

CARACTERIZACIÓN REOMÉTRICA DE UN FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO DE CARBONILO DE HIERRO EN EL FLUJO DE POISEUILLE.

Arturo F. Méndez Sánchez¹, Carlos P. Ortiz Lara, Edith Cortez Martínez, Emilio Ruiz Betanzos

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

¹Email: afmendezs@ipn.mx

RESUMEN

Los fluidos magneto-reológicos están compuestos de un fluido base no magnético usualmente un medio de aceite en donde se dispersan partículas magnéticas. Estos fluidos tienen la propiedad de incrementar su viscosidad de manera abrupta en función de la intensidad de campo magnético a la que son sometidos. Esto es debido a la formación de cadenas inducidas en la dirección del campo magnético, pero una vez que el campo magnético es removido la viscosidad del fluido se restablece a su estado inicial. Se estudian este tipo de fluidos debido al interés de entender el origen de los fenómenos e inestabilidades de flujo que aparecen en este tipo de suspensiones. En este trabajo se presentan resultados experimentales de un fluido magneto-reológico constituido de partículas de carbonilo de hierro en glicerina al 10% en concentración. Se determinaron las curvas de flujo correspondientes. Los resultados obtenidos muestran la presencia del fenómeno de deslizamiento que favorece el flujo de la suspensión en función de la intensidad del campo magnético y la estructuración de cadenas en la dirección del flujo.

INTRODUCCIÓN

Los materiales inteligentes o activos son materiales que tiene la habilidad de cambiar sus propiedades físicas ante la presencia de un estímulo externo y este cambio es reversible cuando se elimina este estímulo. Debido a estas propiedades, existe interés en utilizarlos como sensores, actuadores, o ambos. En la actualidad existen diseños y prototipos innovadores en diversas aplicaciones tecnológicas de gran impacto [1, 2]. Los materiales inteligentes están clasificados en: materiales piezoeléctricos que son cerámicos policristalinos sensibles al acoplamiento no lineal entre la respuesta mecánica y la eléctrica, aleaciones de memoria, que son materiales deformados plásticamente debido a la presencia de un esfuerzo externo, materiales magneto y electro sensitivos, sustancias o materiales que pueden deformarse bajo la presencia de un campo externo y su deformación depende de la magnitud del campo aplicado o las suspensiones que pueden incrementar su viscosidad y su esfuerzo de cedencia en función del campo eléctrico o magnético aplicado.

Particularmente, los fluidos magneto-reológicos son constituidos de dos fases una fase líquida usualmente un fluido newtoniano y una fase dispersa de partículas magnetizables, debido a su capacidad de cambiar su viscosidad en presencia de un campo magnético, estos fluidos han tenido gran interés de aplicación pues han sido considerados inicialmente para su uso en diseños como en amortiguadores, clutch y frenos, pero actualmente se ha propuesto su uso en válvulas, bombas de control, juntas artificiales, soportes de motor, propagación de sonido, así como en el uso de espumas magneto-reológicas y elastómeros [3, 4]. Esto ha permitido profundizar en estudios donde se han analizado diferentes maneras de agregación de las fases dispersas en el medio de manera normal o invertida y de estructuras más complejas.

En este trabajo se reportan experimentos del flujo de estos fluidos magneto-reológicos utilizando la geometría de Poiseuille con la finalidad de entender la dinámica que se genera durante el flujo de estas suspensiones magneto activas en campos magnéticos externos paralelos a la dirección de flujo. Es de mencionar que la mayoría de los estudios realizados en estas suspensiones analizan condiciones de flujo con campos magnéticos externos perpendiculares a la dirección de flujo de los fluidos y se tiene gran interés de entender el origen de los fenómenos e inestabilidades de flujo que aparecen en este tipo de suspensiones. En este trabajo se estudia un fluido magneto-reológico constituido de partículas de carbonilo de hierro en glicerina al 10% en concentración.

