



CURVAS Y DIAGRAMAS FORC: UNA HERRAMIENTA PARA LA CARACTERIZACIÓN MAGNÉTICA DE SUELOS

Laura G. Pampillo, Fabio D. Saccone

Universidad de Buenos Aires, INTECIN (UBA-CONICET), Facultad de Ingeniería, Dpto. de Física,
Buenos Aires, Argentina

Resumen

En este trabajo describimos la técnica de construcción de diagramas de interacciones magnéticas conocido comúnmente por su sigla en inglés FORC: First Order Reversal Curves. Este método se aplica al estudio de las componentes irreversibles de las interacciones magnéticas de minerales terrestres.

Abstract

In this work we show the basis of the FORC diagrams technique, in order to follow the irreversible interactions in magnetic domains. Recently, this technique becomes very useful for the studies of magnetic properties and characterization of soils and rocks.

Introducción

Si bien la curva de histéresis es la técnica más comúnmente utilizada en el estudio de las propiedades magnéticas globales de un sistema, en muchos casos no resulta posible clarificar todos los aspectos del mismo a partir de la información que de ella se obtiene. Es por ello que la técnica de las curvas y diagramas FORC aparecen como una poderosa herramienta en la caracterización de sistemas magnéticos, dado que entrega información sobre la distribución de coercitividad e interacción de las partículas, como así también, la cantidad de magnetización reversible e irreversible del sistema en estudio. En tiempos recientes se ha extendido su empleo para estudiar minerales en los campos de la Geopaleontología y el Geomagnetismo terrestre. Un trabajo pionero en la construcción de diagramas FORC, fue realizado por investigadores del Departamento de Geología de la Universidad de California-Davis [1], quienes iniciaron una ruta de exploración de las interacciones magnéticas en minerales diversos, la que luego ha encontrado una amplia difusión en otra clase de materiales sintéticos nanoestructurados. El método en cuestión está basado en el llamado modelo de Preisach [2].

1. Modelo de Preisach y diagramas FORC

Desde el punto de vista matemático, este modelo describe al sistema como un conjunto de operadores biestables denominados operadores de histéresis o histerones. En la Figura 1 se muestra un esquema de este tipo de operadores, los cuales se nombran $\gamma_{\alpha\beta}$.

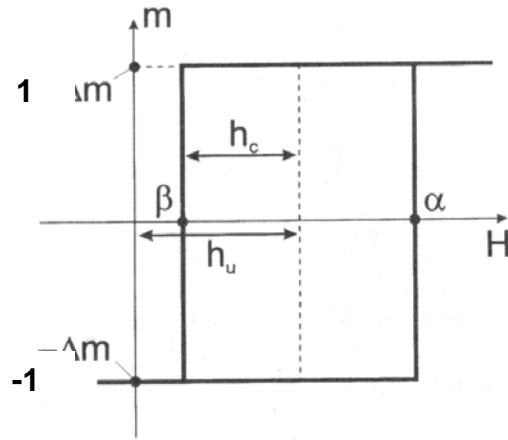


Figura 1 Esquema de un operador de histéresis correspondiente al modelo de Preisach.

Cada uno de estos operadores tiene dos estados posibles +1 y -1. Este operador conmuta de -1 a +1 cuando $H > \alpha$ y de +1 a -1 cuando $H < \beta$. Estos valores de campo se denominan campos de conmutación o inversión (switching fields). Cada histerón está entonces caracterizado por un par de campos de conmutación únicos que cumplen la condición $\alpha \geq \beta$. Estas unidades bistables pueden estar asociadas a dominios, partículas o conglomerados de partículas, sin embargo el modelo es totalmente independiente de ello y las trata simplemente como operadores. Lo que sí es cierto es que estas entidades responden a un esquema de energía libre con dos mínimos, los cuales en ausencia de campo magnético son equivalentes. Desde el punto de vista experimental la obtención de la distribución de Preisach puede darse a partir de las llamadas Curvas Inversas de Primer Orden (conocidas por su nombre en inglés como curvas FORC: First Order Reversal Curves). Esta medida comienza saturando el sistema con un campo magnético externo grande (positivo) (H_S). Luego, el campo externo se disminuye en forma continua hasta alcanzar un valor H_a (denominado campo de reversión o de inversión), a partir del cual se aumenta el campo hasta alcanzar nuevamente H_S . La curva de magnetización que va desde H_a hasta H_S se denomina curva inversa de primer orden. En la Figura 2 se esquematiza la curva inversa de primer orden ascendente correspondiente al campo de inversión H_a . En la misma figura, se muestra también el ciclo mayor para facilitar la comprensión del esquema.

