

Estudio experimental de la viscosidad de un fluido magneto-reológico a base de magnetita mineral

F. Donado, C.Y. Mendoza, R. Valencia y J.A. Santiago-García
*Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería-CIAII, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,
Pachuca 42090, Pachuca, México.*

Recibido el 17 de enero de 2006; aceptado el 27 de junio de 2006

Estudiamos experimentalmente la viscosidad de un fluido magneto-reológico (MR) a base de magnetita mineral y aceite automotriz para frenos. Usamos un reómetro Brookfield de geometría cono-plato al cual se le adaptó un solenoide que produce y controla un campo magnético paralelo al eje de rotación del cono. Aun cuando las partículas contienen cantidades variables de impurezas de silicatos y presentan una amplia dispersión en los tamaños, el sistema experimenta importantes cambios en su viscosidad como función del campo magnético, rapidez de corte y tamaño promedio de partícula. Estudiamos el comportamiento de un amortiguador MR simplificado y mostramos algunas de sus ventajas respecto de un amortiguador convencional.

Descriptores: Fluido magneto-reológico; magnetita mineral; amortiguador magneto-reológico.

We experimentally study the viscosity of a magnetorheological (MR) fluid based on mineral magnetite and automotive oil for brakes. We use a Brookfield cone-plate rheometer to which it was adapted a solenoid that produces and controls a magnetic field parallel to the cone rotation axis. Even though the particles contain variable amounts of silica impurities and present a wide dispersion in the sizes, the system experiments important changes in the viscosity as a function of the magnetic field, shear rate and particle mean size. We study the behavior of a simplified MR damper and show some of its advantages respect to a conventional damper.

Keywords: magnetorheological fluid; mineral magnetite; magnetorheological damper.

PACS: 83.80.Gv; 83.85.Jn; 83.60.Fg

1. Introducción

Los fluidos magneto-reológicos (fluidos MR) son sistemas compuestos que experimentan notables cambios reversibles en sus propiedades mecánicas, principalmente su viscosidad, cuando son expuestos a un campo magnético externo [1–7]. Los fluidos MR están compuestos principalmente de micropartículas magnetizables y un líquido, generalmente un aceite inorgánico newtoniano de baja viscosidad, es decir uno donde la viscosidad es independiente de la rapidez de corte. En ausencia de campo magnético, las partículas se encuentran dispersas en el líquido y el sistema tiene un comportamiento newtoniano. Al aplicar un campo magnético transversal al flujo, el sistema deja de ser newtoniano y adquiere características viscoelásticas [4–6]. Esto es, si el esfuerzo cortante aplicado al sistema es menor a un valor crítico denominado módulo de cesión, el sistema se comporta elásticamente y por tanto no fluye. Si el esfuerzo cortante es mayor al módulo de cesión, entonces el sistema fluye, siendo su viscosidad dependiente del campo magnético y de la rapidez de corte. Es importante hacer notar que si se aplica un campo magnético en la dirección del flujo, entonces no se observan cambios en el comportamiento reológico del sistema, esto es, la viscosidad en estos fluidos es claramente anisótropa. Con el campo aplicado transversalmente al flujo, a rapidez de corte baja, pueden observarse cambios en la viscosidad típicamente de 2 órdenes de magnitud [8]. El módulo de cesión depende de la intensidad del campo magnético, para algunos sistemas se alcanzan valores alrededor de 100 kPa [5]. No sólo la viscosidad cambia, sino también otras propiedades físicas, tales como las térmicas, ópticas, magnéticas y elásticas [9–12].

Al aplicar un campo magnético sobre el fluido MR se induce un momento dipolar en las micropartículas, éstas interactúan atractiva o repulsivamente dependiendo de la posición relativa que los momentos dipolares guarden entre sí. Se observa la formación de estructuras alargadas orientadas en la dirección del campo magnético aplicado y distribuidas uniformemente [12–19]. Aunque es común que en dispersiones de cualquier tipo la formación de estructuras facilite la sedimentación, en los fluidos MR la distribución uniforme de estructuras se mantiene mientras esté presente el campo magnético. Esto se logra en parte porque los extremos de las estructuras formadas se unen a las paredes laterales del recipiente que contiene al fluido MR, creando lazos o puentes que brindan soporte a las estructuras frente a la sedimentación. Las interacciones laterales repulsivas entre estas estructuras también contribuyen a mantener la distribución de éstas. Si se apaga el campo magnético, las estructuras se sedimentan rápidamente. Para evitar o reducir este efecto se usan surfactantes, los cuales disgregan las estructuras y permiten que las partículas continúen en dispersión. La estabilidad de la dispersión es uno de los mayores problemas que enfrenta la preparación de los fluidos MR.

Las características de las estructuras dependen principalmente de la intensidad del campo aplicado, la concentración de las partículas magnéticas y las condiciones de flujo. Aunque se acepta que estas estructuras determinan los cambios físicos que experimenta un fluido MR, la descripción física del sistema resulta complicada. Tanto experimental como teóricamente se acepta que, en ausencia de flujo, en el límite de bajas concentraciones, se forman estructuras lineales

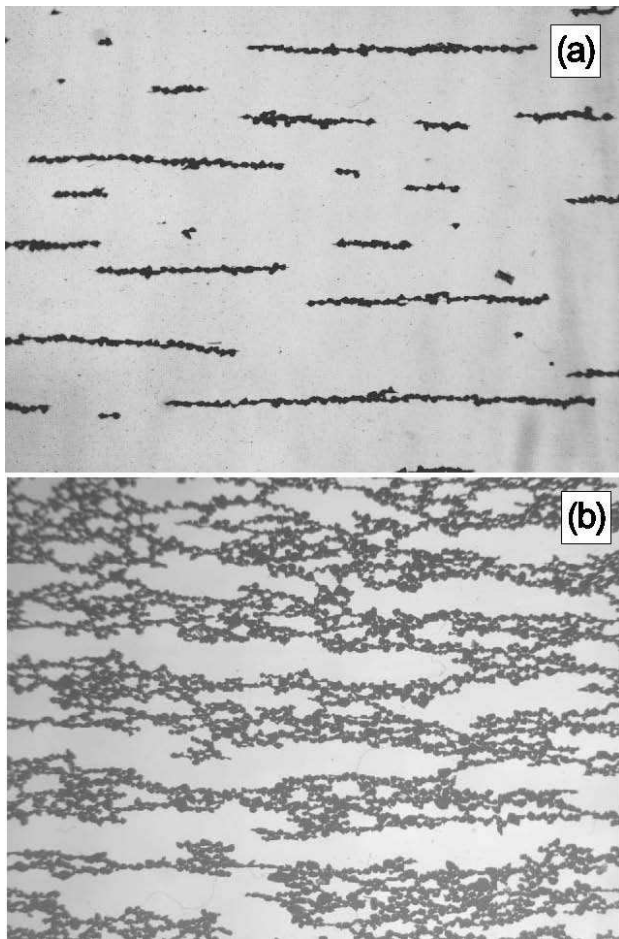


FIGURA 1. Ejemplo de estructuras formadas por partículas de magnetita mineral dispersas en aceite automotriz. (a) Baja concentración, (b) concentración intermedia, ambas en presencia de un campo magnético de 80 G. (Fotos cortesía de F. Donado.)

