

Uso de FORCs na análise de interações magnéticas em sistemas nanoestruturados



paz no plural

B. F. CARDOSO* e **J. GESHEV****

* Ben-Hur Francisco Cardoso, Física - Materiais e Nanotecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

** Julian Geshev, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Abstract

Diagramas de curvas de reversão de primeira ordem (FORC) mapeiam as distribuições estatísticas de histerons magnéticos, com base em suas áreas críticas (H_c) e campos de interação locais (H_a), em toda a reversão da magnetização. Esta técnica foi aplicada à matriz nanotubos de carbono com pequena porcentagem de Fe. A partir da topologia obtida, as propriedades físicas intrínsecas da matriz pode ser determinada, em especial coercividades individuais e o campo de interação em saturação. No entanto, o diagrama FORC também pode fornecer informação sobre outras propriedades, tais como a existência de uma distribuição de comprimentos dos tubos.

Para tanto, foi executado um método computacional para o tratamento dos dados experimentais obtidos das FORCs, baseando no métodos de suavização e interpolação dos pontos obtidos para encontrar o gráfico de distribuição necessário.

Introdução

Diagramas baseados nas curvas de inversão de primeira ordem (First Order Reversal Curves, FORCs, em inglês) representam um poderoso utensílio para o entendimento e interpretação de fenômenos histeréticos, sobretudo da histerese magnética [1,2]. Tal método dá importantes informações através de medidas de ciclos de histerese secundárias da curva principal e provê um meio para determinar as proporções relativas das componentes reversíveis e irreversíveis da magnetização [3].

A medida de uma FORC começa partindo-se de uma magnetização de saturação positiva. Em seguida, o campo é reduzido até certo campo de reversão, H_r , em que a magnetização da amostra esteja entre o mínimo e o máximo. A partir deste determinado H_r , leva-se o sistema novamente ao estado de saturação medindo-se a magnetização a cada passo de H . A magnetização neste trecho estará no interior da curva de histerese completa. Assim, para sucessivas curvas para valores diferentes de H_r , é obtido um conjunto de FORCs. A magnetização em campo aplicado H_a numa FORC é denotada por $M(H_r, H_a)$, onde $H_a > H_r$ (Figura 1). Cada FORC individual reflete uma combinação de processos reversíveis (por exemplo, pequenos deslocamentos de paredes de domínio em um mínimo de energia) e variações de magnetização irreversível (e.g., o movimento de paredes de domínio através de uma barreira de energia). A diferença entre FORCs sucessivas é uma consequência de mudanças irreversíveis que ocorrem entre os campos de reversão sucessivos. A distribuição de FORC, que caracteriza em detalhe a distribuição de campos críticos para as variações de magnetização irreversíveis, é definida como a segunda derivada mista:

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

onde $\rho(H_r, H_a)$ é uma função bem definida em $H_a > H_r$.

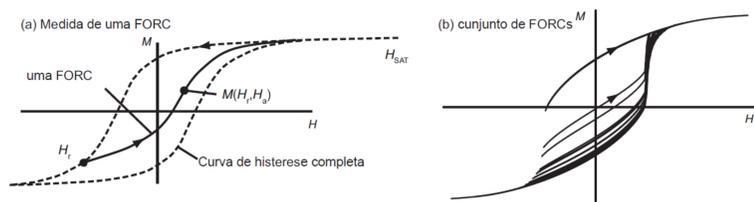


Figure 1: Ilustração de como as FORCs são medidas

Torna-se conveniente, para representar graficamente a distribuição FORC, utilizar o sistema de coordenadas $H_c = (H_r - H_a)/2$, $H_u = (H_r + H_a)/2$, em vez do original H_r, H_a . Como $H_r < H_a$, o valor de H_c é sempre positivo, e o diagrama FORC é representado por um gráfico rotacionado, tendo H_u e H_c como eixos vertical e horizontal, respectivamente.