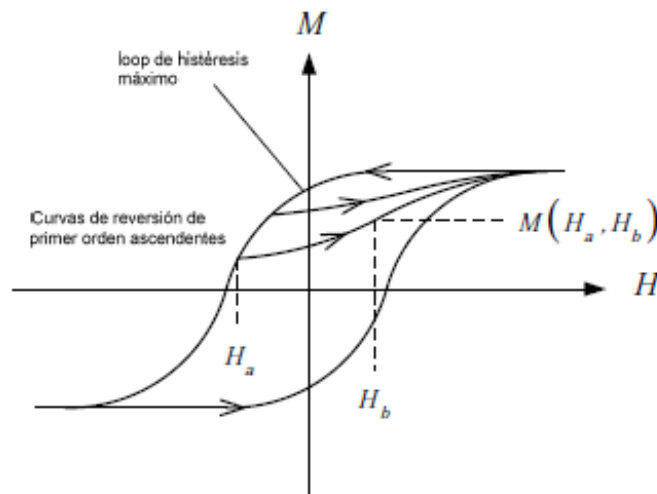


Figura 2. Ciclo de histéresis máximo y esquema de una curva inversa de primer orden ascendente con campo de reversión H_a .



La magnetización para un dado campo externo H_b sobre la curva FORC con campo de reversión H_a se denota $M(H_a, H_b)$, los valores de campo deben cumplir la condición $H_b \geq H_a$. De esta forma dos puntos de magnetización con el mismo valor de campo externo, H_b , tendrán distintos campos de reversión H_a , por lo cual, a partir de las medidas experimentales de las curvas FORCs, se puede construir una función de magnetización $M(H_a, H_b)$, que contenga todos los puntos dentro del ciclo de histéresis máximo. Resulta evidente que existe una condición de compromiso entre la cantidad de puntos al que se accede, que será tanto mayor cuanto mayor sea el número de curvas medidas, y el tiempo que demanda la medida experimental. En general los valores de H_a se toman equiespaciados.

A partir de los datos experimentales, la distribución FORC (o diagrama FORC) se define como la derivada segunda cruzada de los valores de magnetización de las distintas curvas FORC [3], según se muestra en la siguiente ecuación:

$$\rho(H_a, H_b) = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 M(H_a, H_b)}{\partial H_a \partial H_b}$$

2. Interpretación de los diagramas FORC

El diagrama FORC de un dado sistema puede proporcionar información del tipo de partícula que lo compone así como de las interacciones presentes en el mismo. Al igual que en el modelo de Preisach, en los diagramas FORC, es conveniente realizar un cambio de coordenadas y trabajar en términos de los campos h_u y h_c en lugar de H_a y H_b . Este cambio de coordenadas, equivalente a una rotación de 45° , está dado por:

¡Error! No se pueden crear objetos modificando códigos de campo.

El sistema más sencillo para analizar corresponde a un conjunto de partículas monodominio no interactuantes, para este caso la distribución FORC consiste en un pico prominente centrado en $h_u = 0$ ($h_c > 0$), cuyas curvas de nivel idealmente no deberían manifestar ningún tipo de ensanchamiento alrededor de su posición en h_u [4], (ver Figura 3).

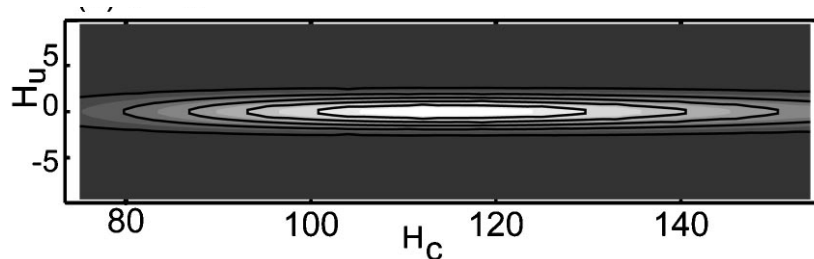


Figura 3 Simulación de diagrama FORC correspondiente a partículas monodominio no interactuantes, [4]. La pequeña dispersión alrededor de $h_u = 0$ obtenida por los autores es asociada a cuestiones numéricas.

