

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA

USO DE CURVAS DE REMANÊNCIA MAGNÉTICA EM SISTEMAS QUE
APRESENTAM *EXCHANGE-BIAS*

Rafael Cichelero

Monográfica realizada sob Orientação do Prof. Dr. Julian Penkov Geshev, apresentada ao Instituto de Física da UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Física - Pesquisa Básica.

Porto Alegre
Junho de 2013

Resumo

O presente estudo discute a adaptação e a elaboração de uma técnica que usa medidas de remanência magnética em sistemas que apresentam interação de troca, visando a extração de resultados referentes a interações magnéticas presentes nas amostras. Tal adaptação consiste, basicamente, na translação da origem (magnetização contra campo magnético) do sistema. O primeiro passo foi a elaboração de um software de aquisição de dados que possibilite à aplicação da técnica para esse tipo de sistema. Uma série composta por filmes finos de NiCu/IrMn foi utilizada; devido ao fato de não apresentarem deslocamento em campo, esses filmes serviram como base para verificação da rotina. Posteriormente, foram utilizados filmes de Co/Cu/IrMn as quais apresentam deslocamento em campo (EB) e, em alguns casos, assimetria em suas curvas de histerese magnética. Concluindo os passos precedentes, foi possível então avaliar interações presentes em ambos os sistemas utilizando os gráficos de Henkel e δM .

Para o sistema NiCu/IrMn que apresenta laços de histerese simétricos e não-deslocados em campo, obtêm-se as curvas M_r e M_d usando a técnica de remanência em sua forma tradicional tornando possível, de uma maneira direta, a construção dos gráficos de remanência. Devido à diferença entre os sentidos dos campos magnéticos aplicados durante as aquisições das curvas remanência da série Co/Cu/IrMn, foi necessária a elaboração de uma nova notação. Além disso, a aplicação da técnica em tais amostras possibilitou a fácil visualização da assimetria direcional causada pela interação de troca. Também foi possível desenvolver novas representações gráficas, facilitando a visualização das interações magnéticas presentes.

Abstract

The present study discusses on the adaptation and development of a technique that uses magnetic remanence of exchange-coupled systems aiming to extract information for the magnetic interactions present. Such adaptation basically consists in the translation of the origin of the (magnetization versus magnetic field) system. Our first step was the preparation of data-acquisition software enabling the application of the technique for this type of systems. A series composed by NiCu/IrMn thin films was used; due to the fact that these films do not present displacement in field, they served as the basis for verification of the routine. Subsequently, we used samples composed by Co/Cu/IrMn films that show field displacement and, in some cases, asymmetry in their magnetic hysteresis curves. Having done the above steps, one can then assess interactions present in both type of systems using Henkel and δM plots.

For the NiCu/IrMn series that shows symmetrical, unshifted (in-field) hysteresis loops, we obtained the M_r and M_d curves using the technique in its traditional form thus making possible, in a very straightforward manner, the construction of the respective remanence plots. Due to the difference in the directions of the magnetic fields applied during the measurements of remanence curves of the Co/Cu/IrMn series, it was necessary to adopt a new curves' notations. In addition, the application of the remanence technique for such samples allowed an easy visualization of the loops' asymmetry caused by the exchange interactions. It was also possible to develop new graphical representations facilitating the visualization of the effects of the magnetic interactions.

Conteúdo

Introdução	1
1 Revisão teórica	2
1.1 Ferromagnetismo e antiferromagnetismo	2
1.2 Anisotropias magnéticas	4
1.2.1 Anisotropia uniaxial	4
1.2.2 Outras anisotropias	5
1.3 Exchange bias	5
1.3.1 A descoberta	5
1.3.2 Modelo intuitivo	6
1.3.3 Definições importantes	7
1.4 Curvas de remanência	7
1.4.1 Introduzindo a técnica	7
1.4.2 Gráficos de Henkel e δM	9
2 Procedimentos de instrumentação	11
2.1 Equipamento	11
2.2 Comunicação GPIB	13
2.3 Implementação da rotina	14
2.3.1 Rotinas de desmagnetização	14
2.3.2 Rotinas de medidas	15

2.4	Laços inteligentes	15
2.4.1	<i>Ramp Up</i>	16
2.4.2	<i>Ramp Down</i>	17
3	Resultados e discussões	20
3.1	Sistema IrMn/NiCu	21
3.2	Sistema IrMn/Cu/Co	22
3.2.1	Sistema IrMn/Co	23
3.2.2	Sistema IrMn/Cu (0,75 nm)/Co	25
3.2.3	Sistema IrMn/Cu (1,50 nm)/Co	26
3.2.4	Novas abordagens	27
3.2.5	Englobando dados da série IrMn/Cu/Co	28
4	Perspectivas	29
4.1	Próximos passos	29
	Referências	31

Introdução

Considerado como parte integral do Magnetismo moderno, o fenômeno de Exchange Bias (EB) foi descoberto em 1956 por Meiklejohn e Bean.¹ Mesmo sendo vastamente pesquisado nas últimas décadas, ainda não foi encontrada nenhuma teoria aceita por toda a comunidade científica que explica e prevê todas as características do EB. Sistemas que apresentam EB encontram-se em diversos dispositivos magneto-eletrônicos, sendo parte fundamental do sistema de leitura dos discos rígidos magnéticos. Logo, investigar tais sistemas torna-se tarefa de suma importância, tanto do ponto de vista do conhecimento como de aplicação.

O presente trabalho tem como objetivo estudar sistemas que apresentam EB através do uso de curvas isotérmicas de remanência (IRM) e de desmagnetizações DC (DCD) magnéticas. Tais curvas originalmente foram desenvolvidas para caracterizar interações magnéticas em sistemas com anisotropia uniaxial ou cúbica os quais apresentam laços de histerese simétricos, onde os valores de remanência após saturação são iguais em módulo, não importando se o sentido do campo magnético aplicado for positivo ou negativo, devido a simetria do sistema.

O objetivo principal deste trabalho é aplicar a técnica citada acima em sistemas que apresentam EB através de uma adaptação desde. Propõe-se uma redefinição do sistema de coordenadas, fazendo com que a origem coincida com o centro da curva deslocada. Desta maneira, o sistema passaria a apresentar duas novas magnetizações remanentes de valores iguais, permitindo a utilização do método.

1 *Revisão teórica*

1.1 Ferromagnetismo e antiferromagnetismo

Pode-se definir a magnetização \mathbf{M} de um corpo como uma medida de seu momento magnético total por unidade de volume. Materiais com magnetização espontânea são denominados ferromagnéticos (FM) e apresentam momento magnético resultante mesmo na ausência de campo magnético; tal propriedade é chamada de magnetização remanente, \mathbf{M}_r . Mediante a aplicação de campo, a magnetização pode aumentar até atingir um valor máximo, conhecido como magnetização de saturação, \mathbf{M}_s . Sendo a magnetização dependente da temperatura (T), observa-se que ao aumentar T , ocorrerá um decréscimo de \mathbf{M} ao ponto em que $\mathbf{M} = 0$, onde se observa a mudança de ordem magnética; dá-se o nome para tal temperatura de temperatura crítica. O ferromagnetismo deixa de existir e cede lugar para o paramagnetismo (PM), sendo essa temperatura chamada de T_C , temperatura de Curie. Diferentemente dos materiais FM, os materiais PM não apresentam \mathbf{M}_r , ou seja, na ausência de campo $\mathbf{M} = 0$ devido ao fato de que seus momentos magnéticos estão orientados aleatoriamente; porém, ao aplicar um campo magnético externo suficientemente grande, induzimos uma nova reorientação, obtendo $\mathbf{M} > 0$.

O primeiro passo para explicar este fenômeno se deve a Pierre Weiss e sua hipótese do campo molecular \mathbf{H}_m , o qual tende a alinhar estes momentos magnéticos em uma determinada direção; sendo \mathbf{H}_m forte o suficiente para vencer a agitação térmica, espera-se que o sistema apresente magnetização. Além disso Weiss propôs uma hipótese adicional imaginando que o material podia ser composto por domínios, cada um com sua própria magnetização. Dessa maneira, os momentos poderiam se alinhar de tal forma que a magnetização total fosse nula, dando a idéia de uma nova ordem magnética, o antiferromagnetismo (AFM), referente a figura 1.

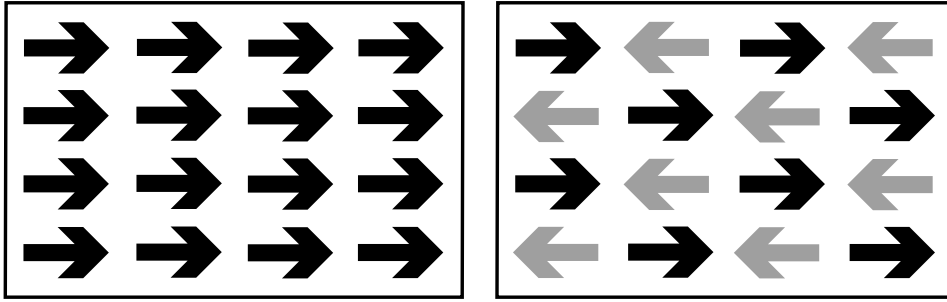


Figura 1: A esquerda pode-se observar o comportamento ferromagnético com momentos alinhados; já a direita notamos momentos alinhados em antiparalelo caracterizando o comportamento antiferromagnético.