TEORÍA

Fluidos magneto-reológicos

Los fluidos magneto-reológicos están constituidos de dos fases, una fase líquida de comportamiento reológico newtoniano y una fase dispersa de partículas sólidas magnetizables cuyo tamaño puede variar desde partículas micrométricas hasta nanométricas. Una de las características de este tipo de fluidos es que cambian su viscosidad y su esfuerzo de cedencia de manera repentina cuando se aplica un campo magnético externo. Este comportamiento es resultado de la formación de cadenas de partículas alineadas en la dirección del campo magnético y/o a la formación de estructuras más complejas de estas partículas. Los fluidos magneto-reológicos presentan un comportamiento newtoniano bajo flujo en ausencia de campos externos, pero bajo la presencia del campo magnético externo, el comportamiento observado es de un fluido de Bingham [5]. No obstante, existen diversos modelos que se utilizan para ajustar el comportamiento adelgazante observado en ellos [6]. En la figura 1, se ilustran comportamientos reológicos de este tipo de fluidos.

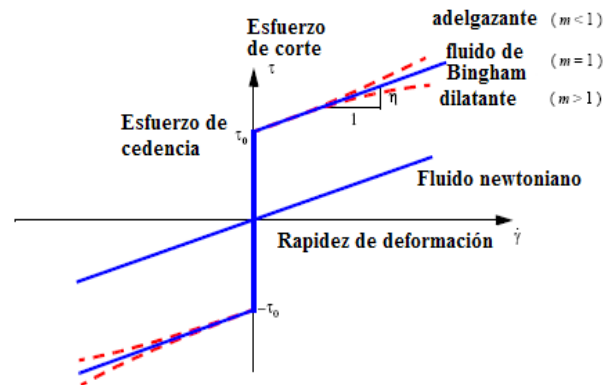


Figura 1. Comportamiento reológico observado en los fluidos magneto-reológicos. Se observa un comportamiento newtoniano e ausencia de un campo magnético externo, mientras que los otros comportamientos ilustrados se observan en la presencia de un campo magnético perpendicular al flujo y cuyo comportamiento es reversible al remover el campo aplicado.

La formación de las estructuras y cadenas bajo flujo da lugar a un comportamiento anisotrópico, por lo que se han observado diversas inestabilidades de flujo, como el deslizamiento y flujo repentino. Cabe mencionar que la mayoría de los estudios se han realizado en geometrías rotacionales, como cono y plato y placas paralelas [7]. Mientras que investigaciones realizadas en el flujo de Poiseuille que es el flujo que se genera mediante un gradiente de presión son escasos, A. F. Méndez et al [8], analizan la aparición de inestabilidades de flujo, como el flujo repentino y la presencia de oscilaciones en rapidez de deformación para un fluido magneto-reológico de carbonilo de hierro en glicerina en el flujo de Poiseuille donde controlan el esfuerzo aplicado a partir de un gradiente de presión aplicando campos magnéticos perpendiculares a la dirección de flujo.

Y. Pappas y D. J. Klingenberg [9] simulaban el flujo de una suspensión magneto-reológica en el plano de Poiseuille considerando fuerzas magnéticas entre partículas usando una aproximación en límite del punto dipolar, paredes magnetizables y no magnetizables. Ellos encontraron que la condición de deslizamiento en la frontera no logra capturar un comportamiento del tipo Bingham, y muestran el desarrollo de microestructuras lamelares gruesas orientadas en la dirección del flujo. En contraste, la condición de no deslizamiento en la frontera reproduce el comportamiento de Bingham y la formación de agregados lamelares finos en la microestructura. La presente investigación analiza el flujo de estos fluidos magneto-reológicos en el flujo de Poiseuille aplicando

un campo magnético paralelo al campo de flujo poniendo especial interés en el efecto del tamaño de partícula pues se analizan partículas de 4micras de diámetro para preparar estos fluidos

Flujo de Poiseuille

El flujo de Poiseuille consiste en hacer pasar un fluido que proviene de un recipiente de tamaño h , a un capilar de diámetro D con la restricción $h/D \geq 15$, empleando un gradiente de presión constante en la entrada del capilar (véase figura 2). El flujo en capilares está dividido en 3 regiones: la región de entrada (1), la región viscométrica (2) y región de salida (3), usualmente se minimizan las regiones 1 y 3 para que los efectos de estas regiones puedan ser despreciados y sea predominante la región viscométrica.