O Modelo

Vários métodos diferentes têm sido utilizados para calcular os Diagramas FORC a partir de dados experimentais de histerese. Num certo número de casos, a segunda derivada mista é simplesmente calculada diretamente [5, 6]. Embora revelando as principais características da distribuição, esta representação tende a ter uma grande contribuição de ruído que pode mascarar características menores nos dados. Recentemente, tem-se dado muita atenção à técnica de Pike et al. [4], que utilizou um procedimento de ajuste polinomial para obter versões suavizadas da distribuição FORC, trabalhando sob a suposição de que os pontos de dados foram igualmente espaçados tanto em H_r quanto em H_a . Para determinado ponto P, de coordenadas H_r, H_a , define-se uma grade quadrada local (Figura 3), com P no centro, composta por pontos de FORCs consecutivos, contendo $(2SF + 1)^2$ pontos, sendo SF o fator de suavização (smoothing factor, em inglês), um dado inteiro positivo.

A partir desses pontos dentro da grade, faz-se uma suavização da região em uma superfície biquadrada, de equação geral $a_1 + a_2 H_r + a_3 H_r^2 + a_4 H_a + a_5 H_a^2 + a_6 H_r H_a$. Com auxílio do método de mínimos quadrados, determinam-se os valores de $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ que melhor aproximam a equação, sendo, neste caso, o valor de $-a_6$ a segunda derivada mista da superfície e pode ser atribuído ao centro da grade, o ponto P, a representação da densidade de distribuição FORC da grade. Este processo é repetido para todos os pontos medidos. A escolha de um fator de suavização adequado é totalmente qualitativa, no entanto, é recomendado que a SF seja fixada em 2 ou 3 para a maioria dos conjuntos de dados, ou no máximo $SF = 5$ para dados mais ruidosos [4, 7].

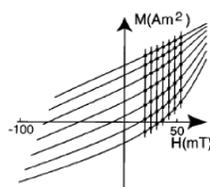


Figure 2: Subgrupo de 7 FORCs consecutivas ($SF = 3$); Os pontos circulos são uma matriz 7×7 de dados de pontos igualmente espaçados em H_r e H_a

Sendo assim, para determinado ponto dentro da grade, temos o vetor coluna de magnetização:

$$M = (M(0)M(1)M(2)...M((SF + 1)^2))^T,$$

sendo, para $0 \leq i \leq (SF + 1)^2$,

$$M(i) \Rightarrow f(H_{r(i)}, H_{a(i)}) = a_1 + a_2 H_{r(i)} + a_3 H_{r(i)}^2 + a_4 H_{a(i)} + a_5 H_{a(i)}^2 + a_6 H_{r(i)} H_{a(i)}$$

e o vetor coluna de coeficientes:

$$a = (a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6)^T,$$

que pode ser determinado pela equação matricial: $Xa = M$, com

$$X = \begin{bmatrix} 1 & H_{r(1)} & 3H_{r(1)}^2 & H_{a(1)} & H_{a(1)}^2 & H_{r(1)}H_{a(1)} \\ 1 & H_{r(2)} & 3H_{r(2)}^2 & H_{a(2)} & H_{a(2)}^2 & H_{r(2)}H_{a(2)} \\ 1 & H_{r(3)} & 3H_{r(3)}^2 & H_{a(3)} & H_{a(3)}^2 & H_{r(3)}H_{a(3)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & H_{r((SF+1)^2)} & 3H_{r((SF+1)^2)}^2 & H_{a((SF+1)^2)} & H_{a((SF+1)^2)}^2 & H_{r((SF+1)^2)}H_{a((SF+1)^2)} \end{bmatrix}$$

Utilizando o Método de Mínimos Quadrados, e isolando o vetor a, para determinar o $-a_6$:

$$a = (X^T X)^{-1} X^T M.$$

O método é repetido para todos os pontos medidos.

Resultados

Foi medido no magnetômetro de amostra vibrante modelo EV9 da MicroSense, FORCs de uma amostra de nanotubos de carbono com pequena porcentagem de Fe. Esta medida tem um passo de 100 Oe para cada campo aplicado H_a , e um intervalo entre campos H_r de 100 Oe também (ou seja, vai diminuindo de 100 Oe em 100 Oe, começando de 500 Oe, indo até 6000 Oe, logo vai para 400 Oe, indo até 6000 Oe, logo vai para 300 Oe e assim sucessivamente). A escolha do ponto inicial 500 Oe foi feita porque está próximo do campo coercivo, que é de 1000 Oe e como a ideia das FORCs é analisar a reversão e contribuição dos domínios magnéticos à magnetização, é de utilidade começar analisar desde um ponto próximo ao campo coercivo positivo. Essa medida é demonstrada na Figura 3.

