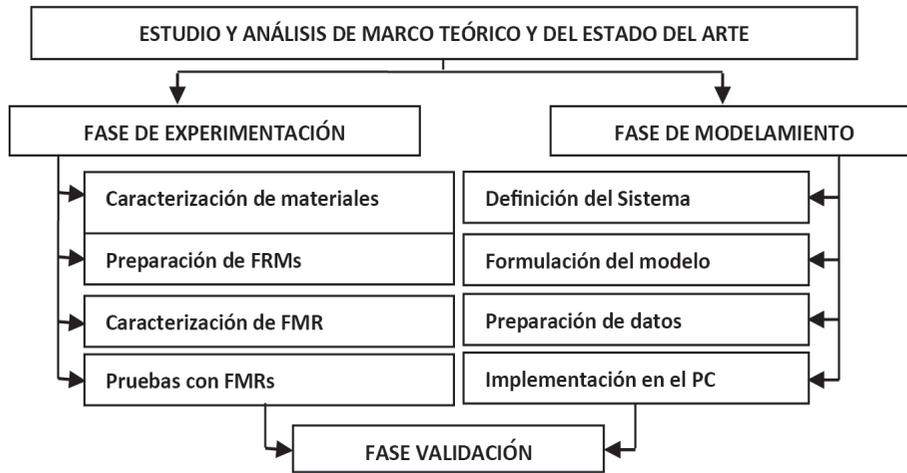


FIGURA 3. Diagrama de flujo de la Metodología.

## 4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Caracterización de la magnetita: Análisis realizados: Petrografía (gráfica 4).

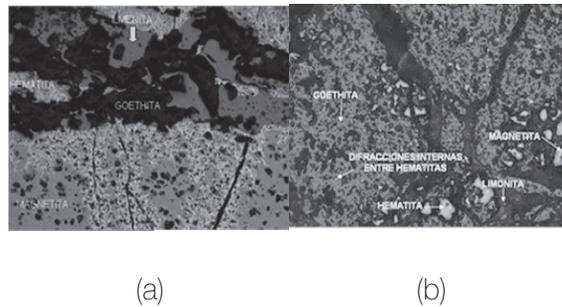


FIGURA 4. (parte clara), con presencia de ilmenita, goethita, hematita y limonita. (b) Algunas difracciones internas entre hematitas. Fuente. Microscopio Petrográfico IRME – UPTC

Difracción de Rayos X {DRX}. Se confirma presencia de magnetita (62.4%), y de hematita, (24.4%); además de ilmenita, goethita y limonita.(gráfica 5).