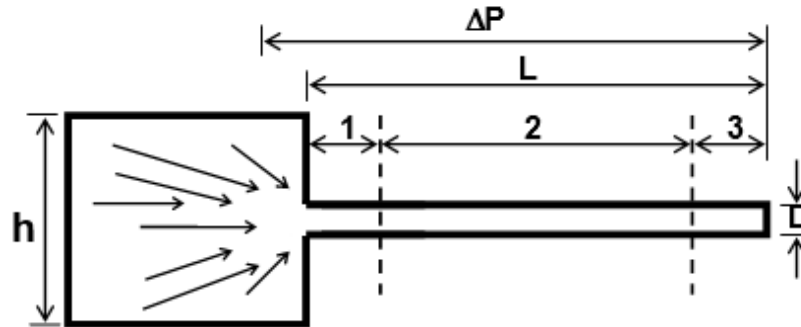


Figura 2. Flujo de Poiseuille, regiones del flujo: entrada (1), viscométrica (2) y región de salida (3). ΔP corresponde al gradiente de presión, h es la altura del contenedor de fluido, L es la longitud del capilar y D es su diámetro.

Para la determinación de las curvas de esfuerzo y rapidez de deformación, se evalúan las expresiones determinadas por las ecuaciones (1) y (2). Expresiones que pueden encontrarse deducidas en la literatura [10],

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (1)$$

$$\tau_w = \frac{\Delta P}{2\left(\frac{L}{R}\right)} \quad (2)$$

En este caso, L y R corresponden a los parámetros geométricos del capilar y Q es el gasto volumétrico.

PARTE EXPERIMENTAL

El equipo utilizado fue un viscosímetro de capilar a presión constante en donde se genera el flujo de Poiseuille. Este consiste de un recipiente contenedor presurizado que alimenta el fluido hacia un segundo un depósito o contenedor que se mantiene a presión constante. El fluido se mueve desde este contenedor de altura $h=0.055\text{m}$ a través de un capilar de vidrio y se recolecta el gasto volumétrico (Q). Los parámetros geométricos del capilar utilizado son $L=0.1085\text{m}$ y $D=0.002\text{m}$. En este caso, la razón de longitud a diámetro fue $L/D=54.25$, y la razón de contracción fue $h/D=27.5$. La presión (ΔP) entre los extremos del capilar fue medido por un transductor de presión diferencial Valydine. En la figura 3 se ilustran el dispositivo utilizado. Las mediciones se realizaron a una temperatura de $T=22^\circ\text{C}$. Se determinó la presión del capilar (ΔP) y el gasto volumétrico (Q) que se genera sin el campo magnético. Después, se aplicó el campo magnético en la dirección paralela al flujo, y se volvió a medir la presión del capilar y el gasto volumétrico para valores de presión de inyección distintos.