Porem, a teoria de Weiss não fazia nenhuma abordagem a origem física do problema até que em 1928 essa interação foi compreendida e demonstrada por Heisenberg através da mecânica quântica, a qual também trazia a tona a noção de spin, sendo essa um propriedade intrínseca dos elétrons. Trata-se de uma interação de troca (exchange) entre os momentos, sendo a energia definida pela seguinte expressão:

$$E_{ex} = -J_E \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j,$$

onde \mathbf{S}_i ou \mathbf{S}_j são os spins dos átomos i e j interagentes e J_E é a constante de acoplamento. Caso $J_E > 0$, obtêm-se interação ferromagnética, ou seja, os spins se alinham paralelamente. Já para $J_E < 0$ obtêm-se interação antiferromagnética com spins alinhados antiparalelamente. Também pode-se induzir uma mudança de ordem magnética através do aquecimento térmico, obtendo assim uma temperatura crítica para ordem AFM, sendo essa chamada de temperatura de Neél (T_N), acima da qual se estabelece o estado paramagnética no material. Na figura 2 pode-se melhor observar as ordens magnéticas.

Ferromagnetismo		
Diamagnetismo		
Paramagnetismo		
Antiferromagnetismo		

Figura 2: Na tabela acima estão inclusos os diferentes tipos de manifestações magnéticas presentes no trabalho.

1.2 Anisotropias magnéticas

Certas propriedades de materiais dependem da direção em que são medidas. Estas dependências, chamadas de anisotropias, foram bastante exploradas nos últimos 80 anos, tendo papel fundamental quando se trata de materiais magnéticos. Existem vários tipos de anisotropia, a principal para o trabalho será abordada a seguir.

1.2.1 Anisotropia uniaxial

Em materiais cristalinos, os momentos magnéticos orbitais estão fortemente ligados à rede, tendo assim orientações bem definidas, e mesmo campos magnéticos intensos não são capazes de reorientá-los. Devido a este acoplamento ocorre uma distorção entre momentos orbitais e os de spin, a qual dá origem à anisotropia magneto-cristalina. Na ausência de campo magnético aplicado, esta anisotropia manterá os spins alinhados ao longo de determinada direção. Caso o campo magnético seja aplicado nessa direção, os spins serão orientados facilmente; chama-se tal direção de eixo fácil de magnetização. Porém, ao se aplicar o campo perpendicularmente em relação ao eixo fácil, o campo necessário para saturar os momentos será maior, pois a anisotropia se opõe a tal direção e tentará mantê-los alinhados na direção preferencial do sistema; tal direção chamada é de eixo duro de magnetização. Observando a curva de histerese de uma material ferromagnético, pode-se notar a influência da anisotropia, demonstrado na figura 3.

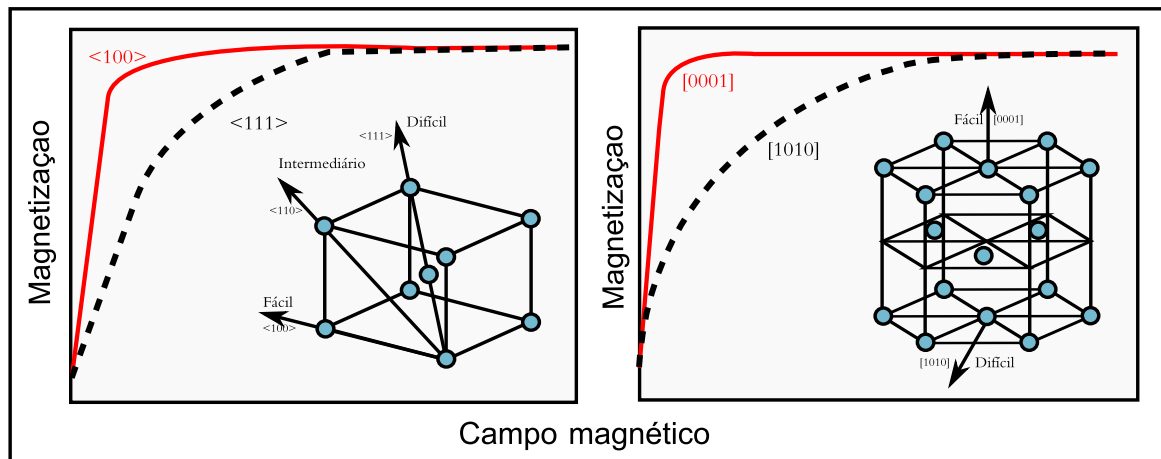


Figura 3: A esquerda podem-se observar os eixos de fácil magnetização, sua estrutura cristalina com suas respectivas curvas de histereses do material Fe; a direita se refere ao Co.

1.2.2 Outras anisotropias

Existem outros tipos de anisotropias, tais como anisotropia de forma, anisotropia cúbica ou até mesmo anisotropia magneto-estática a qual será vagamente citada, pois ainda não se sabe do tamanho de sua contribuição para o presente trabalho.

1.3 Exchange bias

1.3.1 A descoberta

O fenômeno de EB foi observado pela primeira vez no ano de 1956, por Meiklejohn e Bean.¹ Eles perceberam que a curva de histerese magnética de amostras de cobalto envolvidas por seu óxido natural CoO apresentam deslocamento em campo. Porém, tal efeito só acontecia se as amostras fossem previamente resfriadas de 300 até 77 K em campo magnético, podendo ser visualizado na 4. Porém, executando o mesmo procedimento sem a utilização de campo, notava-se que a histerese não apresentava deslocamento. Além disso, para temperaturas superiores à T_N do CoO, as partículas apresentavam um comportamento magnético respectivo ao Co puro. Concluiu-se então que o efeito surgia da interação do material FM com o material AFM, e que poderia ser descrito como uma anisotropia de troca. Desde então, o fenômeno foi observado em inúmeros sistemas, como por exemplo pequenas partículas,^{1,2} filmes finos,³⁻⁵ filmes FM sobre monocristais AFM,^{6,7} e materiais inhomogêneos.^{8,9}

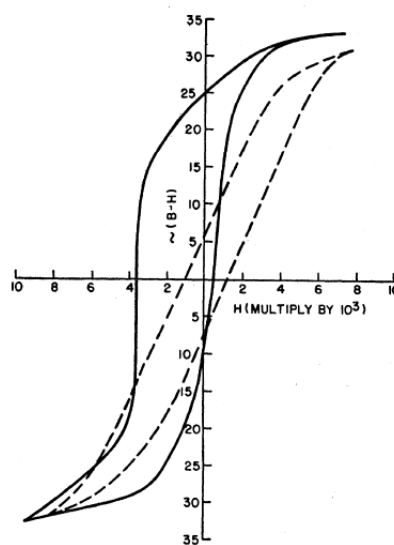


Figura 4: Amostra de CoO, primeira manifestação do efeito detectada

1.3.2 Modelo intuitivo

Meiklejohn tentou explicar o fenômeno de EB através de um modelo teórico simples; porém, este modelo só oferecia uma idéia qualitativa do fenômeno. Desde então muitos avanços foram realizados, mas ainda existem dúvidas sobre o assunto. A origem física do fenômeno que é geralmente aceita é a de que existe um acoplamento de troca nas interfaces dos materiais FM e AFM.

Pode-se ativar esse fenômeno de maneira relativamente simples, veja figura a 5. Sabe-se que o material FM possui determinada T_C , e que o material AFM possui determinada T_N ; logo, realizando um tratamento térmico^{10,11} a temperatura T , sendo $T_C > T > T_N$, se mantém a ordem do material FM, porém haverá uma mudança de ordem no material AFM. Assim aplica-se um campo magnético externo suficientemente grande para saturar o material FM; por sua vez, na interface, o material AFM agora estará susceptível a interação com o FM, e tenderá a se orientar na mesma direção dessa. Conforme se reduz a temperatura, o AFM retorna a sua ordem magnética com alterações na interface com o FM, devido a interação de troca com o FM. Ao término do procedimento obtêm-se amostras com EB. Além disso pode-se induzir EB através do bombardeamento iônico,¹²⁻¹⁵ também na presença de campo aplicado.

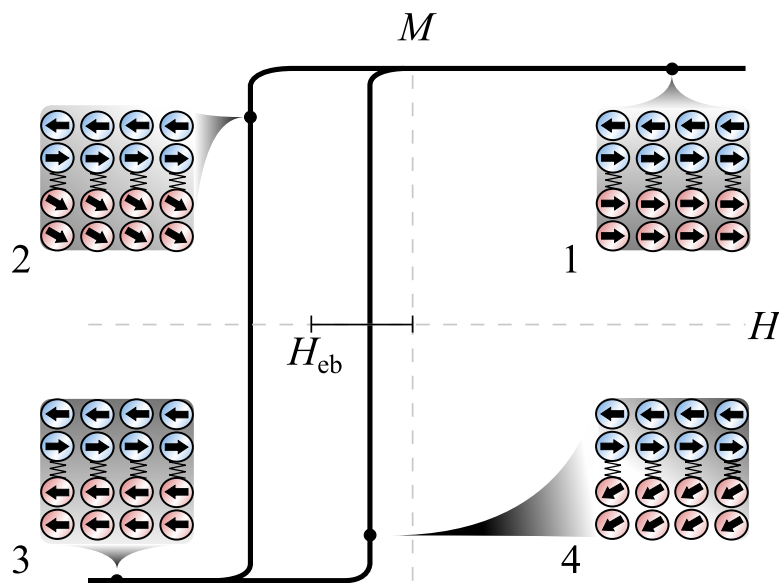


Figura 5: Uma visualização esquemática do comportamento FM/AFM, frente à uma variação de campo; pode-se observar as diferentes orientações do material FM enquanto o AFM permanece estável.

1.3.3 Definições importantes

Para que se extraia informações da histerese magnética, é necessário a visualização de dois campos, o campo coercivo H_c e o campo de exchange bias H_{EB} , sendo definidos como:

$$H_c = \frac{H_{ci} + H_{cj}}{2},$$

e

$$H_{EB} = \frac{H_{ci} - H_{cj}}{2},$$

podendo ser visualizados na figura 6.

