

# Uso de curvas de remanência e de FORC na análise de interações magnéticas em sistemas nanoestruturados

Ben-Hur Francisco Cardoso

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ben-hur.cardoso@ufrgs.br

## Resumo

Este trabalho estuda interações magnéticas em diversos sistemas nanoestruturados através do uso combinado de duas técnicas distintas: (i) a que utiliza gráficos de remanência magnética e (ii) a que emprega as curvas de inversão de primeira ordem (First Order Reversal Curves, FORCs, em inglês). O uso combinado destas técnicas na análise de interações magnéticas revela importantes aspectos envolvidos nos processos de reversão da magnetização nos materiais considerados. É conhecido apenas um trabalho publicado que, até agora está, utilizou esta combinação de técnicas. Isso foi feito para poder ponderar os tipos e as intensidades dos acoplamentos magnéticos presentes nas amostras e conseguir separar, de uma maneira confiável, as informações provenientes das contribuições de processos reversíveis e irreversíveis da magnetização. De maneira inédita, a análise baseado nas duas técnicas foi feita sobre uma amostra de IrMn/Co. É um exemplo de sistema que apresenta Exchange Bias. Nesse sistema foram feitas as medidas partindo da saturação negativa (ascendendo até a positiva) e partindo da saturação positiva (descendendo até a negativa). Em todas as análises feitas até então, as FORCs foram usadas apenas para observar o comportamento da magnetização em sua componente  $x$  (isto é, paralelo ao campo magnético aplicado). Também de maneira inédita, buscando maior entendimento na componente  $y$  da magnetização (perpendicular ao campo aplicado), foi analisado seu comportamento pelo Diagrama FORC.

## Introdução

Devido suas dimensões reduzidas, as nanoestruturas representam uma importantíssima classe de materiais de propriedades únicas. Tais estruturas oferecem uma oportunidade para estudar as propriedades e mecanismos de magnetismo em nanoescala, onde o acoplamento entre os constituintes magnéticos é uma característica fundamental. Sendo assim, é necessário dispor de métodos confiáveis capazes de analisar a natureza e a intensidade dos acoplamentos, qualificar e/ou quantificar os efeitos provenientes destas interações.

Técnicas baseadas nas chamadas curvas de remanência dependentes de campo, ou seja, curvas isotérmicas de magnetização remanente [ $IRM$  ou  $m_r(H)$ ] e de desmagnetização dc [ $DCD$  ou  $m_d(H)$ ], onde  $H$  é o campo magnético aplicado, se mostraram muito sensíveis a interações entre as regiões magnéticas do sistema, nos dando informações sobre os processos magnéticos irreversíveis.

Por outro lado, 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 [6,7]. Tal método dá importantes informações através de medidas de ciclos de histerese secundárias da curva principal e, diferentemente do outro método, provê um meio para determinar as proporções relativas das componentes reversíveis e irreversíveis da magnetização [8].

## Curvas de Remanência

A magnetização remanente  $M_r$  é a magnetização, medida após saturação magnética, de um sistema na ausência de campo externo aplicado; esta pode ser definida como  $M_r = (M_{r1} + M_{r2})/2$ , onde  $M_{r1}$  (positiva) e  $M_{r2}$  (negativa) são as magnetizações remanentes dos ramos descendente e ascendente da curva de histerese, respectivamente. Podem ser definidos parâmetros normalizados tais como  $m_{r1} = M_{r1}/M_s$  e  $m_{r2} = M_{r2}/M_s$ , sendo  $M_s$  a respectiva magnetização de saturação.

Os gráficos de remanência baseiam-se na comparação de curvas de  $IRM$  e  $DCD$  e têm sido utilizados para estimar efeitos de interações magnéticas em sistemas de baixa dimensionalidade. A curva de  $IRM$  é traçada para uma amostra inicialmente desmagnetizada, aplicando-se um campo magnético positivo  $H_i$  que em seguida é removido, medindo-se a remanência normalizada  $m_r(H_i)$ . Um campo maior é então aplicado e o processo se repete até que a saturação seja atingida. A curva  $DCD$  é obtida partindo-se de um estado de saturação em um campo positivo e medindo-se a remanência  $m_d(H_j)$  após a aplicação de um campo negativo que aumenta progressivamente  $H_j$ . Para o caso de monodomínios não-interagentes com anisotropia uniaxial após uma desmagnetização ac ou térmica, estas curvas estão conectadas através da relação de Wohlfarth [10]  $m_d(H) = 1 - 2m_r(H)$ . Kelly et al. [12] estimaram interações em filmes finos através dos chamados gráficos de  $\delta M$ , sendo

$$\delta M(H) = 2m_r(H) - 1 + m_d(H).$$

É aceito que valores negativos de  $\delta M$  indicam interações desmagnetizantes (interações que tendem a estabilizar o estado desmagnetizado) e que valores positivos promovem o estado magnetizado.