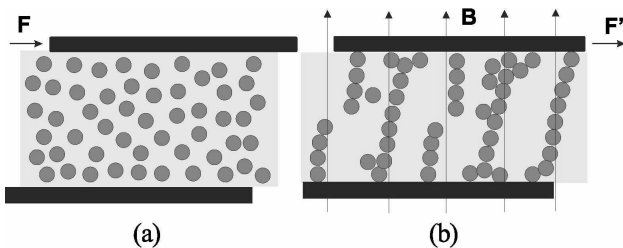


FIGURA 2. (a) Representación de un sistema magneto-reológico confinado entre dos placas, en ausencia de campo magnético y expuesto a un esfuerzo cortante producido por una fuerza F aplicada sobre la placa superior. Los círculos representan las partículas magnéticas. (b) Sistema expuesto a un campo magnético B y a un esfuerzo cortante producido por una fuerza F' .

orientadas en la dirección del campo magnético. Fuera de este límite las estructuras formadas tienen una riqueza estructural mayor, y pueden ser descritas como columnas, estructuras fibrosas e inclusive como fractales [12]. En la Fig. 1 observamos ejemplos de estructuras que forman las partículas magnéticas a dos concentraciones diferentes en presencia de un campo magnético. En condiciones de flujo causado por

un esfuerzo cortante y con el campo magnético transversal a este flujo, las estructuras experimentan además interacciones hidrodinámicas que tienden a orientarlas en dirección del flujo. Cuando una estructura se inclina, la orientación relativa de los momentos dipolares cambia, disminuyendo las interacciones atractivas entre las partículas. Como resultado las estructuras son parcialmente desintegradas. Los fragmentos de las estructuras se reorientan con mayor facilidad en la dirección del campo y se unen a otros fragmentos para formar estructuras más grandes, que nuevamente las interacciones hidrodinámicas vuelven a fragmentar, y así continuamente. Pero esta fragmentación continua de las estructuras requiere que el esfuerzo cortante aumente respecto al caso sin campo si se ha de mantener la rapidez de corte constante. En la Fig. 2a observamos una representación de un fluido MR en ausencia de campo magnético y bajo la acción de un esfuerzo cortante producido por una fuerza F . La rapidez v con que una placa se desplaza respecto de la otra está determinada básicamente por la resistencia que opone la viscosidad del líquido. El efecto de las partículas es sólo de carácter inercial. En la Fig. 2b observamos que el efecto del campo magnético es formar estructuras, algunas unen las dos placas y otras, más pequeñas, están unidas a alguna de las placas. Si se requiere que una placa se desplace respecto de la otra con la rapidez v , se necesita una fuerza F' mayor que F . Esto porque se debe vencer las interacciones magnéticas entre las partículas que mantienen unidas las estructuras y porque se debe vencer la resistencia que opone la viscosidad al arrastrar los fragmentos de las estructuras. Esto implica que el esfuerzo cortante debe ser mayor y por lo tanto la viscosidad efectiva del sistema aumenta. Si el campo magnético se aplica en dirección paralela al flujo, las estructuras no experimentan la dinámica que hemos descrito, por lo que no afectan sensiblemente la viscosidad efectiva. Así la orientación relativa de las estructuras en el flujo determina la anisotropía de la viscosidad.

Para la descripción de algunas propiedades físicas de los fluidos MR, es posible considerar al sistema como un compuesto. Las componentes son, por una parte, el líquido y, por otra, las estructuras, que se comportan efectivamente como inclusiones cuyas propiedades físicas son determinadas por el campo magnético [12]. Una descripción completa del comportamiento de los fluidos MR presenta retos interesantes a la física e involucra problemas básicos, por ejemplo el proceso de agregación de partículas dipolares, que también son de interés en otras áreas.

Por sus notables características, los fluidos MR se investigan como la base del diseño de novedosos sistemas mecánicos. Entre estos se encuentran, sistemas semiactivos de control de vibraciones, reguladores de flujo, frenos hidráulicos y sistemas de pulido óptico [20–28]. Algunos sistemas ya están siendo comercializados y usados en la industria automotriz [29].

Existe el análogo eléctrico de los fluidos MR, se conocen como fluidos electro-reológicos (fluidos ER). Estos consisten en dispersiones de micropartículas dieléctricas en

un líquido cuya constante dieléctrica contrasta con la de aquéllas [30–34]. El comportamiento de los fluidos ER es muy similar al de los fluidos MR, frecuentemente los estudios de algunos de estos sistemas ha dado la pauta para los estudios del otro. Por supuesto existen algunas diferencias importantes. Por ejemplo, para producir el campo eléctrico en un fluido ER generalmente se usan un par de paredes conductoras, éstas actúan efectivamente como espejos de las estructuras formadas entre ellas. El resultado de la interacción entre las estructuras y sus imágenes es que las estructuras se comportan como si fueran de longitud infinita. Este aspecto determina algunas diferencias en el proceso de agregación de las partículas para formar las estructuras en los fluidos ER y en los fluidos MR, pues en estos últimos no tenemos el efecto de espejo. Por lo que respecta a las posibles aplicaciones, el uso de fluidos ER tiene la ventaja de que la generación y control del campo eléctrico es relativamente más sencillo que la generación y control del campo magnético. En contraparte los fluidos ER resultan ser muy sensibles a las impurezas, lo que puede dificultar su preparación y uso.

También existen los llamados ferrofluidos, los cuales son dispersiones coloidales estables de partículas ferromagnéticas en líquidos, generalmente de baja viscosidad, tal como el keroseno. Estos sistemas también cambian su propiedades mecánicas al aplicarles un campo magnético, aunque los cambios que experimentan son notablemente menores a los de los fluidos MR. Para su preparación se usan partículas del orden de 10 nm. Por su tamaño, las partículas están constituidas por monodominios magnéticos, por lo que presentan un dipolo magnético permanente [5, 35–37]. Para lograr la estabilidad de la dispersión se usa un surfactante. En estos sistemas, el surfactante forma una capa alrededor de la partículas cuyo grosor es del mismo orden de magnitud que el diámetro de éstas, lo cual impide que se aglomeren. Cuando se aplica un campo magnético, las partículas rotan de tal forma que su momento dipolar tiende a estar alineado con el campo magnético. Al mismo tiempo interactúan con otras partículas por medio de interacciones dipolares. El resultado es una rica dinámica rotacional de las partículas cuya complejidad aumenta en condiciones de flujo. Los movimientos rotacionales proveen al sistema de un mecanismo adicional de disipación que se manifiesta en la llamada viscosidad rotacional [38, 39]. En condiciones de campo magnético constante la viscosidad rotacional puede incrementar la viscosidad efectiva hasta en un 200 % [40]. Bajo ciertas condiciones de campo oscilatorio, los ferrofluidos incluso pueden experimentar una viscosidad rotacional “negativa”, fenómeno que ha motivado varios estudios en el área [40–43]. Se les ha usado principalmente en el área de sellado hermético, por ejemplo en los discos duros de las PC's [43]. Como los ferrofluidos son paramagnéticos se les puede bombear sin uso de sistemas mecánicos usando solamente campos magnéticos oscilatorios viajeros, lo cual abre varias posibilidades tecnológicas [44, 45].

