



## 1. INTRODUCCION

El desarrollo de nuevos materiales y recursos energéticos, para sustitución de otros o aplicación en nuevos desarrollos tecnológicos, ha sido una de las constantes de la investigación. El objetivo del proyecto no se aparta de este concepto, ya que plantea la adaptación tecnológica de los fluidos magnetorreológicos (MR) para aplicarlos en el proceso de beneficio de minerales. En este artículo se hace una síntesis de la revisión bibliográfica realizada a partir de estudios previos, en los cuales se obtuvieron los primeros resultados de la caracterización de la magnetita, que se presentan como parte del estado del arte para el proyecto de Diseño y Desarrollo de materiales, procesos y equipos magnetorreológicos para beneficio de minerales.

## 2. ESTADO DEL ARTE

**2.1 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 le sumerge en medio de un campo magnético [2]. Su construcción típica está compuesta por tres elementos. El primer elemento es un material aceitoso, usualmente derivado de un hidrocarburo, que sirve de soporte a un gran número de micro partículas ferrosas. El segundo elemento usualmente es hierro carbonilo de alta pureza, con una granulometría promedio entre 3 y 5  $\mu$ m, adicionado en proporciones del 20 al 40% en masa. El tercer elemento es un aditivo anti-gravitacional 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 [3]. 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 [4].

En la figura 1 se observan las micrografías del comportamiento de un fluido MR ante un campo magnético. En la figura 1a, se observan esferas de carbonilo en suspensión, sin que el fluido esté sumergido en un campo magnético. En la figura 1b, se tienen las mismas esferas de carbonilo bajo el efecto de un campo magnético continuo. En figura 1c, las esferas de carbonilo están expuestas a la acción de un campo magnético pulsante con una intensidad de 1480 A/m. y una frecuencia de 2 Hz.

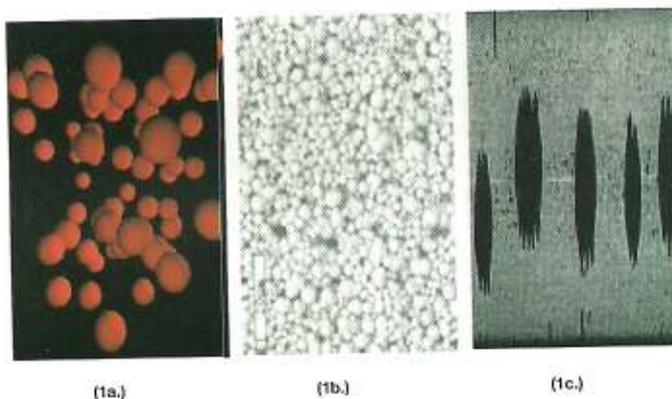


Figura 1. Micrografías del comportamiento de un fluido MR ante un campo magnético. Fuente: [www.google.com/Institute of Material Science and Applied Mechanics](http://www.google.com/Institute of Material Science and Applied Mechanics), 2004.

Las partículas metálicas se mantienen en suspensión dentro del fluido, formando una emulsión coloidal; al aplicar el campo magnético, las partículas se orientan en función de las líneas del flujo magnético, tal como se muestra en la figura 2.

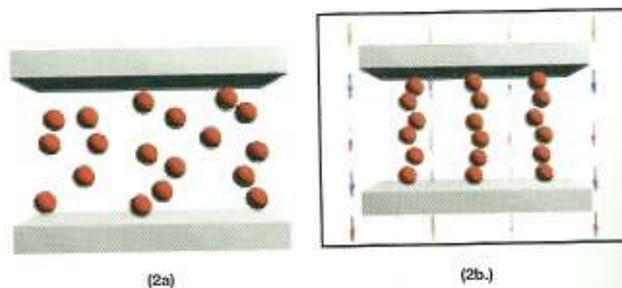


Figura 2. a) Partículas en suspensión formando una emulsión coloidal. b) Partículas alineadas sobre las líneas del campo magnético (flechas). FUENTE: [http://science.nasa.gov/headlines/y2003/02apr\\_robotblood.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2003/02apr_robotblood.htm)

Actualmente, el uso de los fluidos MR se extiende a la industria automotriz (diseño de sistemas de suspensión primaria, protección de pasajeros, suspensión de sillas, suspensión de cabinas) [5], en el sector militar y de defensa, en ingeniería civil (protección sísmica en puentes y edificios), en la industria de electrodomésticos (lavadoras de ropa), y en medicina (prótesis de articulaciones) [6]. A futuro no lejano, 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 [7].

**2.2 Magnetita Mineral.** La magnetita es un óxido ferroso-férrico ( $Fe_3O_4$  ó  $FeO.Fe_2O_3$ ) u óxido de hierro magnético; la composición mineral media es de 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].

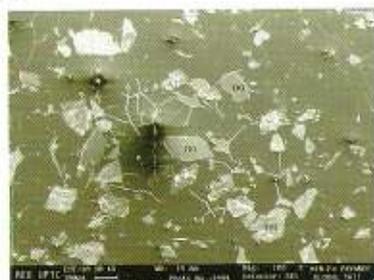
Colombia cuenta con algunos yacimientos importantes de magnetita, como el que se encuentra en el municipio de Payandé en el departamento del Tolima [9]. Este mineral ya ha sido caracterizado en su composición química, por espectrometría de absorción y análisis por microscopía electrónica, a una con granulometría menor a malla 100[9]. Los resultados fueron:

**Tabla No. 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

FUENTE: [9].

