

Ferrofluidos

*Autores: Barbeito, Pablo – Carrá, Martín – Sarlinga, Mariel
Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería – Física del Estado Sólido
Septiembre 2009*

Resumen

Un ferrofluido (FF) es un coloide que se polariza fácilmente ante la presencia de un campo magnético. Son pequeñas partículas de hierro recubiertas por un líquido surfactante que le confiere propiedades de líquido. Ante la presencia de un campo magnético vertical la superficie espontáneamente forma un patrón corrugado muy regular, ese efecto se conoce como Inestabilidad en campo normal. El patrón corrugado incrementa la superficie de energía libre y la energía gravitacional de líquido, pero reduce la energía magnética. Los FF se utilizan en campos tan diversos como medicina, mecánica, acústica, óptica, aplicaciones militares y aeroespaciales. Se encuentran en fase de desarrollo aplicaciones ópticas y mejoras en las utilizaciones actuales. Un auténtico FF es difícil de crear en la actualidad, requiriendo elevadas temperaturas y levitación electromagnética. Ya se han introducido algunas aplicaciones tecnológicas de los ferrofluidos y hay muchas otras en perspectiva. Los FF constituyen la base de nuevas e ingeniosas técnicas en numerosos campos de aplicación. Se trata de un coloide que puede tener numerosas aplicaciones, aún hoy desconocidas.

Palabras Clave: *Ferrofluido – Paragnetismo – Superparamagnetismo – Ferromagnetismo – Coloide magnético – Nanopartículas de Hierro – Inestabilidad en Campo Magnético -*

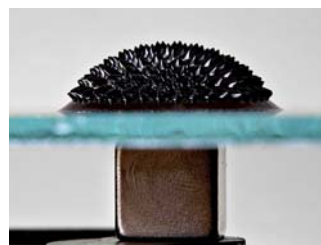
Introducción

Un ferrofluido (nombre que proviene del Latín ferrum que significa hierro, y la palabra fluido) es un líquido que altamente polarizable en presencia de campo magnético.

Los FF son mezclas coloidales de nanopartículas **ferromagnéticas** o **ferrimagnéticas** suspendidas en un fluido que usualmente es un solvente orgánico o agua. Las partículas están recubiertas por un **surfactante** para prevenir su aglomeración que pueden provocar a las fuerzas de van der Waals y las magnéticas.

A pesar de que el nombre puede sugerir otra cosa, los FF no tienen propiedades ferromagnéticas ya que no retienen su magnetización en ausencia de un campo externo aplicado. De hecho los fluidos muestran paramagnetismo (**bluk-scale**) y generalmente son descriptos como superparamagnéticos debido a la gran

susceptibilidad magnética. Un fluido ferromagnético permanente es difícil de crear en la actualidad.



Ferrofluido sobre cristal, con un imán en la parte inferior.

La diferencia entre FF y **magnetorheological fluid (MR fluid)** es el tamaño de las partículas. Las partículas en un FF son nanopartículas suspendidas por movimiento Browniano y generalmente no se asientan bajo condiciones normales. En los MR hay partículas micrométricas que son demasiado pesadas para que el movimiento Browniano

las mantenga en suspensión, y por lo tanto se asientan en un tiempo debido a la diferencia de densidad inherente entre las partículas y el fluido. Debido a esto los dos fluidos tienen aplicaciones bien diferentes.

Descripción

Uno de los primeros métodos y de más fácil preparación de ferrofluidos fue desarrollado por Stephen Papell en la NASA al comienzo de la década del 60. El fluido consistía en partículas de magnetita (una mezcla molecular de los óxidos de hierro FeO y Fe₂O₃) finamente divididas y suspendidas en querosene. Para evitar que las sustancias se depositaran o formaran grandes núcleos Papell añadió Ácido Oleico. Anteriormente se habían realizado mezclas similares pero con partículas más grandes, esto ocasionaba que frente a un campo magnético el líquido se congelaba o se transformaba en una masa sólida, en cambio con las partículas más finas, se magnetiza pero permanece en estado líquido.

