



## Estudo de interações em sistemas com *Exchange Bias*

Luana Lazzarotto Bianchi

Orientador: Prof. Julian Geshev

### Objetivos

- ❖ Aprimorar o software que obtém os gráficos  $\delta M_R$ ;
- ❖ Investigar a relação entre os novos e antigos gráficos de interação;
- ❖ Entender melhor os mecanismos que governam as interações magnéticas em sistemas nanoestruturados.

### Introdução

Em 1958 Wohlfarth estabeleceu uma relação entre as principais curvas de remanência de sistemas que possuem curva de histerese completa (*major loop*) simétrica, e desta relação extraiu-se o  $\delta M(H)$ , que é usado desde então para estudar as interações magnéticas.

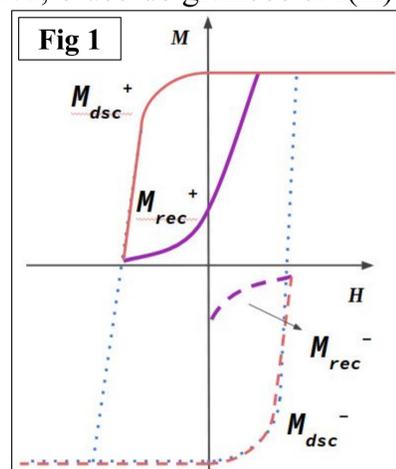
Em sistemas sem presença de efeitos de interação o  $\delta M(H)$  deve ser nulo para qualquer campo aplicado, porém, nos casos em que ele possui um valor não nulo, este é explicado pela presença dos efeitos de interação. Quando esse  $\delta M(H)$  é positivo, dizemos que há interações “magnetizantes”, e dizemos que há interações “desmagnetizantes” quando o  $\delta M(H)$  é negativo.

Recentemente uma nova relação análoga à de Wohlfarth foi estabelecida, porém entre curvas de magnetização. Dessa relação introduziu-se o gráfico  $\delta M_R(H)$ . Esse novo gráfico se mostrou vantajoso em relação ao  $\delta M(H)$  pois, por surgir de uma relação entre curvas de magnetização, é um processo mais rápido e eficaz do que o antigo. Essas duas relações são válidas apenas para sistemas que apresentam simetria, e dessa forma, em sistemas que apresentam o fenômeno de *Exchange Bias (EB)*, que são caracterizados pelo deslocamento em campo e pela assimetria da curva, o uso de gráficos  $\delta M(H)$  e  $\delta M_R(H)$  é dificultado.

Uma relação, que pode ser usada em sistemas que apresentam *EB*, mais geral foi então estabelecida para construir um gráfico  $\delta M_R(H)$ :

$$\delta M_R = M_{rec}^+(H) + M_{rec}^-(-H) - M_{dsc}^+(H) - M_{dsc}^-(-H)$$

Na Figura 1 podemos observar cada termo da relação. As curvas tracejadas são rotações em torno do eixo que passa pela origem das curvas sólidas. Ressalta-se que  $H = H_{ex} - H_{shift}$ .



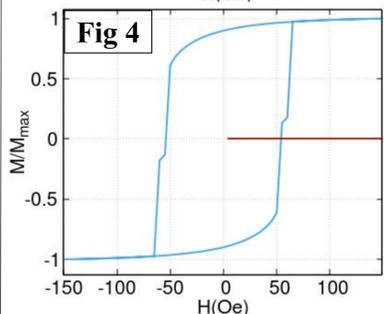
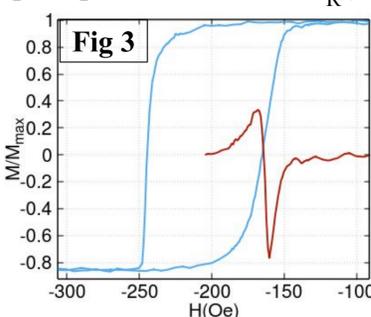
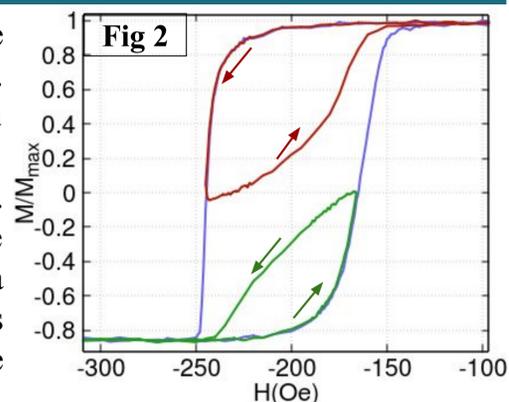
### Metodologia