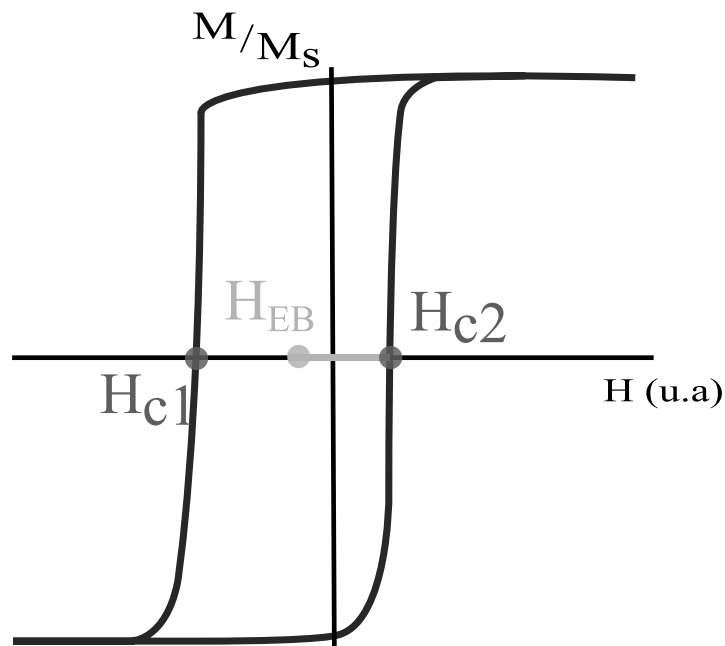


Figura 6: Definição dos pontos de H_c e H_{EB} .

1.4 Curvas de remanência

1.4.1 Introduzindo a técnica

Diferentemente das medidas de magnetização, as medidas de remanência dependem da história magnética do sistema.

Utilizando a magnetização remanente M_R citada acima, pode-se realizar diferentes tipos de curvas, pois a M_R depende da história magnética do sistema. Tais curvas podem ser interessantes para análise de materiais ferromagnéticos, pois podemos através delas ter ideia das interações

que estão ocorrendo. Em especial pode-se usar curvas isotérmicas de remanência (IRM) e as curvas de desmagnetização DC (DCD).

Para a obtenção de uma curva IRM, parte-se de um estado desmagnetizado, ou seja quando $\mathbf{M} = \sum \mathbf{m}_i = 0$, onde \mathbf{m}_i é a magnetização de cada sítio presente na amostra e i é o índice do sítio. Partindo do estado desmagnetizado aplica-se um campo $H_1 > 0$ e logo após retira-se o campo, e realiza-se a medida de remanência obtendo $M_r(H_1)$; assim para o próximo passo aplica-se um campo $H_2 > H_1$, novamente zera-se o campo $H = 0$ obtendo $M_r(H_2)$; faz-se isso até que $H_n = H_s$, onde H_s é o campo necessário para saturar a amostra, sendo que o estado desmagnetizado pode ser obtido de diferentes formas de desmagnetização ac, dc ou térmica.

Para obtenção da curva DCD, parte-se do estado saturado e reduz-se o campo gradativamente sendo que em cada redução de campo, o campo é zerado e a medida é realizada obtendo $M_d(H_n)$; faz-se então o ciclo de repetições até que se atinja o campo necessário para saturar, no sentido oposto ao da $M_r(H)$. Completando o ciclo obtemos IRM e DCD, adquirimos informações semelhantes às da figura 7, um laço partindo do zero de magnetização, e outro partindo da saturação.

Utilizando as curvas $M_d(H)$ e $M_r(H)$, agora pode-se realizar alguns gráficos.

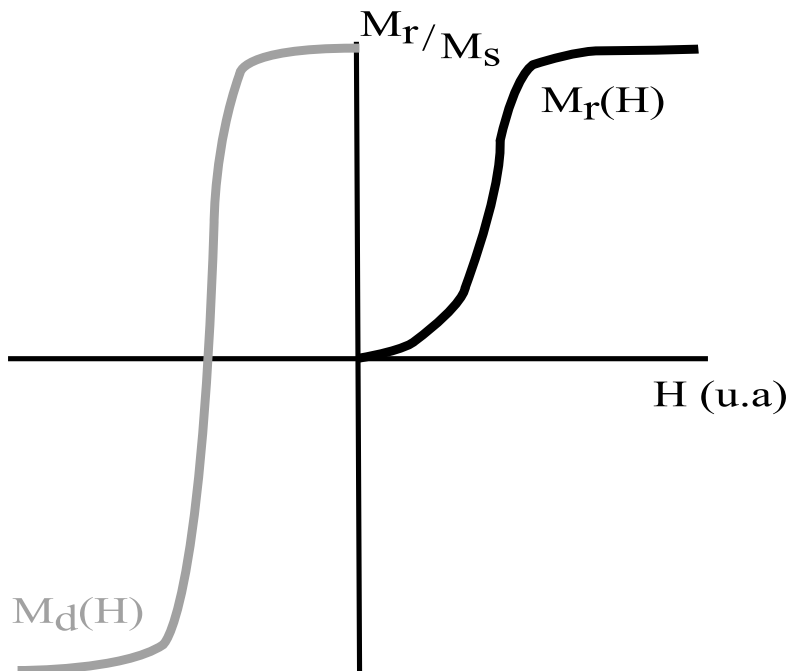


Figura 7: Par de Curvas M_r e M_d .

1.4.2 Gráficos de Henkel e δM

É importante salientar que existe uma relação entre as curvas $M_r(H)$ e $M_d(H)$. Considerando um sistema de partículas não interagentes, as quais são mono-domínios e possuem apenas anisotropia uniaxial, sabemos que as seguintes relações devem ser satisfeitas:

Para desmagnetizações ac temos:¹⁶

$$M_d = 1 - 2M_r.$$

Já para desmagnetizações dc temos:¹⁷

$$M_r^{\text{dc}}(H) = 1 - M_d(H) \quad \text{para } H < H_d, \text{ e} \quad (1.1)$$

$$M_r^{\text{dc}}(H) = 1 \quad \text{para } H \geq H_r. \quad (1.2)$$

Gráficos de Henkel basicamente consistem na representação gráfica da curva $M_d(H)$ em função da $M_r(H)$; para isso, faz-se a devida reflexão na curva $M_d(H)$, para que ambas partam do mesmo módulo e sentido de campo.

Para a construção dos gráficos de δM são necessárias pequenas operações; basicamente, temos que aplicar as relações definidas acima para os nossos dados, observando que para a figura 8 contendo os gráficos de Henkel, o δM será igual a zero, pois tratando-se de um sistema sem interação ele deverá estar sob a reta do gráfico de Henkel o que torna seu $\delta M = 0$.

Vale a pena salientar que os gráficos de δM são construídos em função do campo, facilitando a visualização e interpretação dos resultados obtidos. Para realizar tais gráficos são necessárias algumas operações definidas abaixo. Para desmagnetizações AC temos

$$\delta M^{\text{ac}}(H) = 2M_r^{\text{ac}}(H) - M_d^{\text{ac}}(H) - 1.$$

Já para desmagnetizações DC

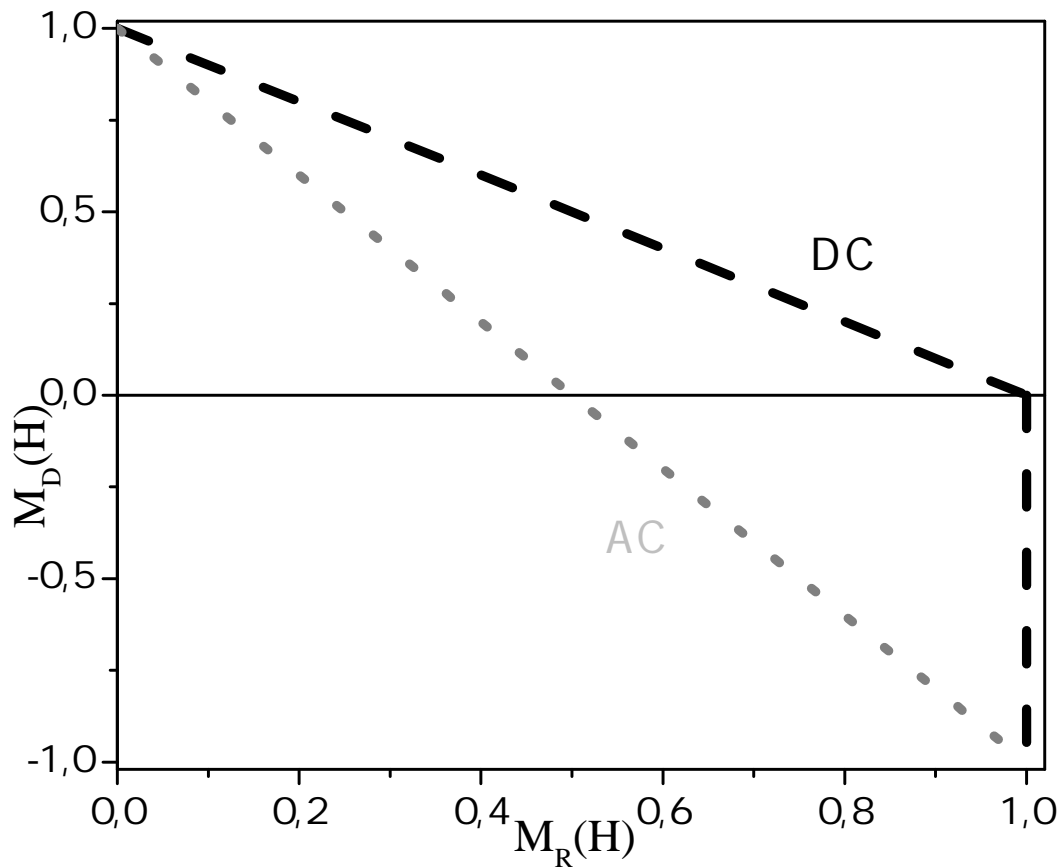


Figura 8: Em cinza pode-se observar o gráfico de Henkel frente a uma desmagnetização AC; em preto está a curva obtida através da desmagnetização DC.

$$\delta M^{\text{dc}}(H) = 1 - M_r^{\text{dc}}(H) + M_d^{\text{dc}}(H) \quad \text{para } M_d(H) > 0, \text{ e} \quad (1.3)$$

$$\delta M^{\text{dc}}(H) = 1 - M_r^{\text{dc}}(H) \quad \text{para } M_d(H) < 0. \quad (1.4)$$

Tais definições serão utilizadas nas próximas seções.