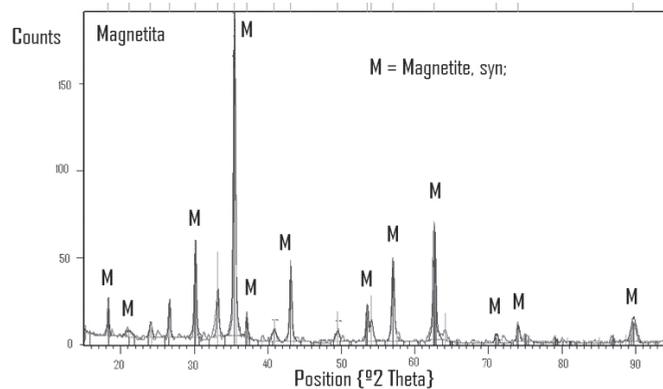


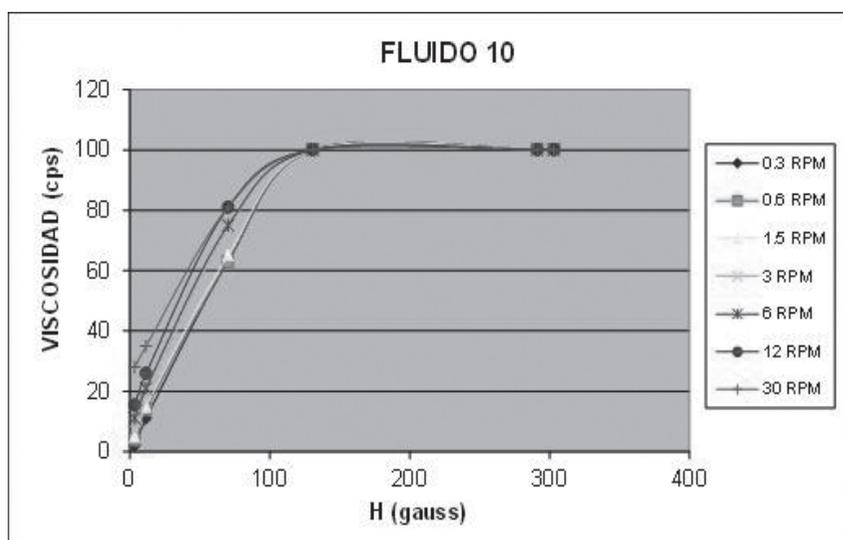
FIGURA 5. Difractograma del mineral. Fuente. Equipo de DRX. Grupo GESEC -UPTC

**4.2 Preparación de los FMR:** Se prepararon 12 muestras de FMR con magnetita {Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>}, proveniente de la región de la Jagua de Ibirico (Cesar-Colombia), con tamaños de grano: finos [11] de 0.025 μm (malla 500), 0.038 μm (malla 400) y 0.045 μm (malla 325). Como fluido portador se emplearon aceites de referencias 20W30 y 20W50 [12]; adicionando una mezcla de sustancias tensoactivas, antigraavitacionales y antiaglomerantes, al 8% [13]. Se siguió el procedimiento propuesto en la investigación para obtener ferrofluidos a partir de magnetita mineral [14], realizada por el Grupo de Carbones y Carboquímica de la UPTC [15]. (Tabla 1)

**TABLA 1: Preparación de los Fluidos**

FLUIDO DE TRANSPORTE	TAMAÑO DE MAGNETITA					
	MALLA 325 (Concentración)		MALLA 400 (Concentración)		MALLA 500 (Concentración)	
	15 % BLOQUE 1	20 % BLOQUE 2	15 % BLOQUE 3	20 % BLOQUE 4	15 % BLOQUE 5	20 % BLOQUE 6
SAE 30	Fluido 1	Fluido 2	Fluido 5	Fluido 6	Fluido 9	Fluido 10
SAE 50	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 7	Fluido 8	Fluido 11	Fluido 12

**4.3 Caracterización de los fluidos magnetorreológicos:** Se realizaron pruebas de Viscosidad con un equipo marca BROOKFIELD [16], en presencia de un campo magnético de intensidad variable; se observó un incremento de la densidad, proporcional a la intensidad del campo magnético, (gráfica 6). La simulación en ANSYS se realizó con los datos del fluido 10, el cual presentó mejor comportamiento como FMR. Las pruebas de densidad en función del campo magnético, presentaron un comportamiento homólogo a la viscosidad, (gráfica 7).



**FIGURA 6.** Comportamiento de la viscosidad a diferentes intensidades de campo magnético.

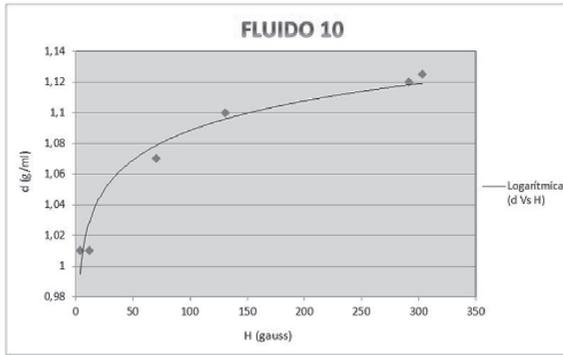


FIGURA 7. Comportamiento de la densidad al incrementar la intensidad de campo magnético.