Uma vez que  $m_r(H)$  depende do método utilizado na produção do estado desmagnetizado, pode-se obter curvas de  $m_r(H)$  diferentes após desmagnetizações dc, ac ou térmica e os respectivos gráficos de remanência podem ser significativamente distintos. Bissel et al. [13] derivaram a conexão entre  $m_d(H)$  e a curva  $IRM$  obtida após uma desmagnetização dc,  $m_r^{dc}(H)$ , para o caso de anisotropia uniaxial. Esta é produzida levando a amostra a sua coercividade de remanência negativa  $-H_R$  após saturação prévia, e então reduzindo  $H$  a zero. Após a desmagnetização dc, os momentos magnéticos com campos de inversão menores que  $H_R$  são revertidos, enquanto aqueles que necessitam de campos mais elevados que  $H_R$  para reverter sua magnetização permanecem orientados na direção original da remanência de saturação. Temos então  $m_r^{dc}(H) = 1 - m_d(H)$  para  $H < H_R$  e  $m_r^{dc}(H) = 1$  para  $H \geq H_R$ , assim como  $\delta M^{dc}(H) = 2m_r^{dc}(H) - 1 + m_d(H)$  para  $H < H_R$  e  $\delta M^{dc}(H) = 2m_r^{dc}(H) - 1$  para  $H \geq H_R$ .

## Curvas de Inversão de Primeira Ordem

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  $H_a > H_r$ . 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

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

Torna-se conveniente, para representar graficamente a distribuição FORC, utilizar o sistema de coordenadas  $\{H_c = (H_r - H_a)/2, H_u = (H_r + H_a)/2\}$ .

Computacionalmente deriva-se os dados pelo método de  $k$ -próximos vizinhos.

## Método e Resultados

Em todas as análises feitas até então, as FORCs foram usadas apenas para observar o comportamento da magnetização em sua componente  $x$  (isto é, paralelo ao campo magnético aplicado) de sistemas ferromagnéticos. Assim, são aplicados os dois métodos citados em conjunto para analisar um sistema que apresenta viés de troca (exchange bias, em inglês). Além disso é analisado a componente  $y$  da magnetização com diagramas FORC.

## Sistema com Exchange Bias

Comparação das Curvas de remanência, o gráfico  $\delta M$  e o diagrama FORC correspondente para uma amostra de IrMn/Co de maneira inédita. Nesse sistema foram feitas as medidas partindo da saturação negativa (ascendendo até a positiva) e partindo da saturação positiva (descendendo até a negativa).

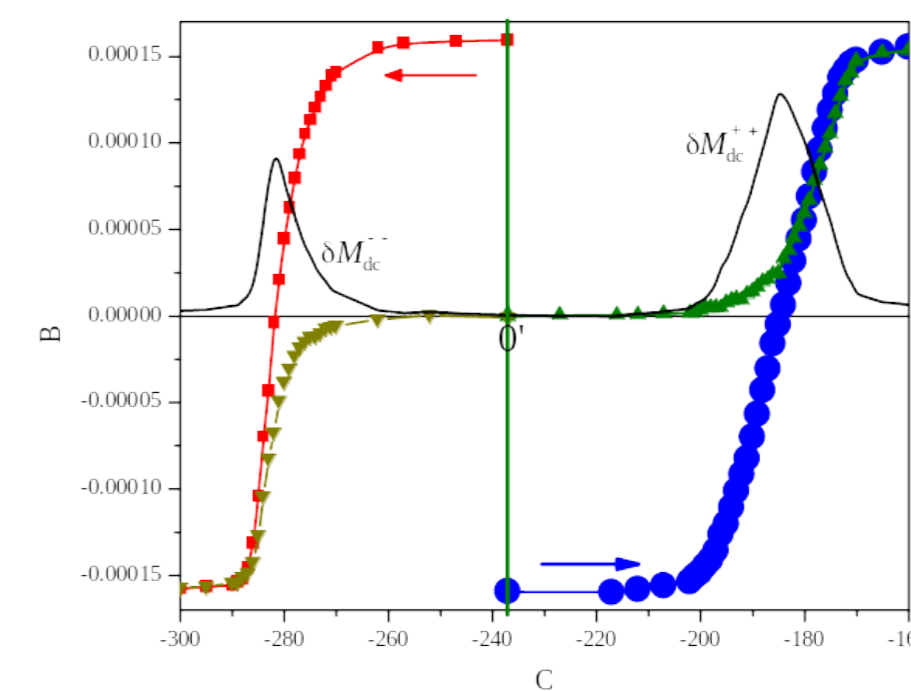


Figura 1: Curvas de Remanência e Gráfico  $\delta M$  descendente (esquerda) e ascendente (direita)