En la literatura a los fluidos MR, los fluidos ER y los ferrofluidos se les conoce como fluidos inteligentes o como fluidos ajustables. El presente trabajo es un estudio experi-

mental de un fluido MR a base de magnetita mineral. En la próxima sección hacemos una revisión de algunos aspectos importantes en el desarrollo de los fluidos MR. Seguimos con la descripción del proceso para obtener una dispersión MR a base de magnetita mineral. Posteriormente se estudian las propiedades mecánicas de este sistema mediante el uso de un reómetro especialmente adaptado, bajo diferentes condiciones de campo magnético, rapidez de corte, y tamaño promedio de las partículas. Finalmente se estudia, por simulación numérica, el comportamiento de un modelo simple de amortiguador MR. Los estudios aquí presentados pueden ser repetidos y extendidos en prácticamente cualquier laboratorio de física.

2. Antecedentes

El interés y estudio de los fluidos MR empieza con la publicación de J. Rabinow “The Magnetic Fluid Clutch” (*AIEE Trans.* **67** 1308), de 1948 [5, 46, 47]. En el año siguiente fue publicado “Induced Fibration of Suspensions” de W.M. Winslow, en éste se realizan los primeros estudios de los fluidos ER y también estudios de un sistema MR [48]. Winslow encuentra que la viscosidad en estos sistemas depende del cuadrado del campo aplicado y propone que esta dependencia se debe a las estructuras fibrosas formadas por las partículas al estar sometidas al campo aplicado. Poco después, entre los años 1951 y 1953, Rabinow logra las patentes de un embrague MR y otros mecanismos para la transmisión de fuerzas [49]. Sorprendentemente, después de este prometedor comienzo, el interés en los fluidos MR casi desaparece, debido, entre otros factores, a la falta de estabilidad de las dispersiones frente a la sedimentación. Lo mismo sucedió con los fluidos ER, a excepción de las dos muy interesantes publicaciones de Klass y Martinek de 1967. En éstas se estudian sistemas ER bajo diferentes condiciones de campo eléctrico aplicado y rapidez de corte [50, 51]. Posiblemente inspirados en los fluidos MR, en la década de los 60, fueron sintetizados y estudiados los primeros ferrofluidos [52–55]. Estos sistemas mostraron ser muy estables frente a la sedimentación y con viscosidad también dependiente del campo magnético. Sin embargo, se observó que a pesar de las semejanzas con los fluidos MR, su comportamiento y descripción física tenían que ser diferentes a las de aquéllos. En un estudio experimental de un ferrofluido [53], MacTague encuentra una anisotropía en la viscosidad siendo ésta 2 veces mayor cuando usa un campo paralelo al flujo que cuando usa un campo perpendicular a éste. MacTague propone que la disipación en los ferrofluidos proviene de la fricción de las partículas con las capas del surfactante y líquido que las rodean. Esto debido a los movimientos rotacionales producidos por el campo magnético y la interacción con otras partículas. El interés por el estudio de los ferrofluidos se ha mantenido desde entonces, incrementándose a partir de la década de los 80. En 1985 Rosensweig publicó el libro *Ferrohydrodynamics*, el cual es un clásico de la literatura de los ferrofluidos [56]. En esta misma década surge nuevamente cierto interés por estudiar

los fluidos MR y los fluidos ER, y se publican algunos trabajos sobre la reología de estos sistemas y sus posibles aplicaciones [57–61]. Sin embargo es sólo hasta la década pasada cuando el interés por los fluidos MR y los fluidos ER se generaliza en el ambiente científico. De los trabajos publicados se pueden inferir algunas características generales de los fluidos MR [62]. Por ejemplo, el rango de tamaños de partícula adecuado para prepararlos está entre 1 y 20 micras y la fracción de volumen ocupada por éstas, ϕ , no debe superar a 0.4. Algunos de los materiales, a partir de los cuales se pueden preparar fluidos MR, son el hierro, óxidos de éste como la magnetita y algunas composiciones de hierro-carbón. El papel que desempeña la dispersión de los tamaños de las partículas aún no se ha aclarado. Mientras algunos reportan que una mezcla de tamaños aumenta la respuesta al campo magnético, otros reportan que la disminuye, por lo que es necesario realizar estudios más profundos del tema. Lo mismo puede decirse del papel que desempeña la forma de las partículas.

Actualmente existe un creciente interés por obtener fluidos MR que experimenten aún mayores cambios en sus propiedades mecánicas, lo cual es deseable para algunas de las aplicaciones. En este contexto es importante profundizar en el estudio de la dependencia de las propiedades mecánicas de los fluidos MR con factores como el tamaño de las partículas y características de las estructuras formadas por éstas al aplicar un campo magnético. Existe evidencia experimental que sugiere que estos factores influyen notablemente en estas propiedades [4, 63]. También es notorio que en los últimos dos años ha habido un especial interés por la síntesis de partículas especiales para la preparación de fluidos MR. Éstas son necesarias para resolver problemas como la estabilidad de las dispersiones y la homogeneidad de las partículas [64–68]. Por lo que respecta a estudios sobre aplicaciones, a partir de la década pasada, el número de ellos se ha incrementado notablemente. El interés se ha enfocado en el problema de la supresión de vibraciones, particularmente el de grandes estructuras, lo cual es muy atractivo para la ingeniería [20–28]. El número de patentes registradas cuyo funcionamiento está basado en las propiedades de fluidos MR también se ha incrementado notablemente en los últimos 5 años [69].

3. Obtención de micropartículas de magnetita por molienda mecánica

La magnetita es un material cristalino cúbico de coloración negra que pertenece a la familia de las *ferritas*, tiene una temperatura de Curie T_c de 580° C y una densidad de 5.2 g/cm³ [70]. Abunda en la naturaleza en forma de granos, que generalmente tienen adheridas cantidades variables de silicatos. Para este trabajo hemos recolectado este material pasando un imán de barra por encima de arena de río; luego se lava para eliminar impurezas. Para el lavado, el material se dispersa en agua en un vaso de precipitado, luego se colocan dos imanes en la pared exterior del vaso para concentrar el material magnético y enseguida se desecha el resto de la dis-

persión. Se repite este proceso de lavado varias veces hasta que el agua de lavado sea clara. La partículas obtenidas son relativamente grandes, alrededor de 500 μm y aún contienen trazas de silicatos.

Hemos sometido las partículas a un proceso de reducción de tamaño por medio de un molino de esferas de acero Boston Gear W8-94. Éste consiste en un cilindro de acero con diámetro de 12.5 y 12.5 cm de longitud, en el cual se colocan balines de acero y el material que se desea triturar. El cilindro rueda sobre rodillos que giran a 1750 rpm. En el interior del cilindro, las partículas son trituradas al quedar en medio de las colisiones entre las esferas de acero y entre éstas y la pared del cilindro. En particular, en el caso de la magnetita, este proceso es favorecido debido a que los óxidos son relativamente frágiles. Las partículas obtenidas presentan un tamaño promedio que depende del tiempo de molienda, presentan formas irregulares y una amplia dispersión en los tamaños. El material es lavado nuevamente, como se describió anteriormente, para eliminar más impurezas de silicatos. La densidad del material obtenido es $\rho = 5.1 \text{ g/cm}^3$, valor que es ligeramente inferior al de la magnetita pura.