#### 4.4 Fase Modelamiento.

**4.4.1 Definición de Sistema.** La técnica para la obtención de flotados y hundidos de un mineral no magnético consiste en la levitación y hundimiento selectivos, con base en las densidades de la partícula y del medio de separación. Cuando un FMR se expone a un campo magnético externo, aumenta su densidad con el aumento de la intensidad del campo. El modelamiento gráfico de la levitación de una partícula no magnética en un FMR, corresponde a la gráfica 8.

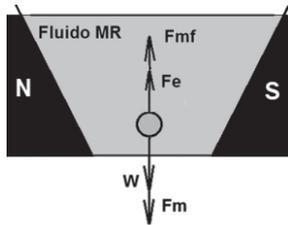


FIGURA 8. Análisis de fuerzas sobre una partícula magnética

Donde *N* y *S* representan los elementos generadores del campo magnético con gradiente en función de la altura; *F<sub>m</sub>*, fuerza de tracción magnética; *W*, fuerza gravitacional; *F<sub>e</sub>*, fuerza de flotación (principio de Arquímedes); *F<sub>mf</sub>*, fuerza de flotación aportada por el FMR.

**4.4.2 Formulación del modelo.** Sin considerar efectos de inercia, el sistema de fuerzas que actúan sobre una partícula no magnética suspendida en un volumen de FMR, afectado por un campo magnético, se puede plantear de la siguiente manera [17]:

Donde *W* es la fuerza gravitacional dada por:

$$W = mg = \rho_p V_p g \quad (1)$$

$$F_m = \frac{1}{\mu_o} k_p V_p B \nabla B \quad (2)$$

$$F_e = V_f g \rho_f \quad (3)$$

$$F_{mf} = \frac{1}{\mu_o} J_f V_p \nabla B \quad (4)$$

La fuerza neta sobre la partícula corresponde a la sumatoria de las fuerzas que actúan y se puede escribir como:

$$F_p = [F_e + F_{mf} - W - F_m] = \frac{\nabla B}{\mu} V_p (k_p B - J_f) + V_p (\rho_p - \rho_f) \quad (5)$$

Para levantar la partícula se requiere establecer la densidad de punto de corte  $\rho_{pc}$ , cuando la fuerza neta que actúa sobre la partícula es igual a cero, es decir:

$$0 = \frac{\nabla B}{\mu_o} V_p (k_p B - J_f) + V_p (\rho_{pc} - \rho_f) \quad (6)$$

De donde

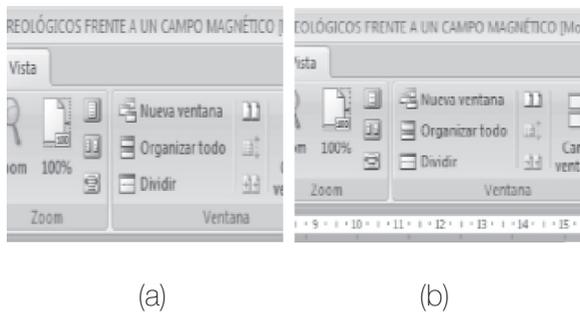
$$\rho_{pc} = \rho_f + \frac{J_f}{\mu_o g} \nabla B \quad (7)$$

Se puede observar entonces que la densidad del punto de corte corresponde a la misma densidad aparente del FMR.

**4.4.3 Preparación de Datos:** Los datos de entrada corresponden a los parámetros de valor constante como *W*, densidad aparente del fluido en ausencia de campo magnético, intensidad del campo magnético, fuerza de empuje y densidad de la partícula. Los datos de salida corresponden a la densidad del punto de corte, en el cual se mantiene levitando una partícula.

**4.4.4 Implementación del Modelo en Computador:** Para realizar el modelamiento del sistema de levitación de una partícula no magnética en un FMR, se utilizó una licencia de ANSYS registrada a nombre de la USTA, y se aplicó a experimentación de la muestra No. 10.