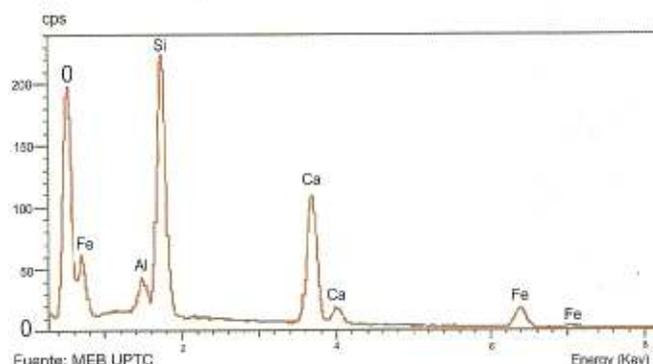
Resultados del análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB)



Fuente: MEB UPTC

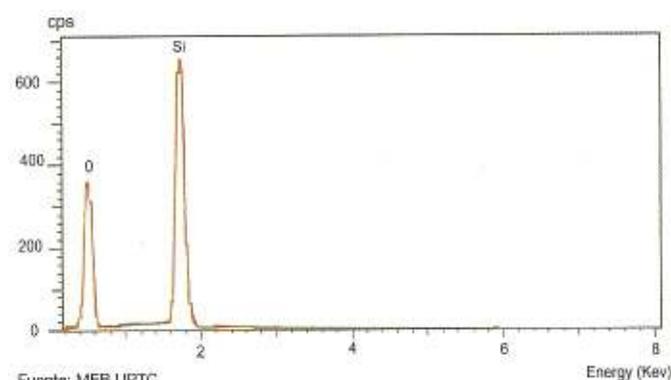
**Figura 3.** Micrografía MEB a 200X de la muestra de magnetita.

En la micrografía (MEB) (figura 3), se identifican tres tipos diferentes de fases, de las cuales se hace el análisis espectral en la figura 4 (a) (b) y ©.



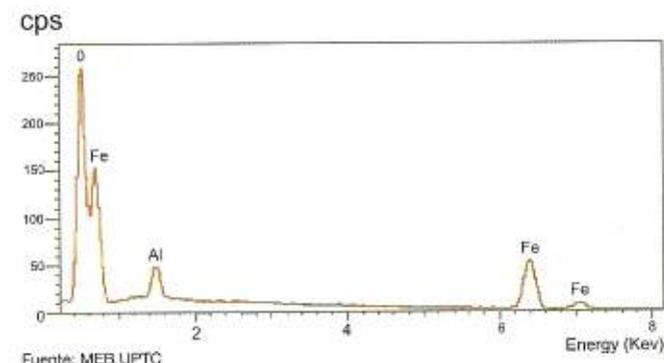
**Figura 4a.** Espectro fase (A).

El microanálisis a 5000X, muestra alta presencia de oxígeno y silicio, indicando que se trata de granos de sílice.



**Figura 4b.** 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.



Fuente: MEB UPTC



ferrofluido en medio acuoso obtenido por Massart (1981), el cual se estabiliza por un mecanismo de doble capa eléctrica.

2.4 Aspectos comparativos para la obtención de fluidos magnetorreológicos a partir de magnetita mineral y sintética[10]. La magnetita mineral requiere un proceso de trituración, molienda y concentración para obtener polvos con diferentes tamaños de partícula, los cuales deben estar dentro de un rango de 0.1 a 0.3 micras; el tiempo de molienda, en molinos de bolas, para alcanzar estos tamaños, oscila entre 500 y 1000 horas y la concentración de este óxido de hierro se hace por medios magnéticos, lo cual eleva los costos y el rendimiento en

la producción de magnetita para la preparación del fluido magnetorreológico.

En los ferrofluidos se puede sintetizar la magnetita hasta alcanzar los tamaños deseados de geometría aproximadamente esférica con propiedades magnéticas, antiaglomerantes y antidepresantes, variables determinantes en las propiedades magnetorreológicas.

Bajo estas consideraciones, se ha planeado desarrollar un diseño experimental, que permita establecer la factibilidad técnica de producir el fluido magnetorreológico para la aplicación en el beneficio de minerales, a partir de magnetita mineral en ferrofluidos.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARDILA B. Marco A y FORERO P. Álvaro H. Propiedades magnetorreológicas en mezclas de aceite automotriz con partículas metálicas. Revista
- [2] I.A. Brigadnov, A. Dorfmann, "Mathematical modeling of magnetorheological fluid", in *continuum Mech. Thermodyn.* No. 17, pp. 29 - 42, February 2005.
- [3] Lord Materials Division, "Designing with MR Fluids", Engineering Note, Lord Corporation, Thomas Lord Research Center, Cary, NC, November 1999.
- [4] M.R. Jolly, J.D. Carlson and J.W. Bender, "Properties and applications of commercial rheological fluids," *SPE 5th Annual International Symposium on Smart Materials and Structures*, San Diego, CA, 15 March, 1998.
- [5] [www.inovacaotecnologica.com.br/fluídos/magnetorreológicos/poderão-revolucionar-suspensões-de-veículos.htm](http://www.inovacaotecnologica.com.br/fluídos/magnetorreológicos/poderão-revolucionar-suspensões-de-veículos.htm)
- [6] <http://www.lord.com/Aplicaciones>.
- [7] M.R. Jolly, J.D. Carlson and J.W. Bender, "Properties and applications of commercial rheological fluids," *SPE 5th Annual International Symposium on Smart Materials and Structures*, San Diego, CA, 15 March, 1998.
- [8] CORNELIUS, Klein y CORNELIUS S., Hurlbut. *Manual de Mineralogía*. 4 ed. Barcelona : Reverte, 1996. p. 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] *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. ISBN 0-08-043152-6. Pp. 3093-3102. Elsevier Science Ltd. Copyright 2001.