Con el fin de estudiar la viscosidad en función del tamaño de las partículas, obtuvimos varias muestras diferenciadas por el tiempo de molienda t_{mol} a la que se sometió el material. Para preparar cada una de ellas se usaron 25 g de magnetita y 3 ml de alcohol. Los tiempos de molienda utilizados son 2.5, 5, 8, 30, 45 y 60 minutos. Los tamaños promedio de las partículas pueden estimarse usando la relación $\bar{x} = 638.95(t_{mol})^{-0.77}$, propuesta en la Ref. 71, y son mostrados en la Tabla I. La dispersión en los tamaños es del orden de 30%. La relación entre \bar{x} y t_{mol} propuesta en la Ref. 71 es una relación empírica. Para obtener el tamaño promedio de las partículas para cada muestra de las ahí consideradas, se promediaron 100 mediciones de partículas individuales.

4. Sistema de magneto-reometría y preparación de las muestras

Los equipos tradicionalmente usados para la medición de la viscosidad están diseñados para líquidos puros, o bien para dispersiones de partículas muy pequeñas, además, no se considera la presencia de un campo magnético externo. Para rea-

TABLA I. Tamaño promedio de partículas como función del tiempo de molienda.

Tiempo de molienda (min)	Tamaño prom. (μm)
2.5	315
5	185
8	128
30	46
45	34
60	27

TABLA II. Tiempo de espera para la toma de mediciones de acuerdo a las revoluciones por minuto del cono.

Rapidez (rpm)	Tiempo (s)
1	150
1.5	120
2	120
3	90
5	60
7	50
10	30



FIGURA 3. Sistema de magneto-reometría: al centro, el reómetro de cono-plato inmerso parcialmente en el solenoide; a la derecha, las fuentes de poder que alimentan el solenoide; y a la izquierda, el baño refrigerante.

lizar mediciones de reología en un fluido MR se requiere adecuar un reómetro para que trabaje con partículas relativamente grandes y construir un aditamento que genere un campo magnético constante en la dirección transversal al flujo que sucede durante la medición de la viscosidad. Recordemos que la viscosidad en la dirección paralela al campo no experimenta cambios.

Usamos un reómetro Brookfield LVDV-III Ultra de geometría cono-plato, el cual mide la viscosidad a través de controlar y variar la rapidez de corte y obtener el esfuerzo resultante. Construimos y adaptamos al reómetro un solenoide para generar y controlar un campo magnético transversal al plano de giro del cono. Dado que la viscosidad es una cantidad física que depende sensiblemente de la temperatura, ésta se controla mediante un baño refrigerante TC-6021 de Brookfield, el cual nos permite un control de la temperatura con una precisión de $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Emplea como refrigerante agua desionizada, la cual circula a través del plato por medio de dos mangueras de hule. El sistema completo es mostrado en la Fig. 3.

El reómetro que usamos requiere de 2 ml de fluido para la toma de mediciones cuando se usa el cono número 41 y la

separación entre el cono y el plato es de 13 micras, según la calibración del fabricante. Dado que en nuestras dispersiones existen partículas de diámetro mayor, aumentamos la separación entre el cono y el plato a 3 mm. Como el área interna del plato es de 22.1 cm^2 y dado que separamos 3 mm el cono del plato, el volumen extra es aproximadamente 8 ml, por lo que con estas modificaciones el volumen mínimo de fluido que usamos para la toma de mediciones es 10 ml.

Preparamos varias muestras de fluido MR a partir de las muestras de magnetita y de aceite de freno automotriz de viscosidad $16.4 \pm 0.2\text{ cP}$. La fracción de volumen ocupada por las partículas en cada una de las muestras fue $\phi = 0.05$. Este valor se seleccionó casi arbitrariamente y sólo cumple que es un valor intermedio de concentración. Un fluido MR con una concentración intermedia de partículas tiene una viscosidad cercana a la del líquido que lo compone y experimenta importantes cambios en su viscosidad al aplicarle un campo magnético. Para preparar una cantidad V_T de fluido MR, donde la fracción de volumen ocupada por las partículas es ϕ , la cantidad m de material magnético de densidad ρ que se requiere dispersar en el líquido es $m = \phi\rho V_T$. La cantidad de líquido necesario es $V_T - V_P$, donde V_P es el volumen total de las partículas.

Para iniciar un experimento se colocan 10 ml de fluido MR en el plato y se espera por 3 minutos para que alcance el equilibrio térmico. Con ayuda de un pincel se dispersan nuevamente las partículas y se procede a realizar las mediciones planeadas a diferentes intensidades de campo magnético y rapidez de corte. Para las mediciones se recomienda esperar un tiempo determinado para cada valor de las revoluciones por minuto (rpm) del cono antes de tomar la lectura. En la Tabla II se muestran los tiempos que consideramos antes de tomar lectura para cada valor de rpm considerado. En ausencia de campo magnético la viscosidad de las diferentes muestras de fluido MR fue $18.0 \pm 1.5\text{ cP}$.

5. Viscosidad en función del campo magnético, rapidez de corte y tamaño de partícula

El comportamiento no newtoniano de nuestro sistema puede observarse en las Figs. 4 y 5, para estas mediciones se utilizó un fluido MR preparado con partículas de la molienda de 2.5 min. En la primera se comparan las mediciones de viscosidad como función de la rapidez de corte para 3 valores de campo magnético. Observamos que los valores de la viscosidad a rapidez de corte pequeñas alcanzan valores relativamente grandes; más de 2 órdenes de magnitud mayores que el valor de la viscosidad a campo cero. Estos valores disminuyen rápidamente a medida que aumenta la rapidez de corte, lo cual es el comportamiento típico de los fluidos pseudoplásticos. También se observa claramente que los valores de la viscosidad aumentan al aumentar el campo magnético. En la segunda figura se grafica el comportamiento del módulo cortante en función de la rapidez de corte para 3 valores de campo magnético. Para cada curva se observa que, a baja

rapidez de corte, los valores tienden a un valor límite particular. Este valor es el módulo de cesión, el valor mínimo del módulo cortante que necesita ser aplicado al sistema para que éste empiece a fluir. De la figura también observamos que el módulo de cesión es mayor a mayores intensidades del campo magnético.