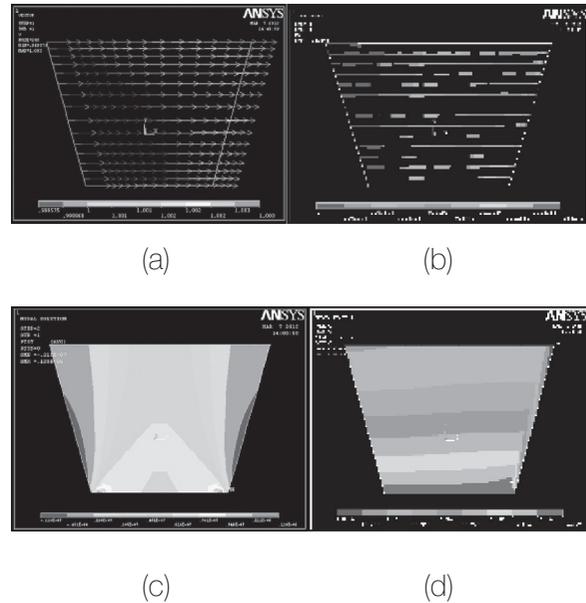
**4.4.5 Pre-procesamiento:** Se crea un polígono por vértices, con geometría trapezoidal. Definiendo los materiales para el modelo y determinando las propiedades específicas. Se genera el mallado y se aplican las cargas, asignando las propiedades del material, se especificó el tamaño del mallado en 0.25 mm para el modelo, se aplicó el mallado por áreas a la parte magnética y fluido, enumerando cada nodo para asignar las características específicas de cada material, se da una escala a cada área del modelo, de 0.01 cm. 0.01 cm. y 1 cm. para los factores X, Y y Z respectivamente. Se asignan las condiciones de borde, cargas y variables, lo que da como resultado la gráfica 9.



**FIGURA 9.** Pre-procesamiento del modelo. (a) Enmallado del Modelo. (b) Parametrización de condiciones de frontera.

**4.4.6 Post-procesamiento: Condiciones de las propiedades y cálculos. Gráfica 10.**

En la figura se observa el aumento en la densidad, debido al gradiente de campo magnético aplicado, en la parte (c) la magnitud de la intensidad del campo magnético aplicado en los extremos, a través del fluido forma unas capas dentro que simula la densidad que se va formando a su paso. En la parte (d) las diferentes densidades se forman al paso de la intensidad de campo magnético aplicado al fluido, donde a mayor campo se concentra más magnetita por la fuerza externa recibida, por lo contrario en un campo mínimo la concentración de magnetita es menor.



**FIGURA 10.** Post procesamiento del modelo. (a) Aplicación de vectores. (b) Alineación de partículas del FMR. (c) Solución nodal del campo magnético. (d) Solución nodal de contorno.

De esta manera se presentan las diferentes densidades con un gradiente de campo magnético, comparadas con la parte experimental, donde se observa la misma tendencia de aumentar con el incremento del campo magnético, (tabla 2).

**TABLA 2:** Comparación densidad experimental y simulada

DATOS EXPERIMENTALES		RESULTADOS SIMULACIÓN
Campo Magnético	Densidad	Densidad
0	1.01	1.515
5	1.01	1.523
20	1.07	1.527
100	1.1	1.531
150	1.12	1.534
200	1.25	1.538

## 5. RESULTADOS: Fase Validación

**5.1 Correlación de variables:** Se tuvo una variación en la composición de acuerdo a la concentración, tipo de fluido y tamaño de la magnetita, como sigue:

### 5.1.1 Viscosidad vs. Tasa de cizalladura:

En la gráfica 11 se muestra cómo la viscosidad incrementa con el aumento de la tasa de cizalladura en revoluciones por minuto {RPM} con y sin aplicación del campo magnético para el fluido 10 al aplicar 7 diferentes velocidades. El máximo campo aplicado fue de 20 Gauss, debido a que si se aplica uno mayor el viscosímetro dará como resultado 100 cP, que es su mayor medida y de ahí en adelante sería constante.