Si al conjunto anterior se le agregan interacciones magnéticas, la distribución FORC se vuelve más complicada y su forma depende de las características de dichas interacciones. Como caso particular Pike y sus colaboradores, en el mismo artículo citado anteriormente, investigaron un campo de interacciones alineado con el campo externo, constante en cada sitio, aunque aleatoriamente variable de una partícula a otra y con un valor dado por una distribución gaussiana centrada en cero. Este tipo de campo de interacción cuyo módulo y signo cambia aleatoriamente de un sitio a otro no es estrictamente un campo dipolar, pero comparte algunas similitudes. Para el mismo ensamble de partículas del caso no interactuantes e incluyendo este tipo de interacciones los autores obtuvieron un resultado como el que se muestra en la Figura 4.

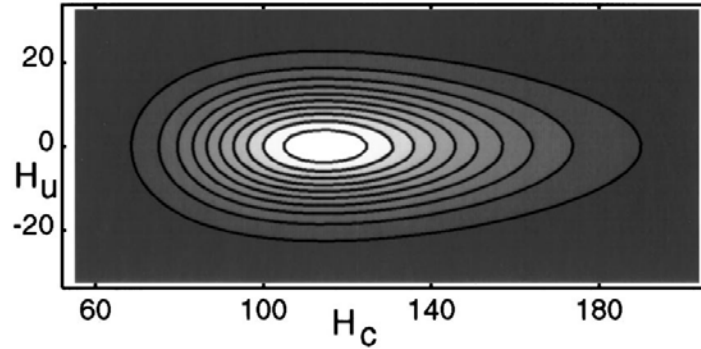


Figura 4. Simulación de diagrama FORC correspondiente a partículas monodominio interactuantes (según las características explicitadas en el texto) [4].

Se puede ver que en este caso, producto del campo de interacción aleatorio, la distribución FORC evidencia un pico que continúa centrado en $h_u = 0$, pero notablemente ensanchado en esta coordenada. En el mismo trabajo al que se viene haciendo referencia, los autores analizan otro tipo de interacción, una representada por un campo medio proporcional a la magnetización neta de la muestra. Esta situación, a diferencia de la anterior, no produce un ensanchamiento lateral del pico de la distribución. En cambio, muestra un desplazamiento respecto del eje $h_u = 0$ y le introduce una pendiente a la elongación de los contornos de los picos rotándolos levemente (tanto el sentido del corrimiento del eje como el de la pendiente dependen del signo de la interacción). Los diagramas correspondientes a este último caso se muestran en la Figura 5. A partir de estas características, los autores concluyen que mediante el gráfico de la distribución FORC es posible distinguir, por ejemplo, entre los efectos de un campo de interacción medio y los de un campo de interacción local que varía aleatoriamente.

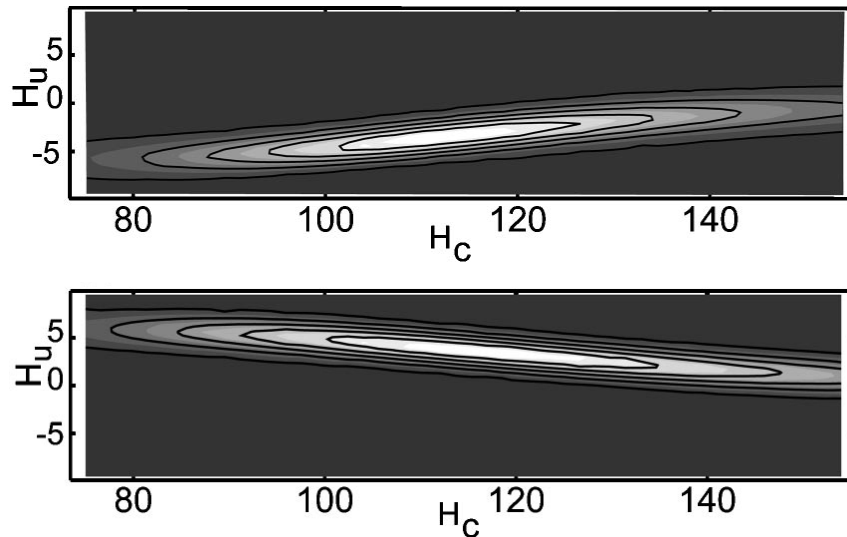


Figura 5 Simulación de diagrama FORC correspondiente a partículas monodominio que interactúan a través de un campo medio proporcional a la magnetización neta de la muestra [4].

