



LA VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE FASE DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA PARA DETECTAR PIRROTINAS

Carlos A. Vasquez^{1,2} y María J. Orgeira^{2,3}

¹Universidad de Buenos Aires, Ciclo Básico Común, Buenos Aires, Argentina

²Consejo Nacional de Investigaciones Científica y Técnicas, Argentina

³Universidad de Buenos Aires, Dto.Cs. Geológicas, FCEyN, Buenos Aires, Argentina.

Resumen

La relación entre la componente en fase y cuadratura de la susceptibilidad magnética, se determina mediante el ángulo que forman al representarse en el plano complejo, denominado ángulo de fase θ . En algunos minerales varía con el campo aplicado, pudiendo ser utilizado como un elemento diagnóstico de la mineralogía magnética. Sin embargo, hasta la fecha no se han publicado resultados sobre dicho comportamiento. En esta contribución se analizan variaciones del ángulo de fase con el campo aplicado en ejemplares bien caracterizados de muestras artificiales, naturales y pirrotinas. Mostrando que la variación del ángulo de fase con la amplitud del campo alterno aplicado puede ser una excelente herramienta diagnóstica para determinar la presencia de pirrotina. Se observó asimismo que en algunas sustancias, el ángulo de fase puede aumentar por un mecanismo diferente de los descritos en la literatura.

Abstract

The relationship between phase and quadrature component of the magnetic susceptibility is determined by the angle to be represented in the complex plane, called the phase angle θ . In some minerals, it varies with the applied field; it can be used as a diagnostic element of the magnetic mineralogy. However, to date, there are not published results on the behavior. In this contribution we analyze the phase angle variation with applied field in well-characterized samples specimens artificial, natural and pyrrhotite. Showing the variation of the angle of phase with the applied alternating field amplitude can be an excellent diagnostic tool for determining the presence of pyrrhotite. It was observed in some substances, that the phase angle can be increased by a different mechanism than those described in the literature.

Introducción

Cuando se mide la susceptibilidad magnética mediante campos magnéticos alternos, puede aparecer una componente fuera de fase con el campo aplicado. Si se representa entonces la susceptibilidad χ como un número complejo, $\chi = \chi_R + j \chi_I$, donde χ_R es la componente real (en fase), χ_I la imaginaria (en cuadratura) y j la unidad imaginaria; entonces la fase $\theta = \arctang(\chi_I / \chi_R)$. La componente imaginaria está asociada a tres fenómenos diferentes: a) Conductividad de la muestra; b) Viscosidad magnética; c) Magnetización no lineal a campo bajo (ley de Rayleigh). En aquellos materiales en los que aparece el fenómeno de no linealidad con el campo, varía el ángulo de fase θ con la amplitud del campo alterno aplicado. Si bien existes varios trabajos donde se analiza la variación de la magnitud de la susceptibilidad con la amplitud del campo (p. ej. Hroudá et al., 2006), al conocimiento del autor, no se han publicado al día de hoy estudios sobre la variación del ángulo de fase con la amplitud del campo. Como este fenómeno es notable especialmente en pirrotinas, se escogieron 6 muestras de pirrotinas muy bien caracterizadas (Martín-Hernandez et al., 2008) y muestras artificiales y naturales, para observar la variación de θ en diferentes materiales. La pirrotina es un sulfuro de hierro cuya composición varía en el rango $Fe_7S_8 - Fe_{11}S_{12}$. En el rango $Fe_9S_{10} - Fe_{11}S_{12}$ son hexagonales y antiferrromagnéticas, mientras que Fe_7S_8 , la más deficiente en hierro, es monoclinica y ferrimagnética. (Dunlop & Özdemir, 1997). Para emular la conductividad de la



pirrotina y observar este efecto en forma aislada, se prepararon muestras artificiales de magnetita dominio simple diluidas en grafito, cuya conductividad es similar a la de la pirrotina.