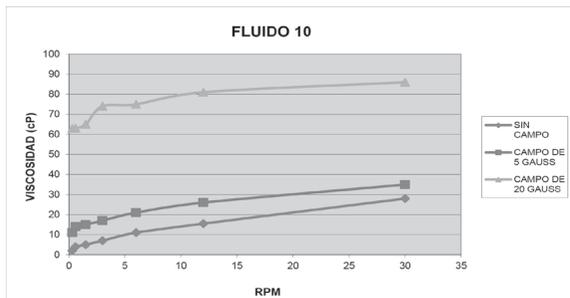


FIGURA 11. Tendencia de la viscosidad variando la tasa de cizalladura para el fluido 10

### 5.1.2 Viscosidad vs. Intensidad de campo magnético:

En la gráfica 12 se muestra el comportamiento ascendente de la viscosidad a diferentes velocidades del viscosímetro, comparando los valores con el campo magnético obtenido dentro del fluido, que oscila de 3.4 a 130.7 gauss hasta llegar a los 100 cP, punto en el cual se mantiene constante hasta un campo de 303.1 gauss.

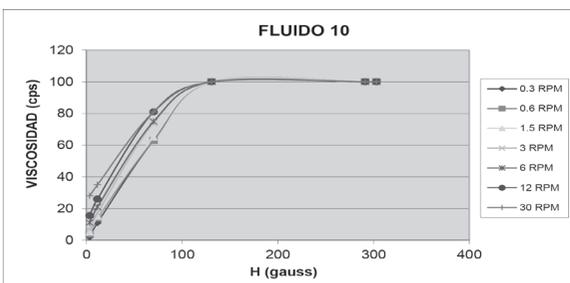


FIGURA 12. Tendencia de la viscosidad aplicando diferentes intensidades de campo magnético.

**5.2 Modelamiento y simulación:** Las variables escogidas para la simulación fueron las relacionadas entre densidad y campo magnético, ya que por medio de ellas se observa el comportamiento de las partículas cuando son atraídas por una fuerza externa. Estas se graficaron hallando su línea de tendencia y mediante regresión de forma lineal se obtuvo la ecuación para cada fluido (ver gráfica 13), donde se muestra que al aplicar cada vez un mayor campo magnético, se obtiene un aumento en la densidad para el fluido 10, presentando la mayor variación, debido a la alineación y fuerte unión que presentan las partículas.

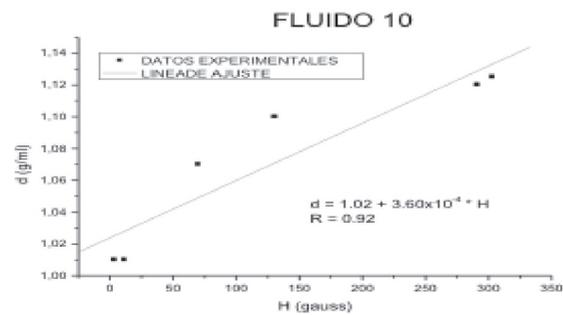


FIGURA 13. Comportamiento de la densidad con variación en la intensidad del campo magnético.

## 6. CONCLUSIONES

El análisis de las variables permite concluir que la viscosidad y densidad dependen notablemente del campo magnético aplicado y que las más adecuadas para estudiar el sistema son campo magnético y densidad, debido a que son las que permiten observar de una mejor manera el comportamiento de las partículas al ser sometidas a una fuerza externa, en este caso intensidad de campo magnético.

De acuerdo a los datos obtenidos experimentalmente se observa que el comportamiento de los fluidos es de tipo no newtoniano y dilatante, debido a que al aumentar la velocidad (tasa de cizalladura) aumenta igualmente la viscosidad, sin aplicación de ninguna fuerza externa.