2 *Procedimentos de instrumentação*

2.1 Equipamento

O equipamento utilizado é um Magnetômetro de Gradiente de Força Alternada^{18,19}(AGFM), tendo alta sensibilidade da ordem de (10^{-9} Am²) e baixo custo de montagem, sendo possível fazer boas medidas de amostras FM com espessura menor que 1 nm. Esse equipamento foi montado e adaptado em nosso próprio laboratório.

O sistema é constituído pelos seguintes itens: uma haste e sua capsula protetora, um eletroímã, bobinas de gradiente e instrumentos de aquisição; o desenho esquematizado pode ser visualizado na figura 9.

i. Haste

É formada por um capilar de vidro, sendo que em uma de suas extremidades localiza-se uma lamínula de vidro pouco espessa tendo a finalidade de suportar a amostra; na outra extremidade encontramos o piezo-elétrico, responsável pela aquisição do torque sob a amostra, transformando essa vibração, ou oscilação, em pulsos elétricos a serem detectados pelo *lock-in*, o qual recebe informações através de contatos no piezo-elétrico. Além disso, a haste dispõe de uma blindagem externa, consistindo em uma capsula metálica que tem finalidade de blindar o sistema, reduzindo o ruído provocado.

ii. Eletroímã

Utilizado para gerar campo magnético, este dispositivo é suprido por uma fonte de alimentação controlada por controlador D/A, possibilitando controlar o campo sob o qual a amostra será submetida.

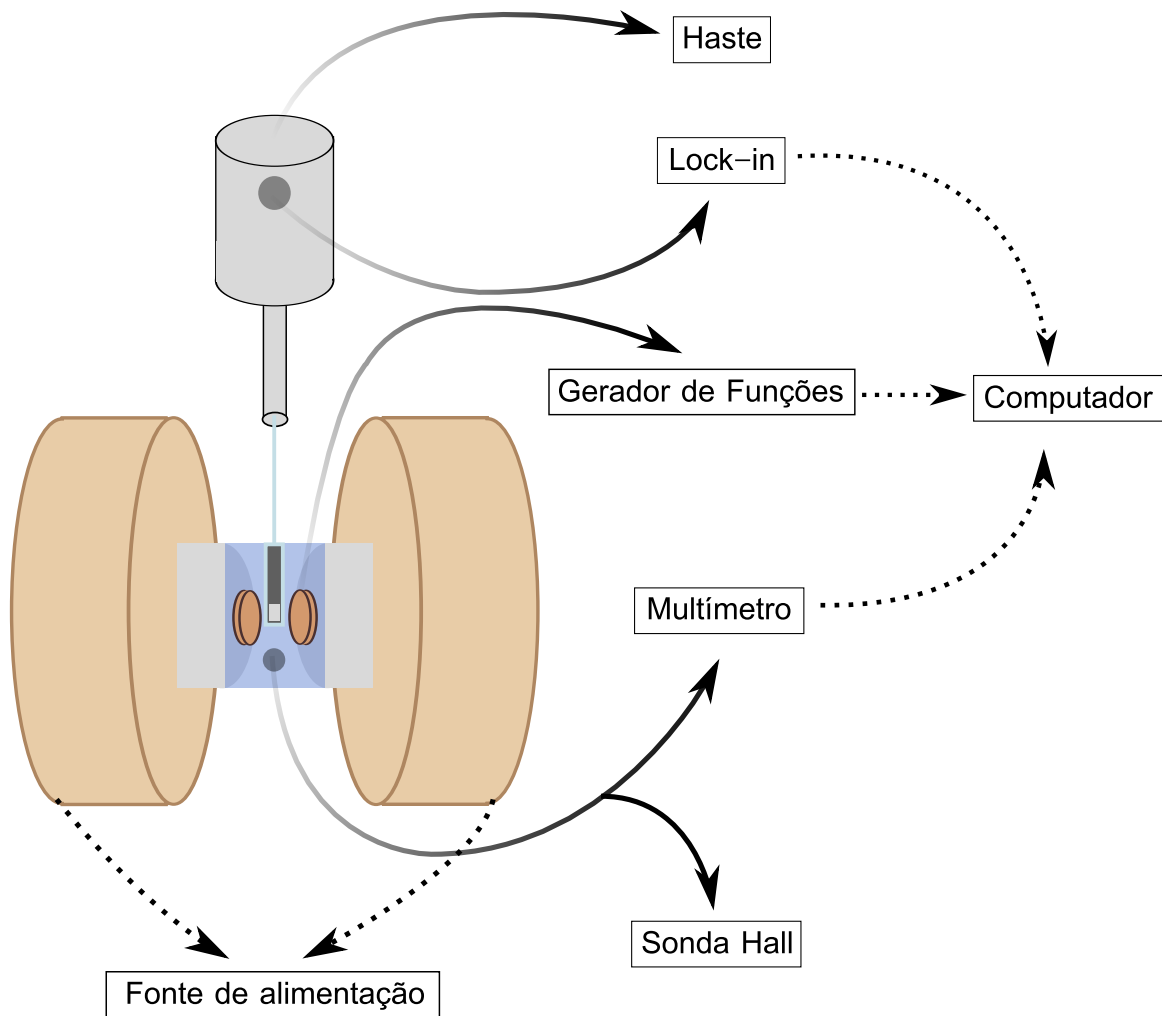


Figura 9: Montagem esquemática do sistema de medidas AGFM.

iii. Bobinas de gradiente

Tendo papel fundamental no sistema, as bobinas de gradiente são utilizadas para excitar o sistema. Sabe-se que o conjunto haste e amostra possui determinada frequência de ressonância. As bobinas têm como papel gerar tal frequência, levando o sistema a sua ressonância facilitando a detecção pois, na proximidade da frequência de ressonância, observa-se um aumento significativo no sinal detectado.

iv. *lock-in*

Sendo o principal equipamento para o funcionamento do sistema, o *lock-in* terá diversas tarefas, tais como a de controlar o campo magnético, realizar as aquisições do sinal vindo do piezo-elétrico, e também é responsável pela realimentação remanente, sendo esse passo fundamental da medida pois conseguiremos controlar perfeitamente o campo ao qual a amostra foi submetida.

v. Leitura de campo e geração de onda

Através do uso de uma sonda Hall, se realizam as medidas de campo magnético utilizando um multímetro para efetivar a leitura; para a alimentação das bobinas de gradiente, utiliza-se um gerador de funções para modular e adequar a onda gerada com a frequência de ressonância do sistema.

vi. Computador

Possui a finalidade de comandar os instrumentos, sendo esses comandos repassados através de um conversor USB-GPIB, possibilitando a execução de comandos no sistema.

2.2 Comunicação GPIB

Para realização do trabalho foi necessário o aprendizado de determinada linguagem de programação instrumental; optou-se pelo uso do software LabView, o qual apresenta grande parte das bibliotecas dos equipamentos, tornando assim a comunicação Computador - Instrumentos muito mais amigável. Tratando-se de uma linguagem visual, não baseada em linhas de comando, se dispõe de um diagrama de blocos (responsável pelo código visual) e de um diagrama visual (onde se verifica, através de gráficos ou indicadores, os dados obtidos).

Parte essencial do trabalho de programação consta em ordenar a determinado equipamento a execução da tarefa desejada; por exemplo, a leitura de campo magnético necessita que o multímetro utilizado faça aquisições coerentes e no momento apropriado. Pode-se dizer que a comunicação com os equipamentos segue uma sequência bem determinada, sendo os passos descritos abaixo:

i. Inicialização do instrumento.

Driver executado para tornar possível qualquer operação.

ii. Localização do endereço GPIB.

Informação do endereço para onde os comandos são enviados.

iii. Configuração do instrumento.

Seleção do modo de aquisição que o instrumento realizará, no caso Tensão DC.

iv. Execução da aquisição

Após configurado, o instrumento pode realizar a aquisição sem erros.

v. Fechando o instrumento.

Término da comunicação GPIB, possibilitando uma nova inicialização para que se possa adquirir diferentes dados.

Seguindo os passos supra citados, pode-se então dar início a rotinas necessárias para que a técnica seja implementada; necessita-se de laços e condições que tornem possíveis a rotina de remanência.

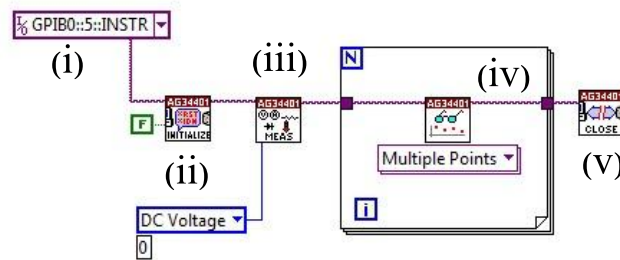


Figura 10: Esquema de comando para instrumentos via GPIB.

2.3 Implementação da rotina

A ideia básica por trás da implementação da rotina consiste em um simples deslocamento da origem do referencial $M \times H$, pois tal técnica fora elaborada para amostra sem EB, ou seja, sem deslocamento em campo. Necessita-se que $H = 0$ seja substituído pelo valor em campo de EB da amostra, tornando assim possível a realização de medidas de remanência, frente a translação da origem.