Metodología

Se utilizó un susceptibilímetro AGICO MFK1-FA, a 990 Hz, con amplitudes de campo desde 10 A/m hasta 700 A/m. Las muestras utilizadas y sus características, se indican en la Tabla 1. En la tabla 2 se indican las características magnéticas y el porcentaje de pirrotina monoclinica (ferrimagnética) para las muestras de pirrotina, ya que en los minerales se da una mezcla de ambas y la magnetización de saturación M_s puede ser utilizada para determinar la composición, ya que para la pirrotina monoclinica $M_s = 80$ kA/m (Dunlop & Özdemir, 1997); para normalizar los datos a volumen se utiliza una densidad media de 4.61 g/cm³ (Lindsley et al. 1966). Para las muestras de magnetita BAYFERROX diluida en grafito, se tomaron los siguientes valores para la conductividad de la pirrotina: $\sigma_{PI} = 1.40 \times 10^5$ Siemens/m (Word et al, 1993) y para el grafito: $\sigma_{GR} = 1.27 \times 10^5$ Siemens/m (Handbook CRC, 2004).

Muestra	Características
MagnSDBayer	Magnetita: Pigmento BAYFERROX 318 (Bayer S.A.). Granos esféricos de 0.2 micrones. http://bayferrox.com/fileadmin/pdf/IPG/00006815_000_BF-318-M-ENG.pdf
MagGra5	5 % (p/p) de Magnetita BAYFERROX 318 diluida en grafito GL-68 LUBRITODO (Industria Ianncla S.A.)
MagGra1	1% (p/p) de Magnetita BAYFERROX 318 diluida en grafito GL-68 LUBRITODO (Industria Ianncla S.A.)
FerroAmonio	Polvo. (Pro-Análisis, marca: Carlo Erba)
Sal de Mohr	Polvo. (Pro-Análisis, marca: Mallinckrodt Baker, Inc)
Galena	Mineral
PY1	Pirrotina. Monoclinica y hexagonal (mineral).
PY2	Pirrotina. Monoclinica y hexagonal (mineral)
PY3	Pirrotina. Monoclinica y hexagonal (mineral)
PY4	Pirrotina. Monoclinica y hexagonal (mineral)
PY5	Pirrotina. Monoclinica y hexagonal (mineral)
PY6	Pirrotina. Monoclinica y hexagonal (mineral)

Tabla 1: Muestras utilizadas.

Pirrotina	M_R (kA/m)	M_S (kA/m)	H_{CR} (kA/m)	H_C (kA/m); B_C (mT)	Porcentaje de monoclinica(%)
PY1	8.14	34.81	13.01	10.47; 13.16	43.5
PY2	6.33	15.77	14.06	12.74; 16.01	19.7
PY3	2.96	20.60	18.77	10.46; 13.14	25.7
PY4	8.03	64.59	4.05	2.45; 3.07	80.7
PY5	6.22	48.32	4.90	3.10; 3.89	60.4
PY6	3.75	16.83	12.32	8.82; 11.08	21

Tabla 2: Características magnéticas de las pirrotinas. M_R : Magnetización de Saturación de remanencia. M_S : Magnetización de saturación. H_{CR} : Campo coercitivo de remanencia. H_C : Campo coercitivo. (Datos de Martín-Hernandez et al. 2008)



Resultados y discusión

En la figura 1, se puede observar la variación del ángulo de fase para las pirrotinas indicadas en la tabla 1 y cuyas características magnéticas se muestran en la tabla 2. Si bien todos los ejemplares utilizados eran una mezcla de monoclinica y hexagonal, aquellos con mayores porcentajes de monoclinica muestran una curva conspicua, en forma de “L” invertida. Son aquellos que a su vez muestran los menores valores de Bc. En la figura 2, se muestra la línea de tendencia entre el porcentaje de monoclinica y el campo Bc, pudiendo determinarse que en sentido amplio, a mayor porcentaje de monoclinica, menor Bc. Para observar el efecto de la conductividad sobre el ángulo de fase, se prepararon muestras de magnetita SD diluida en grafito al 1% y 5% respectivamente denominadas MagGra1 y MagGra5, de esta forma se trataba de emular la conductividad de la pirrotina, se observa que sus valores, si bien no varían con el campo (fig.3), se corresponden con los valores a campos muy bajos de las pirrotinas (fig. 1) con excepción de la PY2.