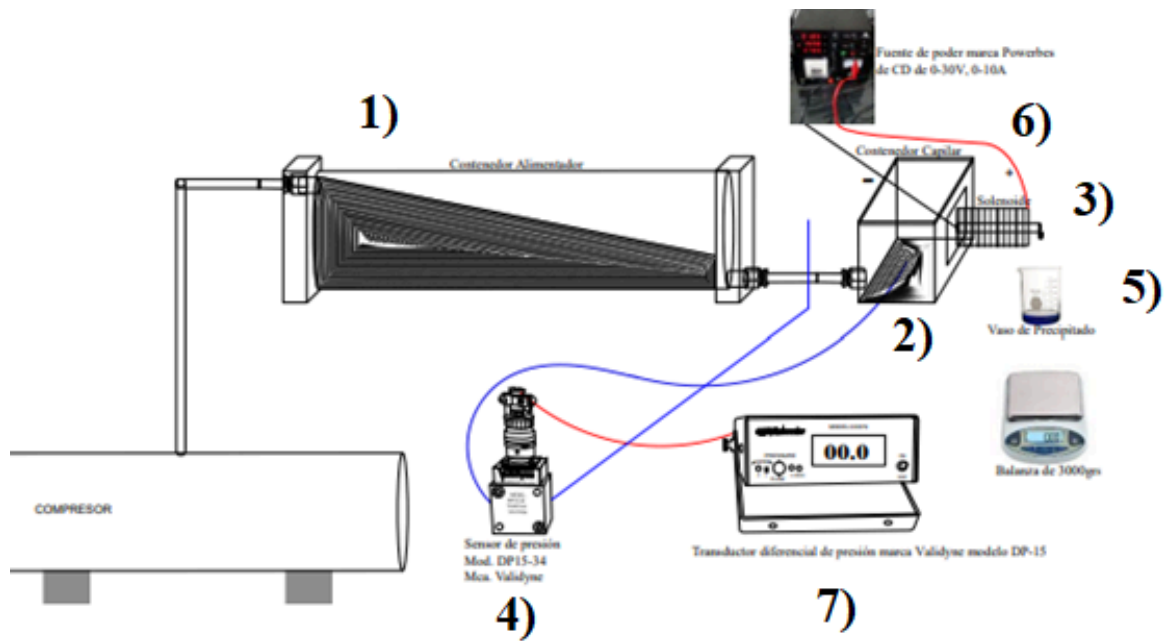


Figura 3. Reómetro de capilar, componentes: 1) recipiente alimentador presurizado, 2) recipiente contenedor, 3) capilar de vidrio, 4) transductor de presión diferencial, 5) colector de fluido 6) solenoide generador de campo y 7) indicador de lectura de presión.

El sistema de generación de campo magnético consiste en un solenoide construido y adaptado al reómetro de capilar cuya longitud es de $L_s=0.083\text{m}$ y consta de 594 vueltas, con un radio de $a=0.009\text{m}$. A éste se le acopló una fuente de poder marca Powerbes de corriente directa de 30V y 10A. La distribución del campo magnético que genera el solenoide en el capilar se calculó empleando la expresión dada en (3), que genera un campo magnético paralelo a la dirección de flujo y que cubre la región viscométrica.

$$B(x) = \frac{\mu_0 i N}{2L_s} \left(\frac{\frac{L_s}{2} - x}{\sqrt{\left(\frac{L_s}{2} - x\right)^2 + a^2}} + \frac{\frac{L_s}{2} + x}{\sqrt{\left(\frac{L_s}{2} + x\right)^2 + a^2}} \right) \quad (3)$$

RESULTADOS

En la figura 4 se muestran la curva de flujo para el fluido con partícula de 4 micras en una concentración de 5% de partículas de carbonilo para 3 corridas diferentes. Puede verse que al someterla a flujo existe un cambio drástico en dichas curvas, en la primera corrida un comportamiento no newtoniano adelgazante, mientras que para las otras corridas se tiene un comportamiento newtoniano. Esto es resultado del trabajo mecánico que se hace en el fluido por lo que esto es evidencia de efectos de tixotropía, que desaparece a partir de la segunda corrida. Este comportamiento tixotrópico se atribuye a que inicialmente el carbonilo está formando agregados probablemente debido a cargas electrostáticas, pero una vez que está en flujo se rompen estas estructuras por lo que le comportamiento deja de ser no newtoniano y se comporta como un fluido newtoniano.