2.3.1 Rotinas de desmagnetização

Como previamente dito, o primeiro passo para a realização de tais medidas consiste em desmagnetizar a amostra. O processo resume-se em saturar a amostra, depois se reduz o campo até sua nova origem, o campo de EB; assim se realiza a aquisição da magnetização de remanência, e por sua vez, se repete o ciclo diminuindo gradativamente o campo, enquanto $M_{H=EB} < \delta$, onde δ é o erro aceitável, sendo que para tais medidas utilizamos $\delta \leq \frac{M_R}{10}$. Devido à assimetria causada pelo EB, são realizadas duas desmagnetizações para os diferentes sentidos do campo magnético aplicado.

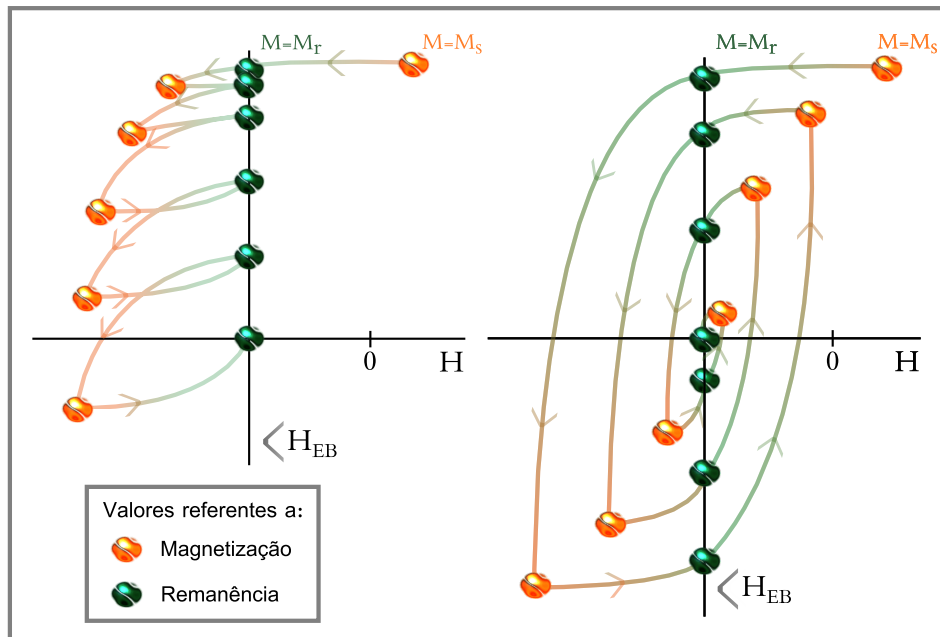


Figura 11: A esquerda pode se observar o processo de desmagnetização dc; à direita é apresentada desmagnetização ac, sendo que os pontos em laranja referem-se a $M(H)$, e os pontos em verde são os valores de interesse para o trabalho $M_r(H)$.

2.3.2 Rotinas de medidas

Partindo do estado desmagnetizado, a amostra passará por dois ciclos de medidas, sendo o primeiro chamado de M_{r+} , onde + indica o sentido em que o campo será aplicado. Logo, partindo do estado desmagnetizado, aplica-se campo magnético e se retorna ao valor inicial ou valor de EB, efetivando a aquisição de um ponto para a medida de remanência. Tal procedimento se repete até que a amostra esteja saturada, como visto na figura 11, em laranja. Após saturado, dá-se início à M_{d-} , revertendo o sentido do campo magnético com a finalidade de saturar a amostra no sentido oposto à M_{r+} ; repete-se os ciclos de expor e retirar o campo magnético sob a amostra e se fazem as aquisições necessária até a amostra esteja saturada (curva azul da figura 11). Feito isso, precisa-se desmagnetizar a amostra novamente, agora utilizando o sentido negativo do campo; terminada a desmagnetização, da-se início a M_{r-} , onde se repetem os mesmos procedimentos de remanência, porém agora saturando a amostra no sentido negativo; terminado esse passo, da-se inicio ao ciclo M_{d-} , revertendo a magnetização no sentido positivo.

2.4 Laços inteligentes

A informação obtida através das rotinas acima pode ser facilmente influenciada pela remanência do eletroímã, pois devido a passagem de corrente, torna-se provável que os polos do

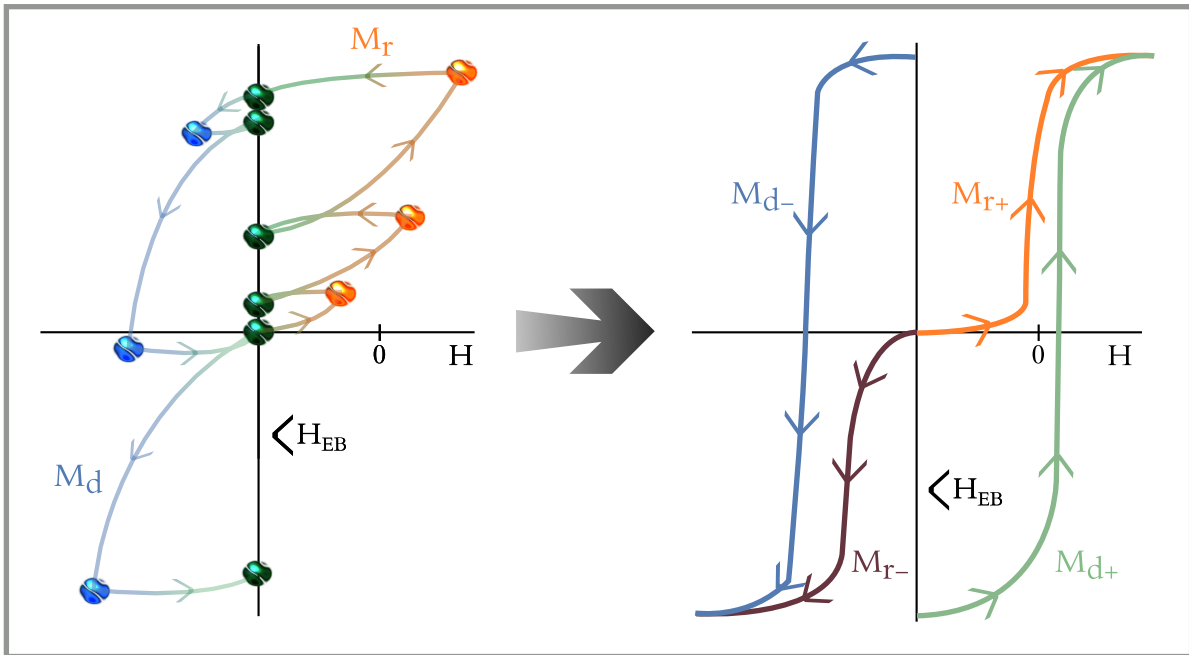


Figura 12: A esquerda nota-se a demonstração da rotina de remanência, expondo a amostra a determinado campo e retornando ao valor de EB; a direita encontram-se as curvas obtidas através da rotina.

eletroímã se "viciem", possibilitando assim que mesmo sem a passagem de corrente pelo eletroímã ainda exista campo magnético residual; além disso, revertendo o sentido da corrente, modificamos também o sentido do campo magnético residual dos polos, tornando muito difícil a aquisição coerente de dados, pois o sistema acaba se demonstrando instável ao longo do ciclo completo de medida.

Para resolver tal problema, foi necessário o desenvolvimento de laços avançados, que ponto a ponto façam a leitura do campo magnético, garantindo o retorno ao campo desejado. Taís laços foram implementados para garantir a eficácia da técnica; um laço tem o papel de elevar o campo até o valor necessário, chamado de *Ramp Up*, e outro foi desenvolvido para reduzir lentamente o campo, garantindo uma boa aquisição de dados, esse nomeado de *Ramp Down*, sendo descritos nas subseções abaixo.

2.4.1 *Ramp Up*

Desenvolvido com a finalidade de elevar o campo de maneira correta, esse laço garante que o campo suba com precisão de 1 Oe, facilitando a aquisição de dados para amostras com baixa coercividade; além disso, para garantir a qualidade da medida, esse laço conta com uma realimentação de informação, necessitando-se então que o *lock-in* faça a leitura de seu controlador da fonte de alimentação para que, ao subir o campo, ocorra uma realimentação coerente sem

violam o estado magnético da amostra.

Passos executados pelo laço *Ramp Up*:

- i. Lê-se o valor de tensão do controlador da fonte de alimentação.
- ii. Eleva-se o campo magnético.
- iii. Aguarda x segundos até o sistema entrar em equilíbrio.
- iv. Realiza aquisições de magnetização e campo magnético.

Após tais passos serem realizados, dá-se início ao laço *Ramp Down*.

2.4.2 *Ramp Down*

Pode-se definir essa rotina como o coração do programa pois possui a finalidade de reduzir o campo; porém, tal processo deve ser o mais cuidadoso e adequado o possível, pois no final do laço *Ramp Down* se executam as aquisições de remanência magnética. Para garantir a eficiência são necessários alguns parâmetros adicionais, sendo que o processo *Ramp Down* verifica o campo a cada passo, ou seja, executa leitura de campo magnético a cada laço. Para isso foi necessário a introdução de dois passos, rápido e lento, devido a demora do processo. Também foi necessário definir um instante para que essa troca aconteça.

Para melhor visualizar os passos seguidos pelo laço *Ramp Down*, abaixo se encontra a rotina esquematizada passo a passo, sendo tais ciclos observados na figura 12. As citações em negrito que seguem abaixo se referem a parâmetros de entrada para os laços.