Los FF se componen de nanopartículas (el diámetro usual es de 10nm o menos) de magnetita, hemática o algún otro componente que contenga hierro. Esto es lo suficientemente pequeño para que la agitación térmica las distribuya uniformemente dentro del fluido portador, así como para contribuir a la respuesta magnética general del fluido. Esto es análogo a la forma como los iones de una solución salina acuosa paramagnética (por ejemplo, una solución acuosa de sulfato de cobre o cloruro de manganeso) le confieren dichas propiedades paramagnéticas.

Los FF son pequeñas partículas de hierro recubiertas por un líquido surfactante que son agregados a agua o aceite, que le confiere propiedades de líquido. Los FF son suspensiones coloidales (materiales con

propiedades de más de un estado de la materia). En este caso, los dos estados de la materia son sólido y líquido. Esta capacidad de cambiar fases con la aplicación de un campo magnético permite su utilización como sello líquido hermético, lubricantes y abren la posibilidad de más aplicaciones en sistemas nanoelectromecánicos.

Los verdaderos FF son estables. Esto significa que las partículas sólidas no se aglomeran o las fases se separan en un campo magnético muy fuerte. De todos modos los surfactantes tiende a descomponerse al paso del tiempo (algunos años) y eventualmente las nanopartículas se aglomeran y separan, dejando de contribuir a la respuesta magnética del fluido.

El término **magnetorheological fluid (MR fluid)** se refiere a líquidos similares a los FF que se solidifican en presencia de un campo magnético. **magnetorheological fluid (MR fluid)** tienen partículas magnéticas micrométricas, es decir que son de dos o tres órdenes de magnitud superior a las de los FF.

De todos modos, los FF pierden sus propiedades magnéticas a temperaturas altas (conocida como **temperatura de Curie**).

La Ley de Curie indica que:

$$M = C \cdot \frac{B}{T}$$

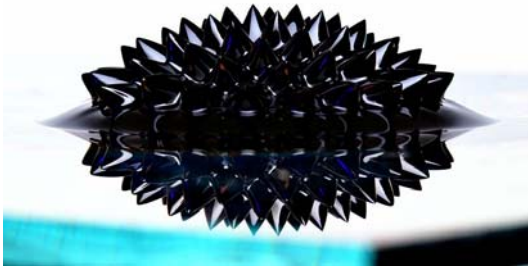
En donde:

M es la magnetización resultante. B es el campo magnético, medido en Tesla. T es la temperatura absoluta, en Kelvin y C es la constante específica del material (constante de Curie).

La temperatura específica depende del tipo de nanopartícula, el surfactante y el fluido.

Inestabilidad en campo normal

Al someter un fluido paramagnético a un campo magnético vertical la superficie espontáneamente forma un patrón corrugado muy regular, ese efecto se conoce como Inestabilidad en campo normal.



Ferrofluido bajo la influencia de un campo magnético intenso

La formación del patrón corrugado incrementa la superficie de energía libre y la energía gravitacional de líquido, pero reduce la energía magnética.

El patrón corrugado aparece únicamente al exceder un valor crítico para el campo magnético cuando la reducción de energía magnética sobrepasa el incremento en energía de superficie y gravitación. Los ferrofluidos tienen una susceptibilidad magnética muy elevada y el campo magnético crítico requerido para la aparición de patrones corrugados puede alcanzarse con una pequeña barra de magneto (imán).

Cuando se aplica un campo magnético a un FF, se desarrollan fuerzas internas en el líquido, estas fuerzas internas pueden observarse cuando se coloca una barra metálica de forma perpendicular al plano que contiene FF. Al hacer circular una corriente eléctrica, el fluido “salta” y rodea la barra, formando un menisco cóncavo simétrico, ancho en la base y con tendencia a

estrecharse en la parte superior. La altura del menisco reproduce exactamente el decrecimiento de la intensidad del campo magnético con la distancia de la barra. Las fuerzas internas nacen de la interacción de un campo magnético con el momento dipolar ferromagnético característico de cada partícula coloidal. El momento dipolar es un vector cuya magnitud indica la intensidad de la magnetización y su dirección está determinada por la orientación de una línea imaginaria que va de del polo sur al norte a través de cualquier región pequeña del FF. Toda muestra de FF contiene igual cantidad de polos sur como de polos norte, pero el campo aplicado suele variar ligeramente de un punto a otro, entonces el cambio en la muestra dependerá de cómo el vector de momento dipolar esté ubicado.