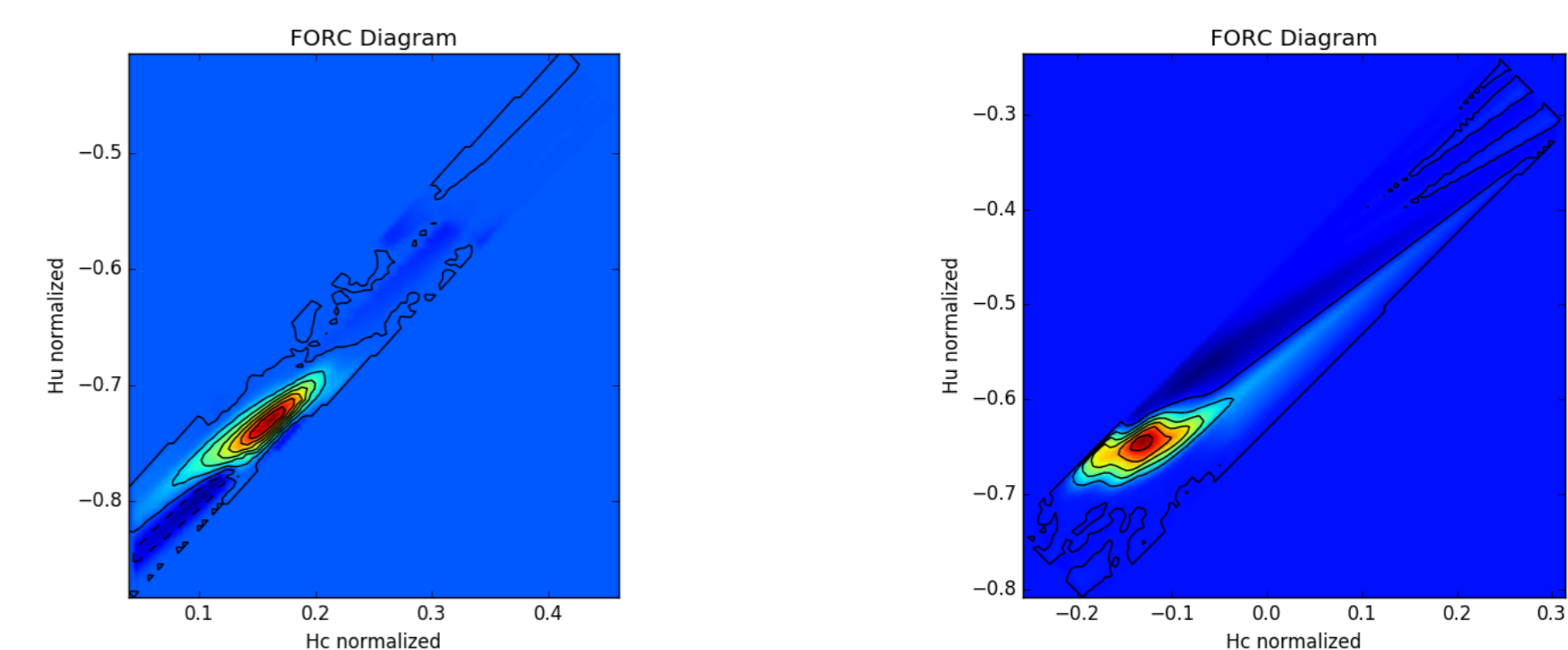


Figura 2: Diagrama FORC ascendente (esquerda) e Diagrama FORC descendente (direita)

## Extendendo o uso das FORCs

Buscando maior entendimento na componente  $y$  da magnetização (perpendicular ao campo aplicado), foi analisado seu comportamento pelo Diagrama FORC de maneira inédita.