- I (a) O primeiro passo da rotina consiste em inicializar os instrumentos, tornando possível sua utilização dentro do laço; além disso, o laço recebe o valor de [**campo magnético**] informado pela execução prévia da rotina *Ramp Up*, sendo tal laço observado na região I_A , podendo ser identificado na cor cinza.
- (b) Adentra-se agora no domínio do laço I_B , que executa maior parte das tarefas do sistema; pode-se observar que muitos parâmetros importantes para a medida são carregados para dentro desse. Tal laço tem como objetivo retornar ao valor de campo magnético próximo ao [**campo exchange bias**], sendo as estruturas definidas entre colchetes e negrito os parâmetros necessários para medidas. Porém, qual a precisão no retorno? Defini-se então o [**passo menor**], o qual será responsável por um retorno seguro até

as proximidades do valor de **[EB]**. Infelizmente, o retorno com um **[passo menor]** que assegura uma boa medida torná-se muito demorado. Foi preciso então definir uma região onde torna-se importante um retorno lento; define-se então **[passo +]** e **[passo -]**; na região que contém tais passos, usa-se o **[passo menor]**, e para o restante usa-se o **[passo-maior]**. Portanto, usa-se passos reduzidos em regiões entre **[campo eb - passo +]** e **[campo eb - passo -]**. Tais **[passos]** e **[campos]** são definidos em oersted, facilitando a utilização do programa. Tendo definido os parâmetros utilizados, torna-se possível entender a dinâmica do laço.

- i. Lê-se o valor de campo magnético ao iniciar o laço, sendo esse valor de suma importância para as operações lógicas consequentes.
 - ii. Tal estrutura lógica verifica se estamos além ou aquém do valor de **[EB]**, possibilitando a aproximação do valor, não importando o sentido do campo. Além disso, através dessa comparação, pode-se verificar se o valor do campo adquirido **[CA]** logo no início do laço é suficiente para satisfazer o critério de parada que será definido nos laços internos.
 - iii. Nesse ponto se define o passo a ser acrescentado, **[passo maior]** ou **[passo menor]**, dependendo do valor obtido em **(i)**.
 - iv. Aqui encontra-se o critério de parada; se satisfeito o laço, se encerra e se realiza a aquisição dos dados de magnetização remanente.
- II (a) Sendo o responsável pela parada, esse laço fará a seguinte pergunta para os valores: $[CA] - [\text{passo menor}] \leq [\text{campo EB}] \leq CA + [\text{passo menor}]?$ Caso tal condição seja satisfeita, o laço se encerra.
- (b) Consiste em um laço-condicional; baseado no valor de campo magnético, acrescentará ou subtrairá o passo.
- III De mesma forma ao anterior, esse laço-condicional; irá escolher o passo a ser utilizado seja ele **[passo menor]** ou **[passo maior]**. Além disso, dentro do laço se encontra o controlador da fonte de alimentação do sistema, o qual irá informar o campo necessário.

Após terminados ambos os laços, adquirimos dados para traçar as curvas. Em média, a rotina completa, contendo uma desmagnetização AC ou DC, e as curvas M_{r+} , M_{d+} , M_{r-} e M_{d-} , leva em torno de 8 a 12 horas para ser concretizada, dependendo do passo de retorno escolhido.

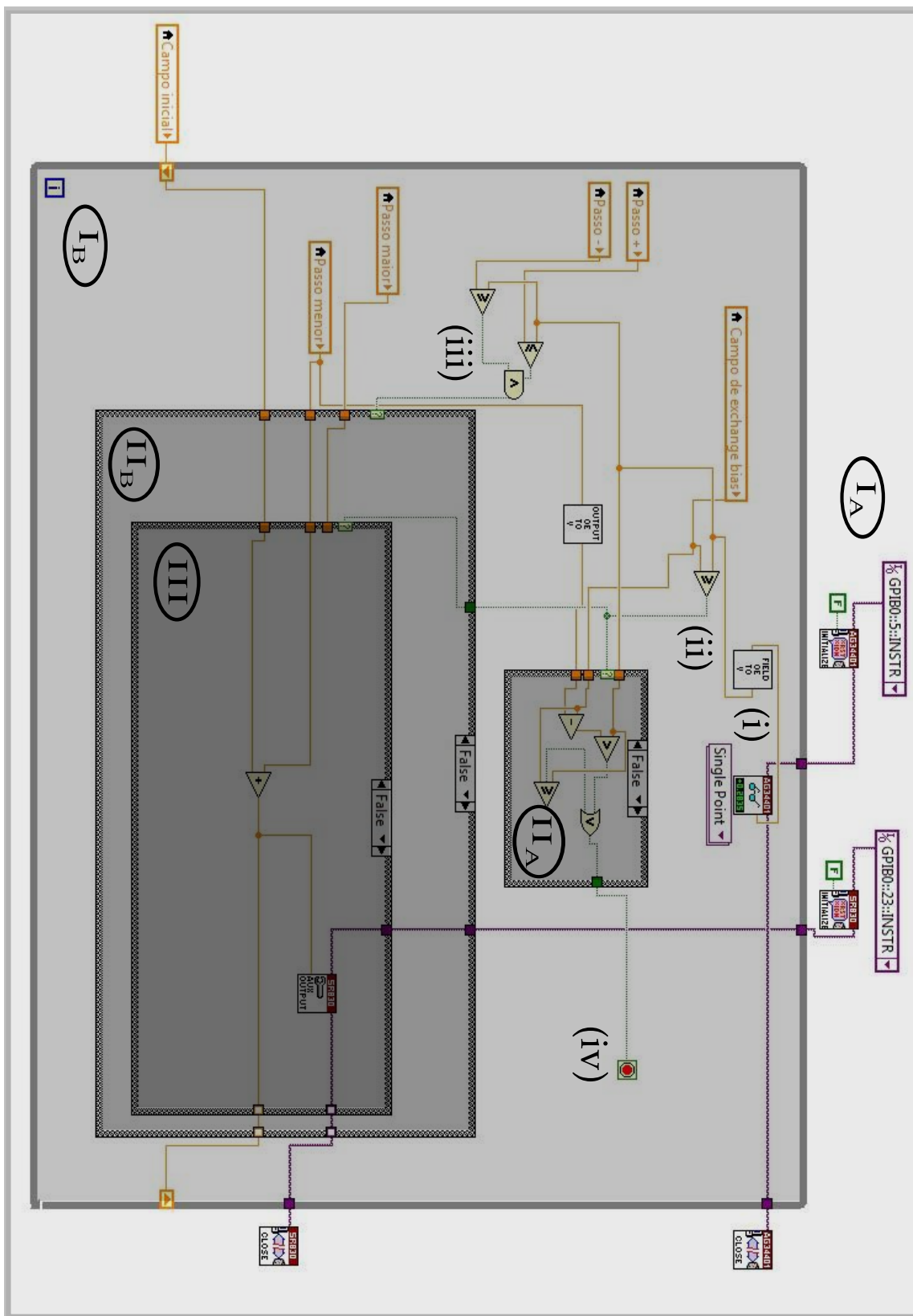


Figura 13: As diferentes cores acima representam os diferentes níveis do laço, sendo necessário cumprir todas as tarefas de um laço para inicializar um laço mais interno.

3 *Resultados e discussões*

Definida a técnica agora se iniciam os processos de aplicação; basicamente foram utilizados dois diferentes sistemas para testar e explorar os resultados obtidos pela nova rotina. O primeiro sistema utilizado é composto de IrMn e NiCu, onde IrMn é o material AFM, e NiCu é o material FM. Tal sistema não apresenta deslocamento em campo; nesse caso a interação FM/AFM promove um aumento na coercividade; além disso, seu laço de histerese é simétrico, possibilitando testar a primeira parte da rotina de maneira extensiva. O segundo sistema escolhido apresenta EB, consistindo em amostras de IrMn, Cu e Co, sendo Co o material FM e Cu funcionando como espaçador entre FM e AFM, com a finalidade de diminuir a interação de troca em função do aumento da espessura de Cu. Tal escolha foi realizada pois este sistema foi vastamente estudado em trabalhos anteriores no próprio LAM. Os sistemas supracitados compõem uma série de amostras depositadas através da técnica de sputtering,²⁰ também conhecida como desbasta-mento iônico, disponível no Instituto de Física da UFRGS. Abaixo segue uma breve descrição sobre os sistemas estudados.

- i. Deposita-se sob Si uma camada semente de Ta, com o intuito de favorecer a textura cristalina (111), devido ao fato de que nesta orientação o IrMn torna-se um bom material AFM. Após depositada a semente, se inicia a deposição do filme fino sendo este formado por IrMn (7 nm)/NiCu (30 nm); além disso uma camada protetora de Cu, com intuito de evitar a oxidação, é depositado por ultimo.
- ii. Contendo a mesma semente do sistema i, deposita-se IrMn (7 nm)/Cu(x nm)/Co(5 nm), onde x varia entre 0 e 3,00 nm.