También en esta gráfica se incluyen las ecuaciones constitutivas de cada curva. Como resultado se concluye que a partir de la segunda corrida el comportamiento en flujo ya no cambia, es reproducible y la conformación estructural del fluido ya no cambia apreciablemente. Esto permitió establecer un protocolo de experimentación de los fluidos magneto-reológicos que consistió en realizar un trabajo mecánico por el flujo inducido en el fluido haciendo al menos dos corridas antes de aplicar el campo magnético. Este protocolo también fue aplicado a las suspensiones de 10% de carbonilo de hierro.

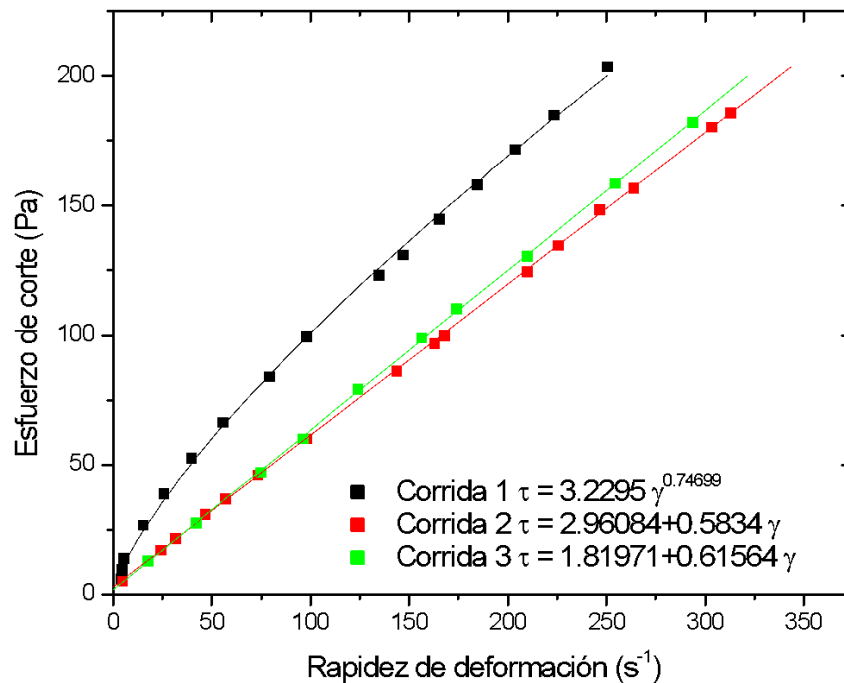


Figura 4. Curva de flujo que identifica la necesidad de realización de trabajo mecánico. Después de la segunda corrida la curva de flujo es reproducible y presenta el comportamiento newtoniano característico.

En la Figura 5, se muestran las curvas de flujo obtenidas para el fluido magneto-reológico a una concentración del 10% de partículas de carbonilo de hierro. Estas curvas fueron obtenidas a distintas intensidades de campo magnético. Como puede verse, el comportamiento observado es newtoniano a intensidades de campo magnético menores a $B=25mT$, por lo que carece de esfuerzo de cedencia. Mientras que a valores mayores a $B=25mT$, las curvas de flujo muestran un comportamiento de fluido de Bingham caracterizado por un esfuerzo de cedencia. Estos resultados contrastan con las observaciones experimentales obtenidas en flujos donde el campo magnético es perpendicular a la dirección de flujo. Pues normalmente se observa un comportamiento no newtoniano y la aparición de un esfuerzo de cedencia. Además, se puede ver que la pendiente de las curvas de flujo disminuye conforme se incrementa el campo magnético, excepto en la curva donde $B=25mT$ pues ahí el valor de la pendiente se incrementa lo que indica la aparición de algún otro fenómeno.