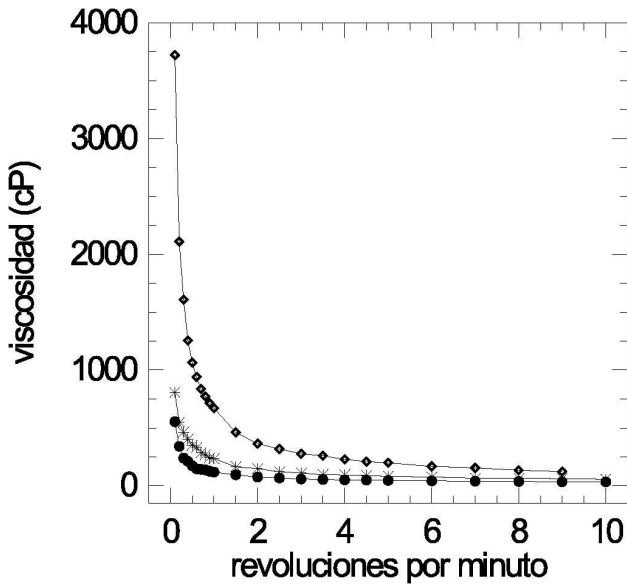


FIGURA 4. Comportamiento de la viscosidad como función de las revoluciones por minuto del cono manteniendo fijo el campo magnético. Los datos marcados con círculos sólidos, asteriscos y diamantes corresponden a valores de campo magnético de 68, 89 y 109 G, respectivamente. Las líneas sólidas fueron colocadas solamente como guía.

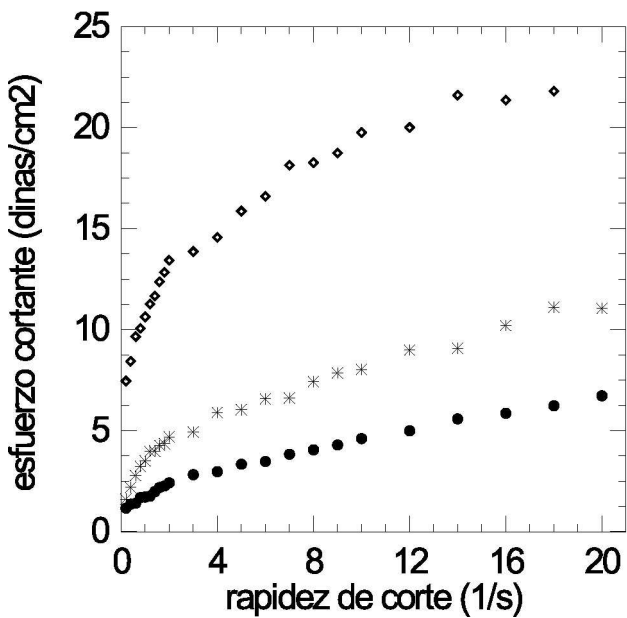


FIGURA 5. Comportamiento del esfuerzo cortante como función de la rapidez de corte manteniendo fijo el campo magnético. Los datos marcados con círculos sólidos, asteriscos y diamantes corresponden a valores de campo magnético de 68, 89 y 109 G, respectivamente.

En las Figs. 6 y 7 se compara el comportamiento de la viscosidad como función del campo magnético para varios valores de la rapidez de corte. En la primera se usan partículas provenientes de una molienda de 2.5 min y en la otra de una molienda de 8 min. En estas figuras y en las 2 siguientes se ha graficado la razón entre la viscosidad η y la viscosidad a campo cero η_0 . Estas figuras, además de mostrar claramente que la viscosidad depende notablemente del campo magnético y de la rapidez de corte, sugieren que existe un valor umbral del campo magnético a partir del cual el sistema experimenta

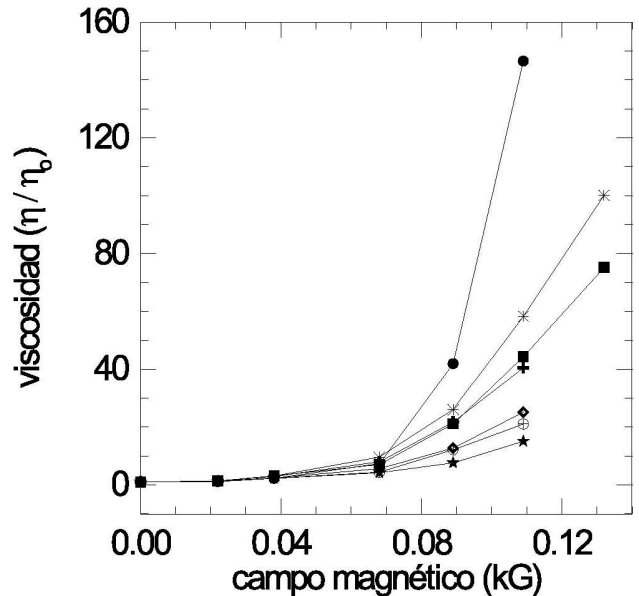


FIGURA 6. Comportamiento de la viscosidad como función del campo magnético manteniendo fija la velocidad de rotación del cono (rpm). Los puntos marcados con círculos sólidos, asteriscos, cuadrados, cruces, diamantes, círculo con cruces, y estrellas corresponden a 1, 1.5, 2, 3, 5, 7, y 10 rpm. Partículas de la molienda de 2.5 min. Las líneas sólidas sólo se colocan como guías.

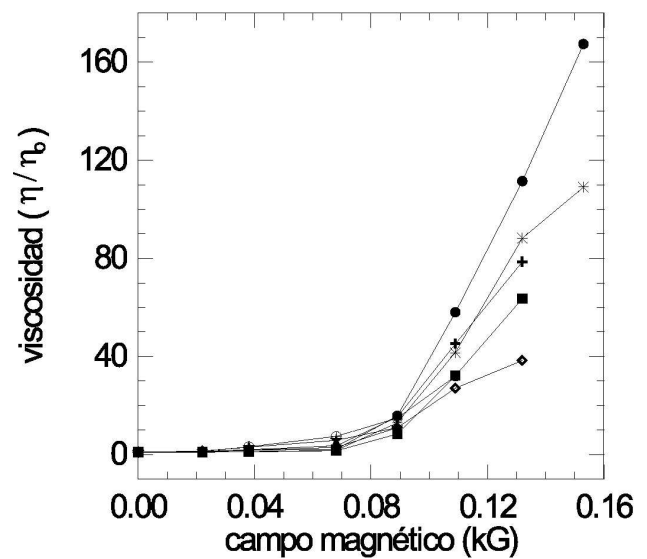


FIGURA 7. Información semejante a la de la figura anterior, ahora las partículas usadas provienen de la molienda de 8 min.

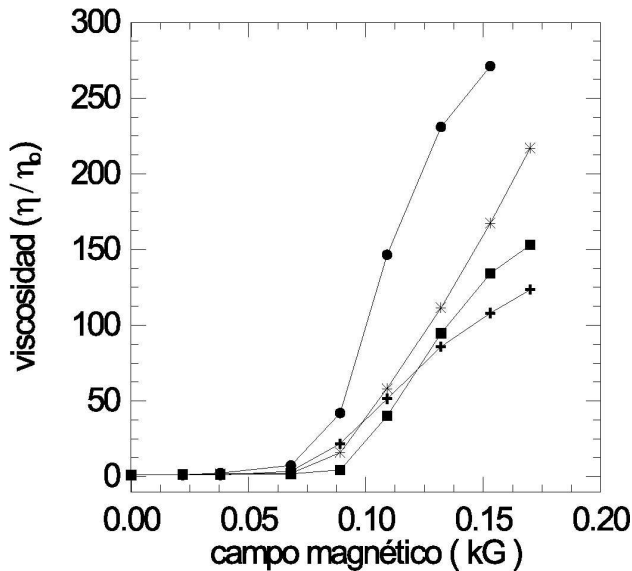


FIGURA 8. Comparación del comportamiento de la viscosidad como función del campo magnético y a 1 rpm para las diferentes muestras de fluido MR. Los puntos marcados con círculos sólidos, asteriscos, cuadrados y cruces corresponden a muestras con partículas de las moliendas de 2.5, 8, 30 y 45 min, respectivamente.