En resumen, este coloide, además de poseer las formas de energía inherentes a todo flujo: energía de presión, energía cinética y energía gravitacional, tiene una energía ferromagnética al interactuar con un campo magnético. La suma de estas energías es constante, según lo demostró Bernoulli en 1738. El juego de todas estas energías permite una serie de útiles aplicaciones



Surfactantes comunes para ferrofluido

El surfactante para recubrir las nano partículas pueden ser (no está limitado sólo a estos):

Ácido Oléico

Hidróxido de tetrametilamonio

Ácido Cítrico

Lectina de Soja

Esos surfactantes previenen que las nanopartículas se aglomeren asegurando que no se vuelvan tan pesadas como para que el movimiento Browniano las pueda mantener en suspensión. Estas partículas magnéticas en un FF ideal no se asientan, aún cuando están expuestas a un campo magnético elevado o a un campo gravitacional. El surfactante tiene una cabeza polar y una cola no polar (o viceversa), una de ellas se adhiere a la nanopartícula mientras que la otra se adhiere al líquido, formando una micela regular o inversa, respectivamente, alrededor de la partícula. La repulsión **steric** por lo tanto previene la aglomeración de partículas.

Los surfactantes son útiles para prolongar la tasa de asentamiento en los FF, pero a la vez provocan una disminución de las propiedades magnéticas del fluido (específicamente la saturación magnética del fluido). La adición de surfactante (o de cualquier otra partícula extraña) disminuye la densidad de empaquetamiento de los FF cuando están en estado activo, esta disminución de la viscosidad en el estado activo, resulta en una activación menor del fluido. Para algunas aplicaciones la viscosidad del estado activo (la "fuerza" con la que se activa el FF) no es importante, pero para las aplicaciones comerciales e industriales hay una relación de compromiso entre la viscosidad del estado activo y la velocidad de asentamiento del FF.

Aplicaciones

Dispositivos electrónicos

Los FF se utilizan para formar sellos líquidos (hermetismo) alrededor de los ejes en los discos rígidos. El eje rotatorio está rodeado de magnetos. Una pequeña cantidad de FF, ubicada entre el eje y el magneto, se pondrá

en su lugar debido a la atracción del FF con el magneto.

El FF forma una barrera que previene que la suciedad ingrese al disco rígido. De acuerdo con los ingenieros de Ferrotec, los sellos de FF en los ejes soportan entre 3 o 4 psi, pero no trabajan bien en sellos traslacionales para pistones porque el líquido se escapa mecánicamente del lugar. .

Ingeniería Mecánica

Los FF tienen la capacidad de reducir la fricción. Si se aplica sobre la superficie de un imán lo suficientemente fuerte, como por ejemplo uno hecho de neodimium, hace que el magneto pueda desplazarse sobre superficies suaves con mínima resistencia.

Militar

La Fuerza Aérea de los EE.UU. introdujo una pintura hecha de FF y sustancias no-magnéticas para radares (RAM). El material contribuye a reducir la sección cruzada de radar de los aviones, reduciendo la reflexión de ondas electromagnéticas. También se lo tiene en cuenta para hacer armaduras personales, para lo cual presenta cualidades muy interesantes, es flexible como un líquido pero al tener un campo magnético aumenta su resistencia 50 veces y en solo 20 milésimas de segundo. Pero esta última aplicación está en desarrollo.

Aeroespacial

La NASA ha experimentado con el uso de ferrofluidos en un lazo cerrado de un sistema de control de nivel para vehículos espaciales. Se aplica un campo magnético a un bucle de ferrofluido para cambiar el momento angular e influir en la rotación del vehículo.

Control de gases

La interacción entre magnetismo y presión puede ser utilizada para diseñar un tapón magnético en un tubo que une los recipientes

con gas a distintas presiones. Un tapón hecho con fluido normal se movería hasta que las presiones quedaran equilibradas. Un ferrofluido se mantiene en su posición enfocando un campo magnético, ya que si el tapón se mueve un poco hacia la región de baja energía, la fuerza magnética lo detendrá. Al ser la energía cinética y gravitacional constantes, el decremento de la energía debido a la presión debe ser compensado por un aumento de energía magnética y viceversa. Estos sellos se utilizan cuando un eje rotante debe pasar por un compartimiento herméticamente cerrado. Esta fue la primera aplicación de los ferrofluidos y posteriormente ha sido aplicada a láseres de gas. También se han diseñado sellos en etapas múltiples, que pueden resistir presiones 60 veces mayores a la atmosférica

Medición

Los ferrofluidos tienen numerosas aplicaciones en óptica por sus propiedades refractivas; esto debido a que cada partícula micromagnética refleja luz. Estas aplicaciones incluyen la medición de la viscosidad específica de un líquido colocado entre un polarizador y un analizador, iluminados por un láser de helio-neón.