Baseados nas teorias definidas anteriormente, podemos agora definir se a interação é magnetizante ou desmagnetizante. Uma interação é dita magnetizante quando o sistema apresenta gráficos de remanência acima das retas teóricas, e desmagnetizante quando estão abaixo. Ambas as curvas teóricas estarão tracejadas em preto nos gráficos em formato de gráfico Henkel, facilitando a detecção do tipo de interação presente. Pouco sabemos sobre as interações presentes

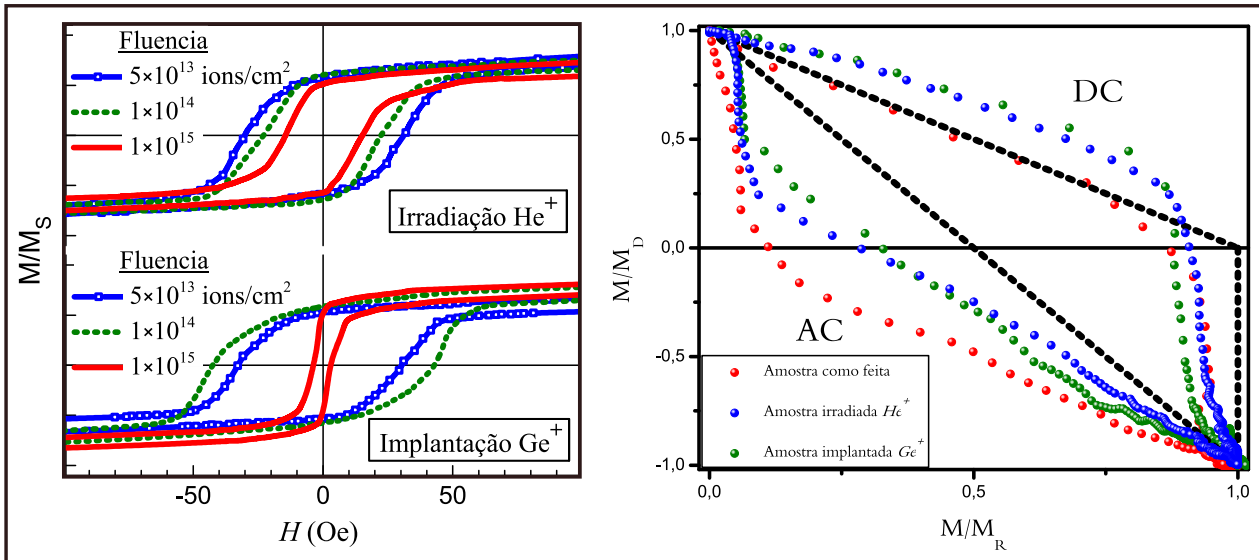


Figura 14: A esquerda observa-se os laços de histerese e a influencia da irradiação iônica sob a amostra, já a direita é possível observar alguns gráficos de Henkel realizados sob as amostras que apresentaram maior coercividade.

na amostra; espera-se que interações magnetizantes sejam causadas por interações de troca de grande magnitude, e interações desmagnetizantes sejam manifestações de interações dipolares (anisotropia magneto-estática).

3.1 Sistema IrMn/NiCu

Como citado acima, tal sistema não apresenta deslocamento em campo, mas essas amostras serviram como passo inicial do trabalho, sendo este sistema estudado pois apresenta a seguinte peculiaridade: $T_C < T_N$, o que implica na dificuldade de ativar o efeito de EB através de tratamentos térmicos. Logo se partiu para a irradiação iônica, com campo magnético presente a temperatura ambiente visando induzir o eixo de fácil magnetização e utilizando um fluências de 5×10^{13} e 1×10^{15} íons/cm²; utilizou-se dois diferentes tipos de íons, He⁺ e Ge⁺.

O primeiro passo consiste em obter os laços de histerese das amostras, visando encontrar os efeitos mais interessantes provocados pela irradiação iônica, como se pode observar na figura 20. No nosso caso, as medidas mais interessantes e também de mais fácil aquisição são as medidas com maior coercividade H_c , obtidas para a irradiação de He⁺ representada pela fluência de 5×10^{13} ions/cm², e para a implantação de Ge⁺, a fluência de 1×10^{14} ions/cm². Escolhidos os sistemas, basta aplicar a rotina simples utilizando apenas as curvas M_{r+} e M_{d+} .

Tendo como foco as curvas DC, o primeiro passo consiste em analisar os dados da amostra como-feita (representada na figura 20 pelos pontos em vermelho) pois devido a ela se podem ob-

servar os efeitos da irradiação sob o sistema. Percebe-se que boa parte a curva está praticamente sob a curva teórica; ou seja, não há interação ou o efeito da soma das interações é nula; entretanto, conforme mais momentos são ativados devido ao aumento do campo magnético, nota-se que a curva deixa a reta teórica e cai antes do esperado, caracterizando uma interação desmagnetizante. Já para as curvas referentes às amostras que sofreram bombardeamento iônico, nota-se que mesmo no início das curvas, ambas divergem da curva teórica; pode-se então intuir que a irradiação iônica favoreceu o aparecimento de determinada interação tornando seu comportamento magnetizante, frente ao observado na amostra como feita; também pode ser abstraído que a amostra implantada com Ge^+ apresenta um queda mais abrupta que as demais, o que possivelmente pode ter ocorrido devido a presença de Ge no NiCu. Já analisando as curvas AC, percebemos que a amostra como feita diverge bastante da curva teórica demonstrando claramente um comportamento desmagnetizante, sendo que tal informação difere bastante da obtida para a amostra através da desmagnetização DC. Ainda não se sabe quais mecanismos provocam tal divergência, apenas se sabe que possuem diferentes histórias magnéticas, e que a desmagnetização AC tende a desmagnetizar o sistema de forma mais igualitária, sem dar preferência a grãos mais moles como é o caso da DC; porém, tal divergência também se repete para as amostras irradiada. Além disso, como no caso DC, ambas contém interação menos desmagnetizante em relação a amostra como feita. A origem de tal discrepância ainda permanece desconhecida, mas existem indícios de que a desmagnetização AC para filmes finos seja inviável, sendo que o estado desmagnetizado não representa verdadeiramente uma desmagnetização AC e sim uma desmagnetização semi-aleatória, que apresenta $M_r = 0$ mas não contém momentos aleatoriamente distribuídos em função do campo. Também vale ressaltar que, para desmagnetizações DC, existe uma região de troca de interação, sendo inicialmente magnetizante e logo após desmagnetizante. Para o caso AC, o intervalo onde a interação é magnetizante é muito pequeno, resumindo-se aos primeiros pontos da curva, que logo após apresenta interação desmagnetizante dominante.

3.2 Sistema IrMn/Cu/Co

Partindo definitivamente para um sistema que apresenta EB, como previamente dito optou-se pelo uso de um sistema o qual conhecemos bem, ou seja como o Cu interfere ou limita a interação de troca. Sabe-se que, aumentando a espessura de Cu, diminui-se a interação FM/AFM, ou seja, ocorre um decréscimo na área de interação FM/AFM a ponto de que tal contato cesse quando a espessura de Cu for suficiente para cobrir a camada FM; sabe-se que para as amostras utilizadas tal espessura está em torno de 1,25 – 1,5 nm. Outra peculiaridade é que a força da interação

decai exponencialmente conforme se aumenta a espessura, sendo proporcional a $C \times \exp(1/t)$ onde t é a espessura de Cu, e C é uma constante que varia conforme o material utilizado. Para melhor visualizar as informações, foram escolhidos três sistemas julgados pela importância fundamental para compreensão do trabalho; são eles

- i. IrMn/Co, não contendo Cu, obteremos o valor máximo de EB.
- ii. IrMn/Cu (0,75 nm)/Co, contendo um espaçador intermediário. Observa-se como o decréscimo da interação FM/AFM pode influenciar o comportamento da magnetização remanente.
- iii. IrMn/Cu (1,50 nm)/Co, utilizando um espaçador suficientemente espesso, a ponto de não detectarmos o EB através de curvas de histerese.

Para sistemas com EB, precisa-se levar em conta as combinações das curvas M_{r+} com M_{d+} e M_{d-} , e M_{r-} com M_{d+} e M_{d-} , obtendo assim dois pares de curvas para cada estado desmagnetizado M_r . Por consequência, utilizaremos a seguinte notação para identificar os gráficos: os gráficos Henkel serão chamados de HP_{++} , onde o primeiro símbolo se refere ao sentido da curva M_r e o segundo símbolo se refere ao sentido da curva M_d . Para o caso citado acima, HP_{++} , temos sua base constituída por M_{r+} e M_{d+} ; ainda para facilitar a visualização dos gráficos Henkel invertem-se as curvas com sinal – fazendo-as com que permaneçam no primeiro quadrante. Tal definição será válida para todos os gráficos que necessitam da combinação das curvas M_r e M_d , lembrando que as curvas estão definidas na seção anterior.

3.2.1 Sistema IrMn/Co

O presente sistema não apresenta espaçador, promovendo assim o contato direto entre os materiais FM e AFM; portanto, espera-se detectar a maior interação e também se espera que tal sistema apresente o maior deslocamento em campo da série, sendo apresentadas na figura 15 suas curvas de histerese e de remanência.

Analisando a curva de histerese, percebe-se claramente que a curva está deslocada frente ao campo, apresentando 215 Oe de deslocamento, sendo tal valor em campo definido como a nova origem do sistema. Também se percebe uma leve assimetria na curva de histerese, provocada pela presença do AFM.