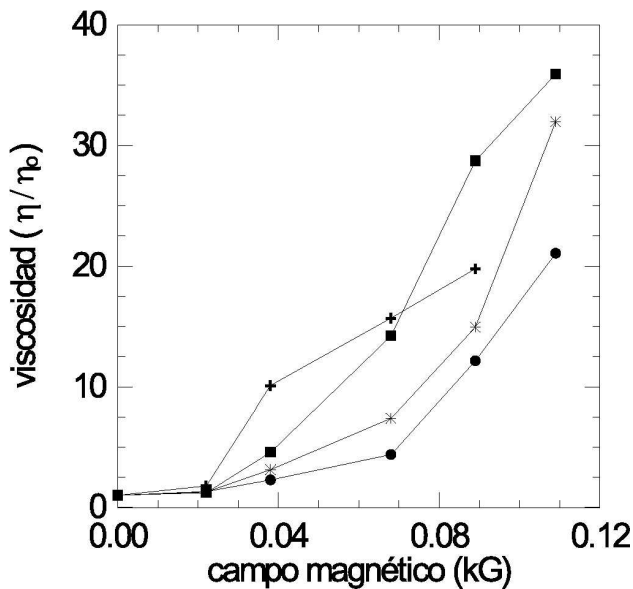


FIGURA 9. Información semejante a la de la figura anterior, ahora la rapidez del cono es 7rpm.

cambios importantes en la viscosidad como función del campo magnético. Para valores del campo menor a este umbral, el sistema responde muy débilmente.

Un aspecto importante en el estudio de los fluidos MR es establecer claramente su dependencia con el tamaño de las partículas. Para considerar este punto realizamos mediciones de la viscosidad en función del campo magnético para varias rapidezces de corte en cada una de las muestras de fluido MR, es decir, las que fueron preparadas con partículas de las moliendas de 2.5, 8, 30, 45 y 60 min. En las Figs. 8 y 9 se com-

paran los resultados de la viscosidad como función del campo magnético de las diferentes muestras de fluido MR a una rpm fija. En la Fig. 8 las mediciones corresponden a 1 rpm y es representativa de rapidezces de corte pequeñas (<3 rpm). La segunda corresponde a 7 rpm y es representativa de rapidezces de corte altas (>6 rpm). Se observa una clara dependencia de la viscosidad con el tamaño de partícula. De hecho, los resultados sugieren dos comportamientos. Uno en el régimen de baja rapidez de corte, donde a mayor tamaño de partícula, mayores son los cambios en la viscosidad. El otro, en el régimen de rapidez de corte alta, donde a mayor tamaño de partícula ocurren cambios menores en la viscosidad del sistema.

El comportamiento en el régimen de baja rapidez de corte puede entenderse si consideramos la relación entre las interacciones magnéticas y las interacciones térmicas. Estas últimas tienden a desordenar las partículas y disgregar las estructuras, en cambio las interacciones magnéticas tienden a ordenar las partículas y agregarlas en estructuras. Dado un campo magnético, mientras más pequeñas sean las partículas, las interacciones térmicas se hacen más importantes y las uniones entre las partículas se debilitan. Por lo que las estructuras con partículas más grandes se mantienen más fuertemente unidas, lo que implica a su vez que los cambios que producen en la viscosidad son mayores. Por otra parte no es claro el porqué del comportamiento en el régimen de rapidez de corte alta. Es posible que en este régimen las estructuras formadas por partículas grandes interactúen menos con las paredes del recipiente y sean más inestables frente a las fluctuaciones hidrodinámicas.

Los resultados del comportamiento reológico de los fluidos MR pueden ser utilizados para el diseño de dispositivos mecánicos. En la siguiente sección estudiamos el comportamiento de un amortiguador MR simplificado.

6. Sistema de amortiguación magneto-reológica

Los amortiguadores son dispositivos mecánicos que disipan las vibraciones en sistemas que son perturbados. Si el sistema experimenta vibraciones moderadas y la masa se conserva constante, entonces se usan amortiguadores denominados pasivos. Éstos no requieren de una fuente de energía externa, están basados en resortes y líquidos viscosos que disipan la energía mecánica de las vibraciones. Son diseñados para trabajar optimamente bajo ciertas condiciones, fuera de las cuales su desempeño es menos eficiente. Si el sistema experimenta frecuentemente cambios importantes, por ejemplo en la masa o están sometidos a un amplio rango en la amplitud de las vibraciones, entonces se usan amortiguadores denominados activos. Éstos requieren de una fuente de energía externa, pero a cambio son muy flexibles a las variaciones a las que se someta el sistema. Están basados en sensores y dispositivos que ejercen fuerzas para contrarrestar las vibraciones.

Un amortiguador MR se clasifica como semiactivo, se diseña para trabajar bajo ciertas condiciones. Si las condiciones

cambian, se activa un control sobre la viscosidad del fluido MR contenido en el amortiguador de acuerdo a las necesidades de disipación. Este control se apaga si las condiciones vuelven a sus valores iniciales. Si un automóvil se equipara con este tipo de amortiguadores, entonces al desplazarse por una carretera con pequeñas imperfecciones lo haría con el control apagado. Si pasa por una zona de baches, entonces experimentaría amplias vibraciones, inmediatamente el control se encendería y se mitigarían rápidamente las vibraciones. Al pasar la zona de baches el control se apagaría.

Para describir las vibraciones podemos introducir una variable x que represente el desplazamiento vertical en el tiempo t de la masa M , asociada al automóvil. La disipación del sistema la tomamos en cuenta por medio de la "constante de amortiguamiento" $C(B(t))$, donde $B(t)$ es el campo magnético aplicado al fluido MR contenido en el amortiguador y en general es una función del tiempo. $C(B(t))$ es una función del campo magnético porque éste determina la viscosidad del fluido MR la cual, a su vez, determina la disipación. La viscosidad puede variar desde un valor mínimo correspondiente a campo cero hasta un valor máximo que depende de la función de respuesta del fluido MR. La dependencia temporal $B(t)$ está determinada en general por las irregularidades de la trayectoria seguida por el automóvil. La dependencia específica de $B(t)$ depende del criterio de control adoptado. Los desplazamientos verticales que sufre el sistema a causa de las irregularidades de la trayectoria son consideradas mediante un cambio repentino en el valor de x . Aunque el perfil de la trayectoria sea constante, la velocidad horizontal determina la rapidez con la que se presentan los desplazamientos verticales. Por ejemplo, consideremos que el automóvil tiene que pasar por un tope de perfil rectangular. Primero experimenta un ascenso repentino, luego un descenso repentino, el tiempo entre los dos sucesos es la razón entre el ancho del tope y la velocidad horizontal. Si el automóvil tiene que pasar por una zona de vibradores, la frecuencia con la que el sistema experimenta las variaciones verticales depende de la velocidad horizontal. En estos términos un modelo simplificado de este amortiguador MR está dado por la ecuación

$$M\ddot{x} + C(B(t))\dot{x} + Kx = 0. \quad (1)$$

Este modelo es básicamente un sistema masa-resorte con amortiguamiento producido por un líquido viscoso, cuya soluciones deben ser estudiadas por simulación numérica.