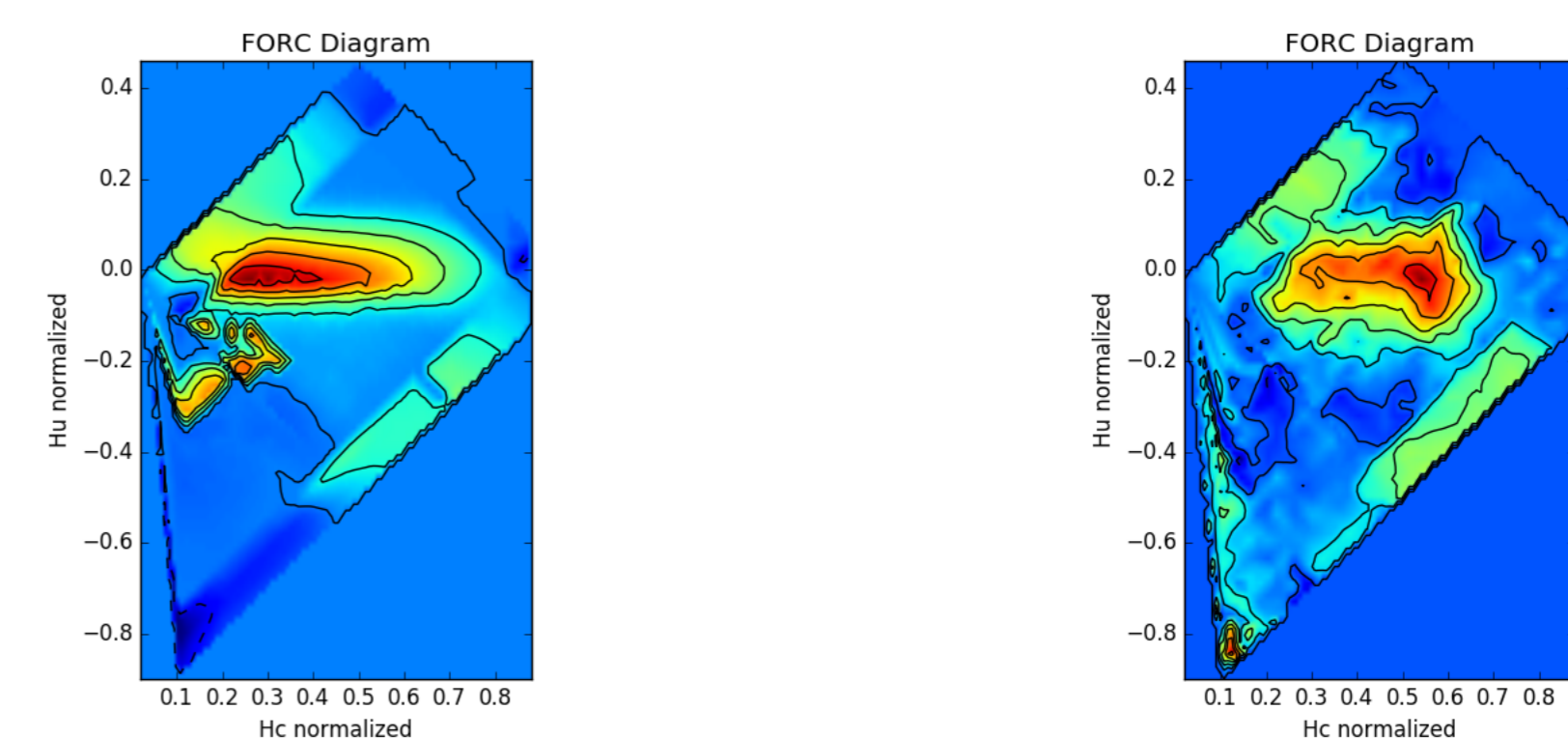


Figura 3: Diagrama FORC - Componente  $x$  (esquerda) e Diagrama FORC - Componente  $y$  (direita)

## Conclusões

- Verificou-se a eficácia do uso comparado dos dois métodos em sistemas ferromagnéticos e que apresentam exchange bias.
- Viu-se a compatibilidade da análise do comportamento da magnetização  $y$  com os diagramas FORC.

## Referências

1. WOHLFARTH, E. P., J. Appl. Phys. 29, 1958. 595.
2. HENKEL, O., Phys. Stat. Sol. 7, 1964. 919.
3. KELLY, P. E. et al., IEEE Trans. Magn. 25, 1989. 3881.
4. GESHEV, J.; MIKHOV, M., J. Magn. Magn. Mat. 104-107, 1992. 1569.
5. HARRES, A.; CICHELO, R.; PEREIRA, L. G.; SCHMIDT, J. E.; GESHEV, J., J. Appl. Phys. 114, 2013. 043902.
6. MAYERGOYZ, I. D., J. Appl. Phys. 57, 1985. 3803.
7. DOBROTA, C. I.; STANCU, A., J. Appl. Phys. 113, 2013. 043928.
8. FLEISCHER, R. L.; PRICE, P. B.; WALKER, R. M., Nuclear tracks in solids: principles and applications (University of California Press, Berkeley, 1975).
9. WEHLAND, F.; LEONHARDT, R.; VADEBOIN, F.; APPEL, E., Geophys. J. Int. 162, 2005. 315.
10. WOHLFARTH, E. P., J. Appl. Phys. 29, 1958. 595.
11. HENKEL, O., Phys. Stat. Sol. 7, 1964. 919.
12. KELLY, P. E. et al., IEEE Trans. Magn. 25, 1989. 3881.
13. BISSEL, P. et al., IEEE Trans. Magn. 25, 1989. 3650.