Para fazer as análises desejadas, foram obtidas curvas de magnetização utilizando o magnetômetro de amostra vibrante (VSM) do laboratório. Para uma mesma amostra, obteve-se curvas de reversão partindo tanto da saturação positiva quanto negativa, cujo campo de reversão (*recoil loop*) fosse o mais próximo possível do campo coercivo. Os dados obtidos com as medidas de magnetização foram processados pelo software desenvolvido para então obter os gráficos  $\delta M_R(H)$ . Foram feitas análises nos gráficos obtidos para poder entender os mecanismos de reversão.

Paralelamente a isso, foi dada manutenção ao software e também implementado novas características utilizando a linguagem de programação Python.

### Resultados e Conclusões

Foram feitas medidas de magnetização para diferentes amostras. Na Figura 2 temos duas *recoil loops* e a *major loop* de um filme fino de Co(5 nm)/Cu(0,25 nm)/IrMn(15 nm). Observa-se que uma das *recoil loop* parte da saturação positiva (vermelho) e a outra da negativa (verde). Os dados obtidos foram processados pelo software para poder obter as  $\delta M_R(H)$ .



Um dos resultados importantes obtidos foi que as  $\delta M_R(H)$  nos dão informações qualitativas e quantitativas a respeito da assimetria da *major loop*. Na Figura 3 temos a *major loop* e a  $\delta M_R(H)$  do filme de Co/Cu/IrMn. Já na Figura 4 temos uma *major loop* simétrica.

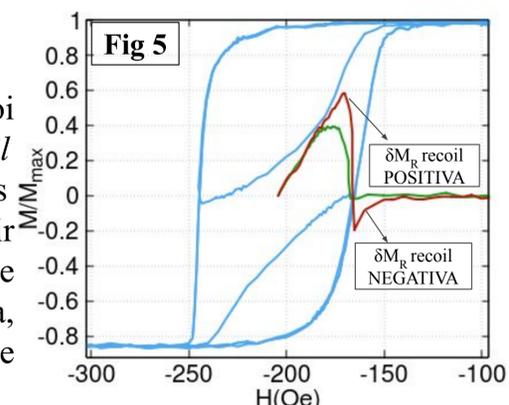
Observa-se que a *major loop* da Figura 4 resultou em um  $\delta M_R(H)$  essencialmente nulo, enquanto que para uma *major loop* assimétrica, obteve-se um  $\delta M_R(H)$  não nulo.

O programa desenvolvido calcula também a área sob estas curvas, fornecendo então um valor quantitativo da assimetria.

Uma outra observação importante foi que comparando os  $\delta M_R(H)$  das *recoil loops* medidas é possível separar os efeitos das interações podendo distinguir os efeitos oriundos do acoplamento de troca dentro da camada ferromagnética, dos provenientes da interface ferromagnética/antiferromagnética.

Na Figura 5 observamos os  $\delta M_R(H)$  para o filme de Co/Cu/IrMn. A curva em vermelho é a correponde a da *recoil* que parte da saturação positiva, e a verde da negativa.

O programa encontra-se disponível na página do laboratório (<http://www.if.ufrgs.br/pes/lam/dMr.html>) em versões para Windows e Linux.



### Referências

1. E. P. Wohlfarth, J. Appl. Phys. **29** (1958) 595.
2. J. Geshev, J. Magn. Magn. Mater. **135** (2018) 476.
3. J. Geshev, L. L. Bianchi, R. F. Lopes, J. L. Salazar Cuaila, and A. Harres, <https://arxiv.org/abs/1906.04124>.