Consideremos en particular un amortiguador MR con las siguientes características: $M=600$ Kg, $K = 23,687$ N/m y $C(B(t)=0)=1400$ N s/m. Supongamos que es parte de un automóvil que se mueve horizontalmente a 40 km/h. Durante 2 s se desplaza sin experimentar variaciones verticales. Luego pasa por un tope de perfil rectangular de 20 cm de altura y 40 cm de ancho, posteriormente, sigue sin experimentar más variaciones debidas a la trayectoria. El desplazamiento respecto del tiempo se obtiene al integrar la Ec. (1), para ello usamos un algoritmo de Runge-Kutta de cuarto orden escrito en FORTRAN.

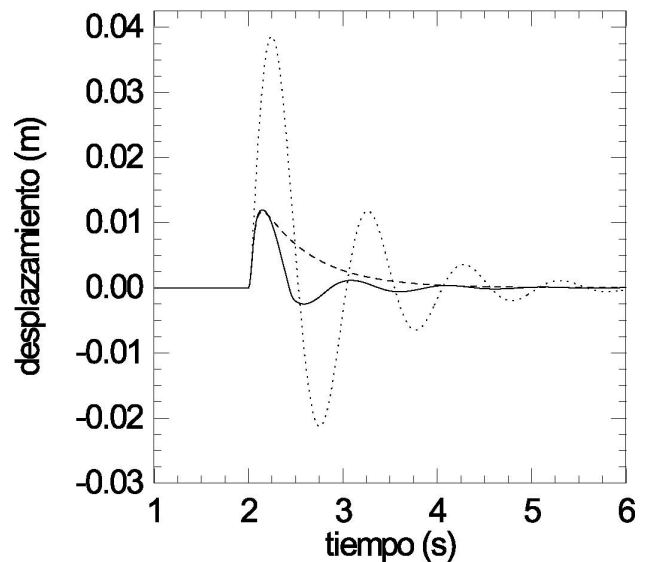


FIGURA 10. Comparación del comportamiento de un amortiguador para los 3 casos de la constante de amortiguamiento (ver texto) luego de que el sistema pasa por un tope. Las líneas punteada, segmentada y continua corresponden a los casos 1, 2 y 3, respectivamente.

Comparamos el comportamiento del sistema para 3 casos de la constante de amortiguamiento. En el primero, se mantiene el valor $C(B(t)=0)=1,400$ Ns/m. En este caso se simula el comportamiento de un amortiguador convencional, por supuesto simplificado. En el segundo caso consideramos la aplicación de un campo magnético durante el tiempo que el sistema experimenta vibraciones, consideramos un valor de $C(B(t))$ 10 veces mayor, es decir $C(B(t))=14,000$ Ns/m. Del comportamiento del fluido MR estudiado en las secciones anteriores, sabemos que es fácilmente alcanzable un aumento de 10 veces en la viscosidad. En el tercer caso se considera un control dinámico sobre el valor de la viscosidad, $C(B(t))$ toma 2 posibles valores según el siguiente criterio de control: si el sistema se aleja de la posición de equilibrio, entonces $C(B(t))=14,000$ Ns/m, si el sistema se dirige a su posición de equilibrio o si la magnitud de la velocidad es muy pequeña, entonces $C(B(t))=1,400$ Ns/m.

El resultado de la comparación para los 3 casos de $C(B(t))$ se muestra en la Fig. 10. Dado que el tiempo que demora el automóvil en pasar sobre el tope es 0.036 s, el efecto neto sobre el amortiguador es sólo sacarlo de su posición de equilibrio. En el primer caso observamos un movimiento con una amplitud máxima de aproximadamente 4 cm. El sistema regresa rápidamente a su posición de equilibrio, pero debido a la lenta disipación de energía describe un movimiento oscilatorio subamortiguado. En el segundo de los casos se observa un notable efecto de amortiguación, se consigue que la amplitud máxima de la oscilación sea de sólo 1.2 cm. El movimiento es sobreamortiguado, lo que significa que regresa lentamente a su posición de equilibrio y sin cambiar de dirección. Finalmente, en el tercer caso, se observa que la amplitud máxima es la misma que para el segundo de los casos pero regresa más rápido a su posición de equilibrio; característi-

ca conveniente para que el sistema esté preparado para otro cambio en las condiciones. Además el tiempo que permanece conectado el campo magnético es menor al segundo de los casos lo cual supone un ahorro energético respecto a éste. El hecho de poder variar la constante de amortiguamiento hace que el problema de oscilador con amortiguamiento sea más interesante y sea susceptible a ser resuelto con otras técnicas, como lógica difusa y control óptimo, entre otras.

7. Conclusiones

Hemos estudiado una dispersión de micropartículas de magnetita mineral que presenta características magneto-reológicas aun cuando las partículas son inhomogéneas y presentan

impurezas de silicatos. Nuestro sistema presenta una clara dependencia con el tamaño promedio de las partículas, resultado que puede ser muy importante si se explorara con mayor profundidad y con un mejor control de la dispersión de los tamaños y la forma de las partículas. Además mostramos que un modelo simplificado de amortiguador MR puede reducir rápidamente las vibraciones de un sistema y al mismo tiempo conservar baja la viscosidad del fluido que contiene durante la mayor parte del tiempo.

Acknowledgments

Este trabajo fue parcialmente apoyado por el PROMEP bajo el convenio 103.5/03/2568-234