El fluido más apto para la simulación es el compuesto por 20% de magnetita, de 0.025  $\mu\text{m}$  en aceite SAE

30 (fluido 10), presentando una buena relación en las variables de densidad e intensidad de campo magnético ( $R = 0.92$ ), además presenta la mayor variación de la densidad, debido al tamaño de la partícula y mayor concentración.

Se presentó un método para modelamiento de las partículas de magnetita dentro de un fluido de transporte afectadas por una fuerza externa, proporcionando una técnica conveniente para conocer su comportamiento.

Se comprobó que con los fluidos magnetorreológicos se puede variar la densidad de acuerdo al campo que apliquemos.

## REFERENCIAS

1. Matellanes, L. et al. Materiales y Estructuras "Inteligentes". 2003. Págs. 105 – 154.
2. Olabi A. and Grunwald A. Design and Application of Magneto-Rheological Fluid. The Journal of Materials & Design, Volume 28 Issue 10, (2007), 2658-2664.
3. Arias, L. y Vanegas, L. Materiales Compuestos Inteligentes. The Journal of Scientia et Technica, Año X, No. 25, August (2004), 143-148.
4. López, M. Rúa, Q. y Rivas, J. Procedimiento para el recubrimiento de partículas magnéticas para la obtención de fluidos magnéticos estables. Oficina española de patentes y marcas. Número de solicitud: 9201984. 01.04.94. 2004. pp. 186 – 195.
5. DIOS, J. GAIKER Centro Tecnológico. Parque Tecnológico, Ed. 202. 48.170 Zamudio. Spain (2013).
6. Tronc, E. Fiorani, D. (2001). Ferrofluids: Magnetic Properties. Encyclopedia of Materials: Science and Technology ISBN: 0-08-0431526, Elsevier, (pp. 1-6).
7. Fish, J. and Belytschko, T. (Ed.) (2007). A First Course in Finite Elements. Rensselaer Polytechnic Institute. Northwestern University. (pp. 1092 – 1101). USA.
8. Hieronimus, K. A Few Aspects on the Development of Structural Models, SAE Technical Paper 770598, (1977), 189 – 205.
9. Coss, R. (Ed.) (2003). Simulación. Un enfoque práctico. Departamento de Ingeniería Industrial. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, (pp. 11-28). México; D.F.
10. Homer, K. Quets, J. and Hatwell, H. Apparatus and process for the separation of particles of different density with magnetic fluids. United States. Patent 4,062,765. December (1977). 2545 – 2567.
11. Triviño, P. Ardila, M. Torres, E. Y molina, C. Informe técnico final proyecto: Desarrollo materiales, procesos y equipos magnetorreológicos para beneficio de minerales. Convenio COLCIENCIAS – Gobernación de Boyacá – UPTC – USTA. contrato Número 698-2008, Mayo (2011), 89 – 95. Tunja.
12. Buitrago, L. Obtención y evaluación de fluidos magnetorreológicos a partir de magnetita mineral. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Metalurgia. (2009), 106-120. Tunja.
13. Ardila, M. Torres, E. Triviño, P. y Molina, C. Obtención de ferrofluidos a partir de magnetita mineral y determinación del efecto del tipo de fluido de transporte y la concentración de magnetita sobre la densidad. En: In Vestiguim Ire. No. 3, vol. 1. (2010), 69-73. ISSN 20119836.
14. UPTC, USTA Tunja. Informe final proyecto: Diseño y desarrollo de materiales, procesos y equipos magnetorreológicos para beneficio de minerales. Financiación COLCIENCIAS - Gobernación de Boyacá. 2013. Tunja.
15. ASTM D2983. Standard Test Method for Low-Temperature Viscosity of Lubricants Measured by Brookfield Viscosimeter. 2002. 13 pág.
16. Svoboda, J. densimetric Separation of Coal Using magnetic Fluids. Advanced Technologies Worldwide, PO Box 73508, Fairland 2030, Johannesburg, South Africa. Physical Separation in Science and Engineering, Vol. 13, No. 3-4, September-December (2004), 128-131. ISSN 1478-64.