El significado físico de la pendiente corresponde al coeficiente de viscosidad. Esto es, se observa una disminución de la viscosidad conforme se incrementa el campo magnético, pero el comportamiento viscoso es newtoniano para todos los campos magnéticos aplicados. Este resultado contrasta con lo observado en experimentos donde el campo de flujo es perpendicular al campo magnético pues la viscosidad se incrementa y muestra un comportamiento no newtoniano adelgazante. Este resultado sugiere que se está induciendo la formación de cadenas de partículas en la dirección del flujo lo que genera el incremento en el gasto volumétrico en función del campo magnético. Este fenómeno es conocido como deslizamiento y en este caso no podemos determinar si se trata de un deslizamiento real o aparente. Sin embargo, este resultado está en buen acuerdo con las simulaciones obtenidas por Y. Pappas y D. J. Klingenberg [9] donde consideraron una suspensión magneto-reológica en el plano de Poiseuille y encontraron que usando una condición de deslizamiento en la frontera no logra capturar un comportamiento del tipo Bingham, y muestran el desarrollo de microestructuras lamelares gruesas orientadas en la dirección del flujo. Sin

embargo, mas evidencia experimental se necesita para corroborar si se trata de deslizamiento real como lo muestra la simulación.

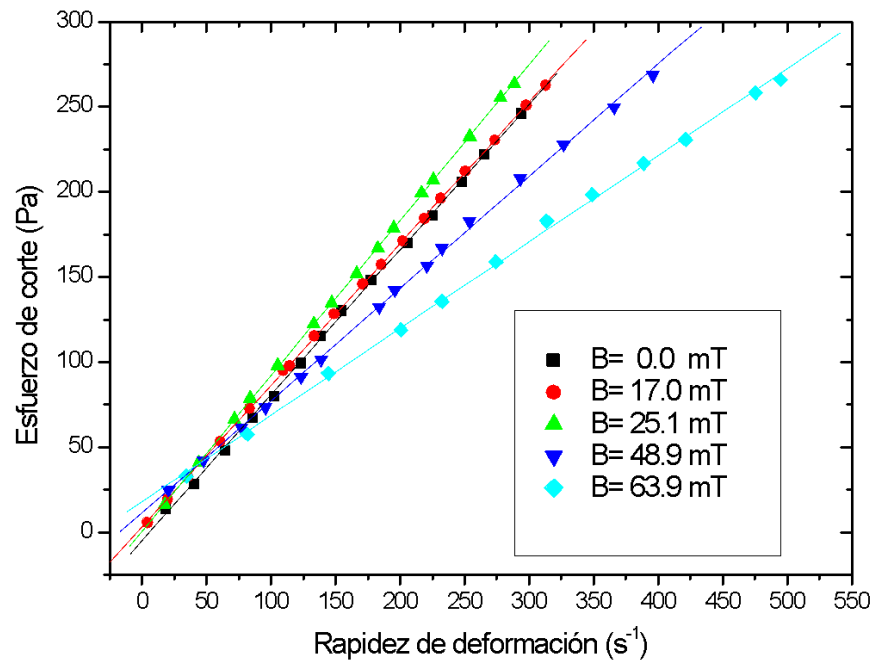


Figura 5 Curvas de flujo para una suspensión magneto sensible de partículas de carbonilo de hierro al 10%. Se muestra una disminución de la viscosidad conforme se incrementa el campo magnético aplicado y tamaño de partícula de 4 micras.

La excepción cuando la curva de flujo presenta un incremento en su pendiente para $B=25\text{mT}$, identifica la aparición de una ventana en campo magnético donde se presenta la formación de una estructura más compleja, lo que sugiere una mayor interacción magnética entre las partículas formando agregados. Pero no tenemos algún método para tratar de elucidar el tipo de estructura que se forma, aunque se podrían emplear técnicas de ultrasonido para esto. Adicionalmente, a partir de este valor de campo magnético, el comportamiento observado en las curvas de flujo corresponde a un fluido de Bingham con un esfuerzo de cedencia. En la tabla 1, se presentan las ecuaciones constitutivas correspondientes a las curvas de flujo donde se muestra evidencia del coeficiente de viscosidad que disminuye conforme se incrementa el campo magnético y el incremento de viscosidad que da lugar al cambio en la suspensión donde se considera la formación de una estructura más compleja de partículas de carbonilo. Asimismo, se muestra la ordenada al origen que corresponde al esfuerzo de cedencia, pero como puede verse este valor es muy pequeño a valores menores a $B=25.14\text{ mT}$ por lo que no se considera un esfuerzo de cedencia real, como ocurre a valores mayores donde se muestra un incremento marcado en este esfuerzo de umbral.