Por otra parte, se puede observar en la figura 3, dos muestras que exhiben valores anormalmente altos de ángulo de fase: MagSDBay y MAGMD. La primera de ellas es magnetita dominio simple, en forma de polvo (pigmento BayFerrox 316) y la segunda también es un polvo de magnetita multidominio. Estas muestras deberían mostrar un ángulo de fase pequeño o nulo, sin embargo cabe especular que un efecto tipo “cohesor” (Derr, 1904), desplaza mecánicamente los granos durante la aplicación del campo oscilante, produciendo un desfase entre el campo aplicado y la magnetización.

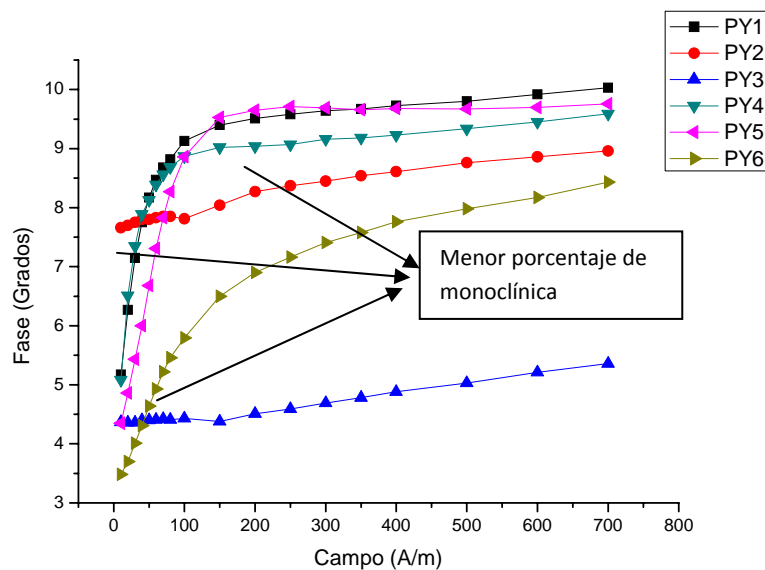


Figura 1: Variación del ángulo de fase con la amplitud del campo aplicado para las pirrotinas.

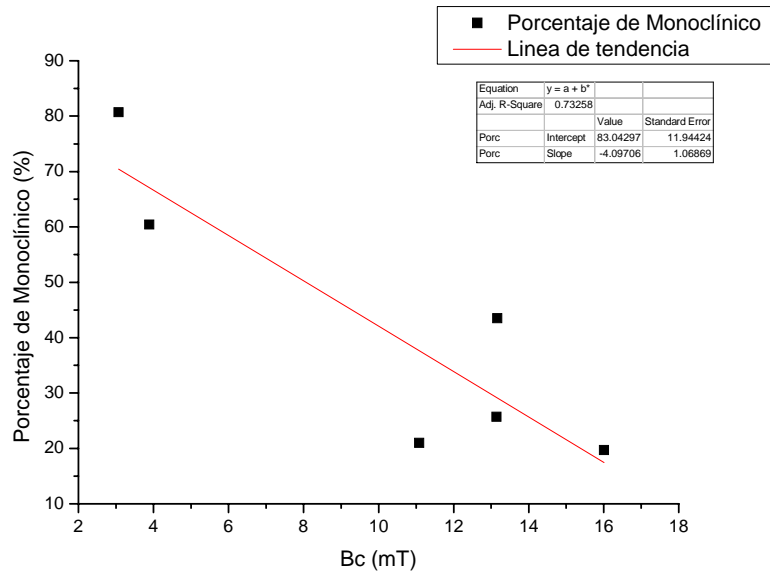


Figura 2: Relación entre el porcentaje de pirrotina monoclinica y el campo coercitivo Bc.