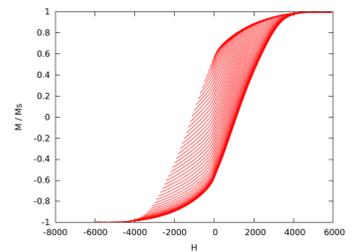


Figure 3: Curvas FORCs de Nanotubos de Carbono com pequena porcentagem de Fe, medido no LAM

A partir dos dados da Figura 3, usando o método citado para a construção de Diagramas FORC, foi feito para essa medida dois diagramas, com $SF = 3$ e $SF = 5$, representadas nas Figuras 4. Como é prescrito na teoria, quanto maior é o SF , mais suave fica o Diagrama FORC, e menos ruído é obtido.

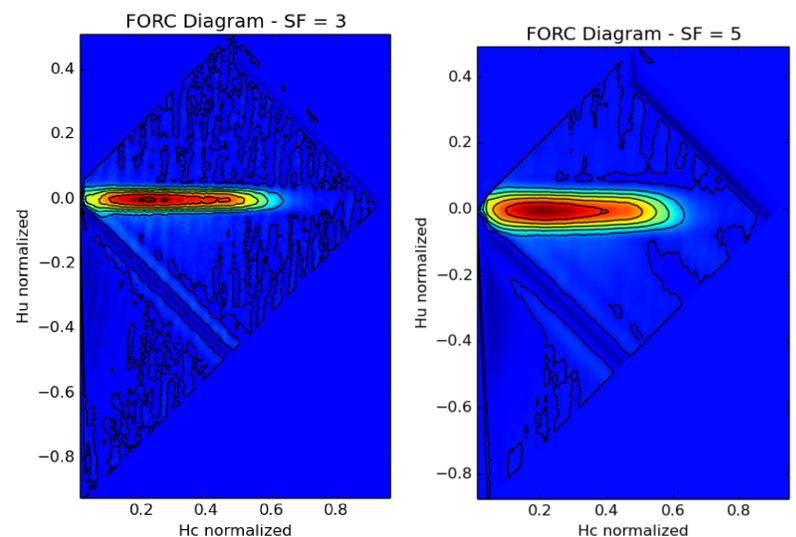


Figure 4: Diagramas FORC

Conclusões

Verificamos boa concordância entre os dados experimentais e o previsto teoricamente quanto as Curvas FORCs, como demonstrado na Figura 3. Ao tratar os dados viu-se que o Diagrama FORC condiz com a teoria em se tratando de nanotubos de carbono com pequena porcentagem de Fe, como ao analisar as regiões de crescimento de campo coercivo.

Os próximos estágios da pesquisa serão:

- Simulação computacional das FORCs baseado na Equação de Landau-Lifshitz-Gilbert
- Métodos pseudo-analíticos de análise de FORCs pela função tangente hiperbólica

References

- [1] Mayergoyz, I. D., J. Appl. Phys. 57, 1985. 3803.
- [2] Dobrota, C. I.; Stancu, A., J. Appl. Phys. 113, 2013. 043928.
- [3] Fleischer, R. L.; Price, P. B.; Walker, R. M., Nuclear tracks in solids: principles and applications (University of California Press, Berkeley, 1975).
- [4] Pike, C. R.; Roberts, A. P.; Verosub, K. L., J. Appl. Phys. 85, 1999. 6660.
- [5] G. Bertotti, Hysteresis in magnetism for physicists, Material Scientist and Engineers., Academic, San Diego, 1998.
- [6] P.G. Bercoff, M.I. Oliva, E. Borclone, H.R. Bertorello, Physica B, (2002), 291.
- [7] A. Roberts, P., C. Pike, R., K. Verosub, L., J. Geophys. Res. 105, (2000), 28461.