Separación de Materiales

Otra de las aplicaciones importantes de los ferrofluidos es su utilización en procesos de separación de materiales que difieren en su densidad. Los métodos ordinarios de separación utilizan líquidos pesados, pero son tóxicos y no pueden flotar sustancias de alta densidad.

La levitación magnética puede hacerlo y de hecho se usa para levitar partes no ferrosas de autos, en la incineración de desperdicios sólidos, etc. Si uno coloca una esfera no magnética dentro de un ferrofluido menos denso, ésta se irá al fondo. Sin embargo, al colocar los polos iguales de dos imanes arriba y abajo del

ferrofluido respectivamente, la esfera sube hacia el centro del recipiente que contiene el ferrofluido y allí se queda. Esto se debe a que la suma de la energía magnética y de presión es constante. Una variante del sistema es la levitación de un objeto magnético. Aquí el campo es proporcionado por el objeto mismo. Recientes aplicaciones de esto incluyen la separación de diamantes de la arena y la guía de taladros de perforación petrolera con un acelerador subterráneo en el cual la masa sensible es levitada en un ferrofluido.

Medicina

Se usa como agente contrastante para tomar imágenes en resonancia magnética y puede ser usado para la detección del cáncer. En este caso los FF están compuestos por nanopartículas de óxido de hierro y son llamadas SPION (Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles). También hay mucha investigación en el uso de los FF en tratamientos experimentales contra el cáncer llamados Magnetic Hyperthermia. Está basado en el hecho de que un FF en un campo magnético alternativo desprende calor.

Transferencia de calor

Un campo magnético externo aplicado a un FF con susceptibilidad variable (por ejemplo debido a la aplicación de un gradiente de temperatura) resulta en una fuerza magnética no uniforme, que permite una transferencia de calor llamada convección termomagnética. Esta forma de transferencia de calor puede utilizarse cuando la convección convencional es inadecuada, por ejemplo en dispositivos miniatura o bajo condiciones de gravedad reducida.

Acústica

Los FF comúnmente se utilizan para eliminar el calor de la bobina de los parlantes y para pasivar la amortiguación (damp) del movimiento del cono. Como los FF son paramagnéticos, obedecen a la Ley de Curie, por lo que se vuelven menos magnéticos a medida que aumenta la temperatura. Un gran iman que se sitúa cerca de la bobina (de voz) produce calentamiento, por lo que atraerá el FF frío más que el FF caliente, forzando que el FF caliente se aleje de la bobina y así baje la temperatura. Es un efecto de enfriamiento eficiente que no requiere energía adicional para funcionar.

Óptica

Se están realizando investigaciones para crear un espejo magnético que se adecue a las formas de la Tierra basado en telescopios astronómicos.

Arte

Algunos museos de arte y ciencia tienen dispositivos especiales que utilizan imanes para hacer que los FF se muevan alrededor de una superficie como una fuente para entretener a los visitantes. Sachiko Kodama es conocido por su arte con FF. En la figura se ve una de sus obras.



Conclusiones

En los últimos años se han desarrollado métodos para preparar coloides ferrofluidos cuyas propiedades físicas se han estudiado con detalle. Ya se han introducido algunas aplicaciones tecnológicas de los ferrofluidos y hay muchas otras en perspectiva. Los FF constituyen la base de nuevas e ingeniosas técnicas en numerosos campos de aplicación. Se trata de un coloide que puede tener numerosas aplicaciones, aún hoy desconocidas.

Referencias Bibliográficas

<http://www.ferrotec.com/products/ferrofluidic/>

<http://www.freepatentsonline.com/6229676.pdf>

<http://www.slideshare.net/phi89/magnetismo-en-la-industria>

<http://www.d-culto.com/>