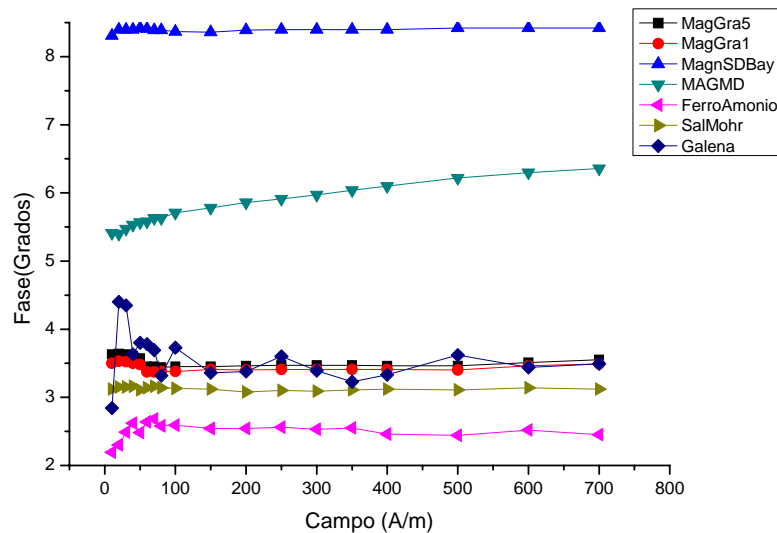


Figura 3: Variación del ángulo de fase para diferentes muestras, indicadas en la Tabla 1.

Conclusiones

En este trabajo, se pudo mostrar que la variación del ángulo de fase con la amplitud del campo aplicado es una herramienta válida para la identificación de pirrotinas pudiendo diferenciar aquellas con mayor composición monoclinica. También se pudo mostrar que a las frecuencias del orden de 1000 Hz, como las utilizadas, las sustancias con conductividades moderadas no muestran ángulos de fase notables. Por otra parte, en polvos de magnetita, aparecen ángulos de fase anómalos probablemente debidos a un efecto de “cohesor”, aún no descripto en la literatura.



Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo económico del préstamo BID 0382/07, el subsidio UBACYT X236y el PICT 2007-00382. Se agradece especialmente a la Dra. Fátima Martín-Hernandez, por proveer las muestras de pirrotinas.

Bibliografía

Derr, L.A.M., S.B., .1904. *Cyclopedia of Engineering*, American School of Correspondence of Armour Institute of Technology, Chicago.

Dunlop, D.J. & Özdemir, Ö. 1997. *Rock Magnetism. Fundamentals and frontiers*. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom.

Handbook CRC, 2004. 84th Edition of the *CRC Handbook of Chemistry and Physics*.CRC Press.

Hrouda, F. ;Chlupacova, M. & Mrazova,S. 2006. Low-field variation of magnetic susceptibility as a tool for magnetic mineralogy of rocks. *Phys. Earth planet. Inter.* 154, pp.323-336.

Lindsley, D.H.; Andreasen,G.E.&Balsley, J.R.; 1966.Magnetic properties of rocks and minerals, in *Handbook of Physical Constants*,pp. 543-552,eds. S.P. Clark. Geological Society of America, New York.

Martín-Hernandez, F.; M.J. Dekkers; I.M.A. Bominaar-Silkens and J.C. Maan. 2008. Magnetic anisotropy behavior of pyrrhotite as determined by low- and high-field experiments. *Geophys. J. Int.*, 174, p. 42-54.

Worm, H.-U, Clark, D. and Dekkers, M.J. 1993. Magnetic susceptibility of pyrrhotite: grain size,field and frequency dependence. *Geophys. J. Int.*,114, pp.127-137.