En algunos casos es posible observar una estructura de varios picos, asociados a la existencia de diferentes mecanismos de inversión de la magnetización del sistema [5]. En el artículo al que se hace referencia se analiza un sistema de nanodots de Co en el cual, debido a la relación de tamaño entre los nanodots y la pared de dominio, la anisotropía cristalina se cancela y el mecanismo de inversión de la magnetización que predomina es la creación y aniquilación de vórtices (Figura 6).

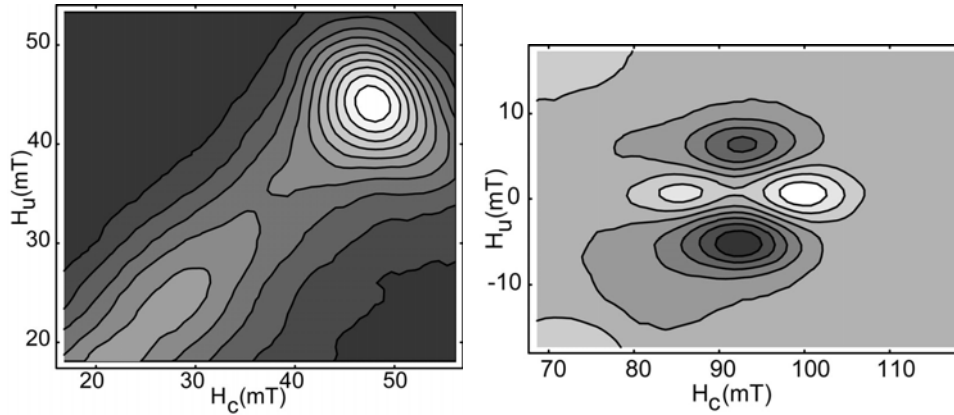


Figura 6. Diagramas FORC de nanodots de Co. Los picos que se observan están relacionados con el movimiento reversible de los vórtices (izquierda) y la aniquilación de vórtices (derecha) [5].

En algunos casos la distribución muestra varios picos alineados sobre el eje h_c , lo cual puede atribuirse a la existencia de agregados de partículas con diferentes campos de inversión promedio.

El análisis de diagramas FORC también resulta útil para la determinación de proporciones de fases en muestras desconocidas a partir de definir ciertos parámetros de los diagramas de muestras bifásicas con porcentajes conocidos [6].

Desarrollo Experimental

En nuestro laboratorio hemos implementado un sistema de medición mediante magnetometría de muestra vibrante (VSM, las siglas en inglés) con capacidad para realizar curvas FORC en forma automatizada [7, 8]. El equipo tiene capacidad de medir con campos aplicados de hasta 0.8 T. Se ha escrito el programa de adquisición de los datos en el entorno G-View y de esta manera se pueden medir un número ilimitado de curvas FORC. El post-procesamiento de los datos se realiza con un software escrito para el entorno Mathematica, que determina la función distribución $\rho(H_a, H_b)$ mediante diferencias finitas.

En la Figura 7 se muestra el diagrama FORC, obtenido mediante el equipo y el software mencionados en el párrafo anterior, correspondiente a una muestra de níquel de pureza. El diagrama corresponde al plano H_a vs H_b , (una rotación de -45° respecto del h_c - h_u) Se observa un máximo bien definido en las zonas próximas a $H_a=0$, consistente con una representación de $h_u = -h_c$.