1. D. Kittipoomwong y D. Klingenberg, *J. Rheol.* **49** (2005) 1521.
2. Y.T. Choi, J.U. Cho, S.B. Choi y N.M. Wereley, *Smart Mater. Struct.* **14** (2005) 1025.
3. W.H. Li, H. Du, G. Chen, S.H. Yeo y N.Q. Guo, *Smart Mater. Struct.* **11** (2002) 209.
4. R. Tao, *J. Phys.: Condens. Matter.* **13** (2001) R979.
5. P.P. Phule y J.M. Ginder, *MRS Bulletin* **19** (1998).
6. J. Popplewell y R.E. Rosensweig, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29** (1996) 2297.
7. E. Lemaire, G. Bossis y Y. Grasselli, *J. Magn. Magn. Mater.* **122** (1993) 51.
8. C.Y. Mendoza y R. Valencia, "Estudio de propiedades físicas y aplicaciones de fluidos magneto-reológicos", Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2005.
9. S.A. Demchuk, *J. Magn. Magn. Mater.* **122** (1993) 312.
10. J.M. Ginder, *MRS Bulletin* **26** (1998).
11. Y. Nahmad-Molinari, C.A. Arancibia-Bulnes y J.C. Ruiz-Suarez, *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 727.
12. J.L. Carrillo, F. Donado y M.E. Mendoza, *Phys. Rev. E* **68** (2003) 061509.
13. D. Wirtz y M. Fermigier, *Phys. Rev. Lett.* **72** (1994) 2294.
14. A.S. Silva, R. Bond, F. Plouraboue y D. Witz, *Phys. Rev. E* **54** (1996) 5502.
15. J.H.E. Promislow y A.P. Gast, *Phys. Rev. E* **56** (1997) 642.
16. S. Melle, G.G. Fuller y M.A. Rubio, *Phys. Rev. E* **61** (2000) 4111.
17. J.E. Martin, *Phys. Rev. E* **63** (2000) 011406.
18. Y. Nagaoka, H. Morimoto y T. Maekawa, *Phys. Rev. E* **71** (2005) 032502.
19. J.L. Carrillo, M.E. Mendoza y F. Donado, *J. Stat. Mech.* **P06** (2005) P06001.
20. M.D. Symans y M.C. Constantinou, *Eng. Struct.* **21** (1999) 469.
21. J. Zhang y P.N. Roschke, *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* **83** (1999) 209.
22. H. Janocha, *Sensor. Actuat. A-Phys.* **91** (2001) 126.
23. W.L. Qu, Y.L. Xu y M.Y. Lv, *Eng. Struct.* **24** (2002) 517.
24. U. Aldemir, *J. Sound Vib.* **266** (2003) 847.
25. I. Bica, *J. Magn. Magn. Mater.* **270** (2004) 321.
26. M. Yalcintas y H. Dai, *Smart Mater. Struct.* **13** (2004) 1.
27. S. Sassi, K. Cherif, L. Mezghani, M. Thomas y A. Kotrane, *Smart Mater. Struct.* **14** (2005) 811.
28. G. Song y M. Zeng, *Smart Mater. Struct.* **14** (2005) 369.
29. Lord Corporation, MR Technology Description, <http://www.lord.com>, ver también <http://www.firstscience.com/SITE/ARTICLES/robotblood.asp>
30. X. Huang, W.Y. Tam y P. Sheng, *Phys. Rev. E* **72** (2005) 020501.
31. J.C. Lau, L. Shi, W.T. Tam y P. Sheng, *Phys. Rev. E* **67** (2003) 052502.
32. W. Wen, D.W. Zheng y K.N. Tu, *J. Appl. Phys.* **85** (1999) 530.
33. J.E. Martin, J. Odinek, T.C. Halsey y R. Kamien, *Phys. Rev. E* **57** (1998) 756.
34. T.C. Halsey, J.E. Martin y D. Adolf, *Phys. Rev. Lett.* **68** (1992) 1519.
35. J.E. Weber, A.R. Goni, D.J. Pusiol y C. Thomsen, *Phys. Rev. E* **66** (2002) 021407.
36. F.M. Ytreberg y S.R. McKay, *Phys. Rev. E* **61** (2000) 4107.
37. P. Jund, S.G. Kim, D. Tomanek y J. Hetherington, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 3049.
38. F. Gazeau, C. Baravian, J.C. Bacri, R. Perzynski y M.I. Shliomis, *Phys. Rev. E* **65** (1997) 614.
39. H.W. Muller, *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 3907.
40. J.C. Bacri, R. Perzynski, M.I. Shliomis y G.I. Burde, *Phys. Rev. Lett.* **75** (1995) 2128.
41. H. Morimoto, T. Maekawa y Y. Matsumoto, *Phys. Rev. E* **65** (2002) 061508.
42. J. Embs, H.W. Muller, C. Wagner, K. Knorr y M. Lucke, *Phys. Rev. E* **61** (2000) R2196.

43. A. Zeuner, R. Richter y I. Rehberg, *Phys. Rev. E* **58** (1998) 6287.
44. L. Mao y H. Koser, *Nanotechnology* **17** (2006) S34.
45. R. Kraub, M. Liu, B. Reimann, R. Richter y I. Rehberg, *New Journal of Physics* **8** (2006) 18.
46. Y.Qi, L. Zhang y W. Wen, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36** (2003) L10.
47. Y Zhen, M.F. Golnaraghi y G.R. Heppler, *J. Intel. Mat. Syst.* **15** (2004) 27.
48. W.M. Winslow, *J. Appl. Phys.* **20** (1949) 1137.
49. J. Rabinow, "Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device", US Patent 22575360 (1951), "High-speed Magnetic Fluid Clutch", US Patent 2622713 (1952), "Radial Flux Magnetic Fluid Clutch", US Patent 2629471 (1953).
50. D.L. Klass y T.W. Martinek, *J. Appl. Phys.* **38** (1967) 75.
51. D.L. Klass y T.W. Martinek, *J. Appl. Phys.* **38** (1967) 67.
52. J.L. Neuringer, *Phys. Rev.* **145** (1966) 64.
53. J.P. MacTague, *J. Chem. Phys.* **51** (1969) 133.
54. W.F. Hall and S.N. Busenberg, *J. Chem. Phys.* **51**, 137 (1969).
55. R.E. Rosensweig, R. Kaiser y G. Miskolczy, *J. Colloid Interface Sci.* **29** (1969) 680.
56. R.E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics* (Cambridge University Press, New York, 1985).
57. Z.P. Shulman *et al.*, *Int. J. Multiphas. Flow* **12** (1986) 935.
58. Z.P. Shulman, R.G. Gorodkin, E.V. Korobko y V.K. Gleb, *J. NON-NEWTON. FLUID* **8** (1981) 29.
59. A.F. Sprecher, J.D. Carlson y H. Conrad, *Mater. Sci. Eng.* **95** (1987) 187.
60. Z.P. Shulman, E.V. Korobko y Yu.G. Yanovskii, *J. Non-Newton. Fluid* **33** (1989) 181.
61. A.P. Gast y C.F. Zukoski, *Adv. Colloid Interfac.* **30** (1989) 153.
62. F. Donado, "Fluidos Electro y Magneto-reológicos: Teoría y Experimento", Tesis de Doctorado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2002.
63. D.W. Felt, M. Hagenbuchle, J. Liu y J. Richard, *Proc. 5th. Int. Conf. on ER Fluids and MR Suspensions and Associated Technology* (Ed. W.A. Bullough, World Scientific, Singapore, 1996) p. 738.
64. P.P. Phule, *MRS Bulletin* **23** (1998).
65. M. Kimata, D. Nakagawa, y M. Hasegawa, *Powder Technol.* **132** (2003) 112.
66. J. Jun, S. Uhm, J. Ryu y K. Suh, *Colloid. Surface. A* **260** (2005) 157.
67. M.E. Mendoza, F. Donado, R. Silva, M.A. Pérez y J.L. Carrillo, *J. Phys. Chem Solids* **66** (2005) 927.
68. H. Pu, F. Jiang y Z. Yang, *Mater. Lett.* **60** (2006) 94.
69. US Patent & Trademark Office, búsqueda de la palabra magnetorheological en los campos *title* o *abstracts*, <http://appft1.uspto.gov/netahtml/PTO/search-bool.html>
70. M.A. Pérez-Osorio, "Síntesis, crecimiento, estudio estructural y térmico de microcristales de magnetita", Tesis de Licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2004.
71. G. Doñu, "Obtención de micropartículas homogéneas para la preparación de fluidos magneto-reológicos", Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2005.