Tabla 1. Ecuaciones constitutivas obtenidas en función del campo magnético aplicado.

Campo magnético (mT)	Ecuación de ajuste	Coeficiente de viscosidad (Pa s)	Esfuerzo inicial (Pa)
0	$\tau_w = -4.986 + 0.854 * \dot{\gamma}_w$	0.854	-4.986
17.0	$\tau_w = 2.958 + 0.832 * \dot{\gamma}_w$	0.832	2.958

25.14*	$\tau_w = 0.6128 + 0.913 * \dot{\gamma}_w$	0.913	0.6128
48.9	$\tau_w = 11.26 + 0.659 * \dot{\gamma}_w$	0.659	11.26
63.9	$\tau_w = 17.703 + 0.508 * \dot{\gamma}_w$	0.508	17.703

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió fluido magneto-reológico constituido de partículas de carbonilo de hierro al 10% en concentración en glicerina. Se utilizó el flujo de Poiseuille en este estudio, flujo que es generado mediante un gradiente de presión.

Se determinaron las curvas de flujo correspondientes a diferentes intensidades de campo magnético externo aplicado en la dirección del flujo del fluido y se observó la presencia del fenómeno de deslizamiento evidenciado por un incremento del gasto volumétrico lo que se atribuye a la alineación de cadenas de partículas en la dirección del flujo del fluido. El comportamiento reológico mostró de inicio un comportamiento newtoniano seguido de un comportamiento de Bingham a partir de un valor de campo magnético en donde se sugiere se debe a la formación de estructuras más complejas al incrementarse el campo magnético.

BIBLIOGRAFÍA

1. O. López García, Carnicero López A., Ruiz Pablos R., "Los materiales inteligentes I/II, introducción a los materiales del siglo XXI," anales de mecánica y electricidad, 2003, pp. 40-46.
2. J. F. Legrand, "Morfology and structure of polymer electrets and ferroelectric polymers," IEEE trans. Electrical insulation, vol. 28, No. 3, 1993, pp. 336-343.
3. J. D. Vicente, Klingenberg D.J., Hidalgo-Alvarez R., "Magnetorheological fluids: a review", SoftMatter 7, 2011, pp. 3701–3710.
4. S.W. Charles, "The Preparation of Magnetic Fluids", Odenbach, S. (editor) Ferrofluids. Lecture Notes in Physics, vol. 594. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-45646-5_1, 2002.
5. A.B. Shorey, Kordonski WI, Gorodkin SR, Jacobs SD, Gans RF, Kwong KM, Farny CH, "Design and testing of a new magnetometer," Review of scientific instruments, No. 70, 1999, pp.: 4200-4206.
6. S. T. Lim, Cho M.S., Jang I.B., Choi H. J., "Magnetorheological characterization of carbonyl iron based suspension stabilized by fumed silica," J. of Magnetism and Magnetic Materials No. 282, 2004, pp.:170-173.
7. H. M. Laun, Kormann C, Willenbacher N, "Rheometry on magnetorheological (MR) fluids I. steady shear flow in stationary magnetic fields," Rheol. Acta No. 35, 1996, pp.:417-432s.
8. A. Méndez, Pérez L, Rivera I and Paniagua A, "Instabilities in the Poiseuille Flow of a magnetorheological carbonyl-iron suspension," IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 792, 2017.
9. Y. Pappas, Klingenberg D.J., "Simulations of magnetorheological suspensions in Poiseuille flow," Rheol. Acta, No. 45, 2006, pp.:621-629.
10. C. W. Macosko, "Rheology Principles, Measurements, and Applications," Wiley-VCH, 1a Edición, Estados Unidos de América, 1994.