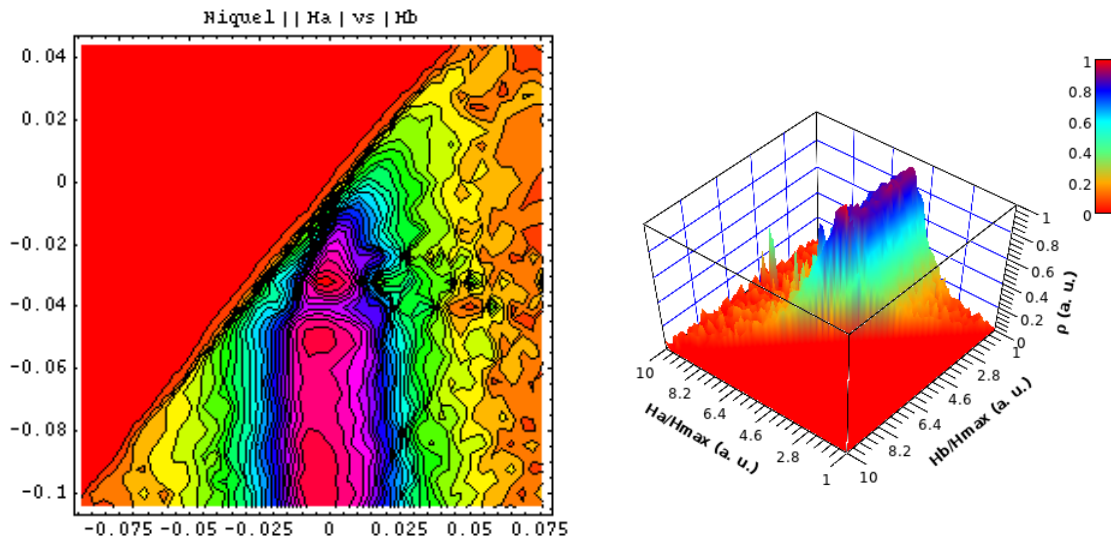




Figura 7 Diagramas FORC de una muestra de Niquel de pureza, obtenido mediante el uso de un magnetómetro de muestra vibrante (VSM) implementado en nuestro grupo y procesando las curvas FORC mediante diferencias finitas con un software de desarrollado propio.

Conclusiones

La técnica de diagramas FORC, constituye una herramienta que es versátil y de gran utilidad en el estudio de determinadas rocas y suelos magnéticos. Es fundamentalmente útil en casos como el estudio de óxidos de estructuras nanométricas, ya que la descripción de las interacciones es en forma cualitativa y basada en criterios estadísticos. Su aplicación se ha extendido a varios estudios recientes en Paleomagnetismo terrestre.

En nuestro grupo se ha implementado un magnetómetro de muestra vibrante, con capacidad de medir en forma automatizada un conjunto ilimitado de curvas FORC y el correspondiente procesamiento de los datos para la construcción del diagrama, mediante un software de desarrollo propio.

Referencias

- [1] A. P. Roberts, C. R. Pike, K. L. Verosub, 2000, First-Order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples, *J. Geophys. Res.* 105, 28461-28475.
- [2] F. Preisach, 1935, Über die magnetische Nachwirkung, *Z. Physik* 94, 277-302.
- [3] I. D. Mayergoyz, 2003, *Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications*, Ed. Elsevier, ISBN 0-12-480873-5.
- [4] C. R. Pike, A. P. Roberts, K. L. Verosub, 1999, Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first order reversal curves, *J. Appl. Phys.*, 85, 6660-6667.
- [5] C. R. Pike, A. Fernández, 1999, An investigation of magnetic reversal in submicron-scale Co dots using first order reversal curve diagrams, *J. Appl. Phys.*, 85, 6668-6676.
- [6] Y. Y. Melikhov, I. Tomáš, J. Kadlecová, O. V. Perevertov, 2000, Investigation of two-phase samples by Preisach modelling, *J. Magn. Magn. Mater.*, 215-216, 27-29.
- [7] F. D. Saccone, 2006, "Diseño de un magnetómetro de muestra vibrante (VSM) biaxial compacto y de bajo costo", *ANALES AFA*, Vol. 17, p. 297.
- [8] P. Granell, F. D. Saccone, L. G. Pampillo, M. Pagnola, "Implementation of an automated FORC analysis and anisotropy measurements in a homemade VSM", (aceptado para su publicación en *Latin-American J. Phys. Educ.*, ISSN 1870-9095)