Observando o conjunto de gráficos de Henkel obtidos através da técnica, facilmente se nota que a curva verde apresenta um comportamento completamente desmagnetizante. A curva em

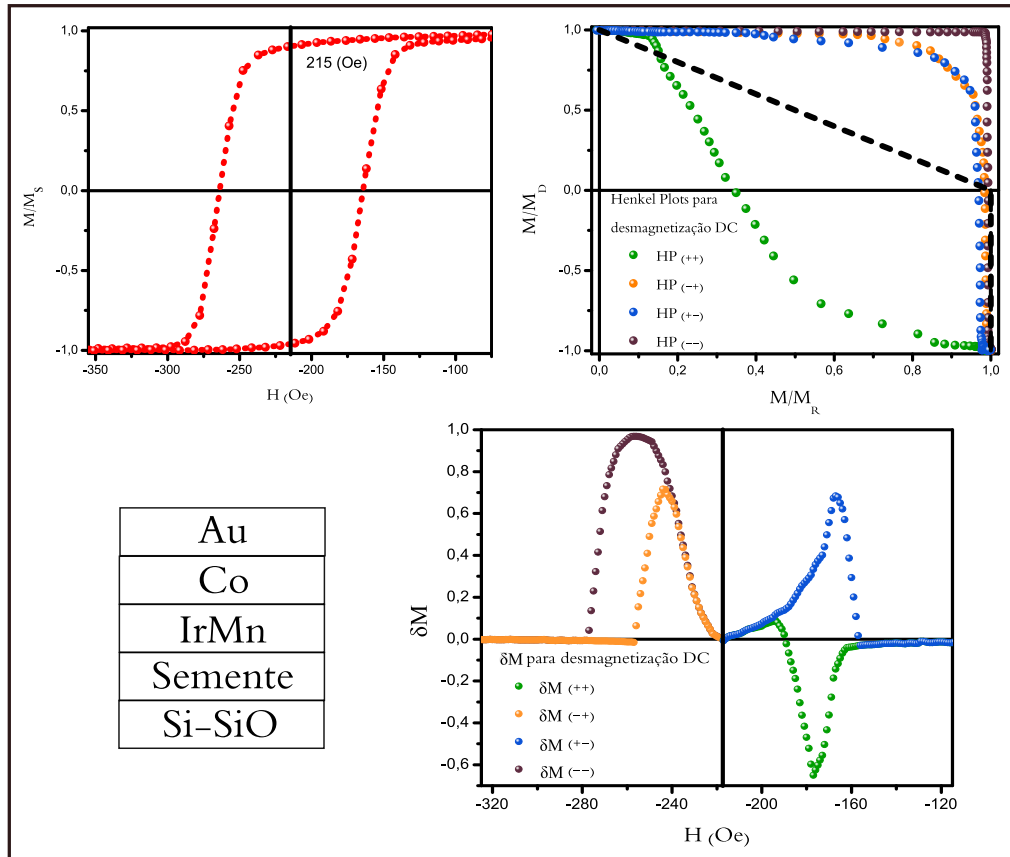


Figura 15: A esquerda observa-se os laços de histerese e a composição da amostra, já a direita na parte superior temos os gráficos de Henkel e abaixo encontramos os δM s, referente a amostra IrMn/Cu (0.0 nm)/Co.

marrom se opõe a esta e apresenta um comportamento magnetizante; tais curvas são oriundas da combinação dos diferentes sentidos de aplicação do campo, sendo seus resultados não muito claros, e ainda não se sabe como ou se é possível interpretá-las pois através delas observa-se diferentes regiões de reversão de magnetização. Já para os casos ++ e --, nota-se que a interação é bem semelhante comprovando que apesar das direções do campo de medida serem diferentes, a interação predominante é praticamente a mesma, mostrando que os mecanismos de reversão de magnetização não dependem do sentido do campo.

Podemos visualizar o processo de reversão da magnetização em função do campo utilizando os gráficos de δM . O processo para a construção destes gráficos foi definido na seção de revisão teórica. Os gráficos podem ser visualizados na parte inferior da figura 15, e pode-se concluir que os gráficos +- e -+, apresentam interação desmagnetizante e magnetizante respectivamente; já para os gráficos que devem oferecer uma representação mais física do sistema, ++ e --, se pode visualizar mais facilmente o processo de reversão em diferentes direções. Observando o gráfico em azul nota-se que sua reversão é mais suave do que a reversão do gráfico em laranja, ou seja, é necessário campo mais forte para tornar a reversão possível no sentido positivo de campo,

e para a curva em laranja se observa que a reversão é mais abrupta. Possivelmente, podemos estimar a área sob ambas as curvas e relaciona-la com o torque sofrido devido a interação de troca; portanto, partindo do estado desmagnetizado, encontramos mais dificuldade em reverter a magnetização para o sentido positivo do que para o negativo. Tal assimetria é causada pelo interação de troca.

3.2.2 Sistema IrMn/Cu (0,75 nm)/Co

Dando continuidade à análise da influência do espaçador de Cu, parte-se para um espaçador intermediário, sendo este espesso o suficiente para diminuir a interação mas ainda apresentando "buracos" devido a baixa eficiência de preenchimento para baixas dimensões da técnica de *sputtering*. Tais buracos promovem o contato entre FM e AFM mantendo a interação de EB, mas diminuindo sua intensidade.

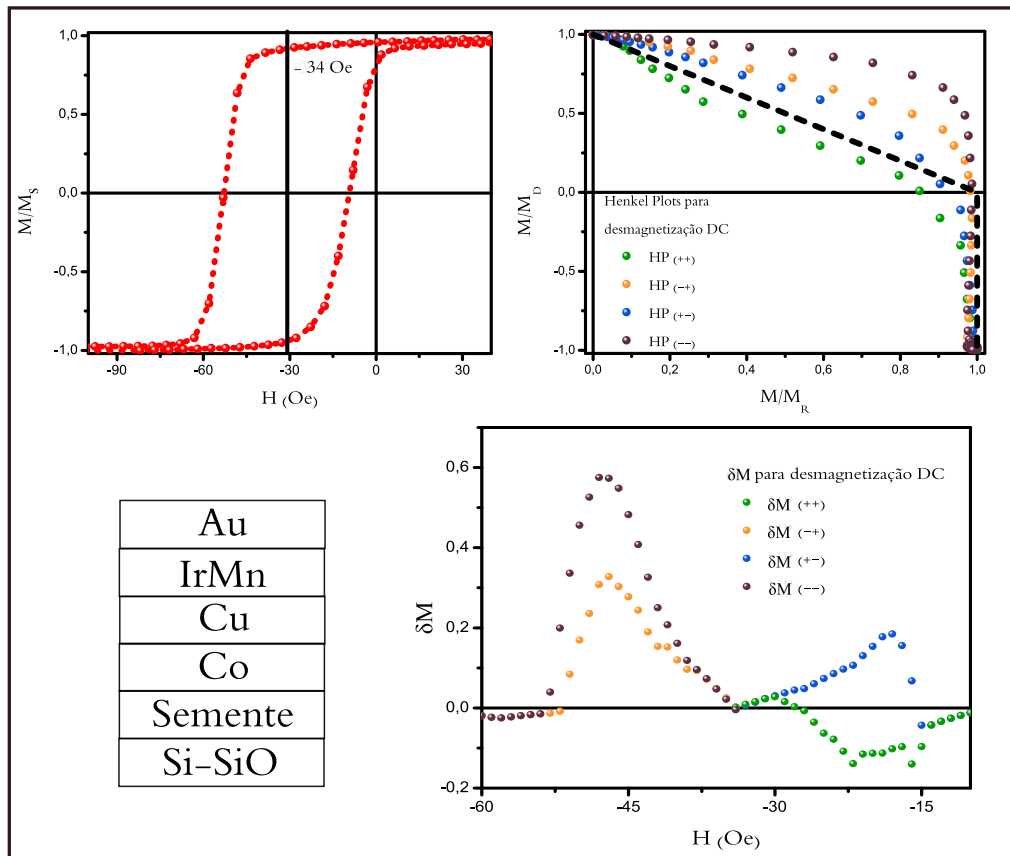


Figura 16: A esquerda observa-se os laços de histerese e a composição da amostra, já a direita na parte superior temos os gráficos de Henkel e abaixo encontramos os δM s, referente a amostra IrMn/Cu (0.75 nm)/Co.

Pode-se agora analisar os gráficos de Henkel obtidos para essa amostra na figura 16 ao lado direito. Percebe-se a mesma simetria anterior: as curvas +- e -+ com suas interações

magnetizante e desmagnetizante, e as curvas ++ e --, agora apresentando certa assimetria se comparado com o caso onde não existia espaçador de Cu. Possivelmente, tal diferença pode ter ocorrido devido aos "buracos" na camada de Cu dando preferência para alguma direção. Além disso, nota-se que a interação se torna menos magnetizante comparado com o caso anterior, mostrando que algo realmente está acontecendo com as interações ao se cobrir a interface FM/AFM. Utilizando os gráficos de δM , observamos que a reversão da magnetização para os casos +- e -+, em relação a amostra anterior, apresenta uma maior simetria frente ao eixo de campo, ou seja, a reversão ocorre praticamente na mesma região de campo magnético, porém as amplitudes dos picos apresentam uma notável diferença. Como antes já foi dito, ainda não se pode compreender todos os resultados obtidos através da técnica, mas tal diferença de amplitude também é vista como a assimetria entre as curvas respectivas dos gráficos de Henkel.

3.2.3 Sistema IrMn/Cu (1,50 nm)/Co

Para finalizar a amostragem de sistemas individuais, foi utilizado um sistema onde a camada de cobre deve ser o suficientemente espessa para cobrir todo o material FM, limitando assim a interação de troca. Percebe-se claramente, olhando a histerese da figura 17, que tal amostra não apresenta deslocamento em campo, porém, como dito previamente, "uma das manifestações do EB consiste no deslocamento da curva de histerese". Neste ponto poderemos averiguar se realmente o acoplamento de troca desaparece através de outra abordagem.

Essa afirmação não explica e nem mesmo aponta, o fato de que após as camadas FM/AFM estejam sem contato, qual será a influência da camada AFM sobre a FM. A amostra em questão trás atona essa pergunta, pois como pode ser observado nos gráficos de Henkel, nota-se que as interações atuantes são semelhantes aos casos anteriores. Para o caso dos gráficos de δM , também notamos comportamentos semelhantes aos mostrados acima, sendo coerente pensar que as interações mostradas pelos gráficos se devem a interações magnetizantes dentro do próprio FM, sendo que o efeito de EB favorece o deslocamento em campo. Baseado no presente conhecimento teórico, ainda não podemos responder a pergunta do paragrafo anterior, porém podemos avançar nos seguintes aspectos:

- a. Ainda não comparamos os diferentes resultados entre as curvas M_{r+} e M_{r-} .
- b. Também não se deu atenção para as curvas M_{d+} e M_{d-} .

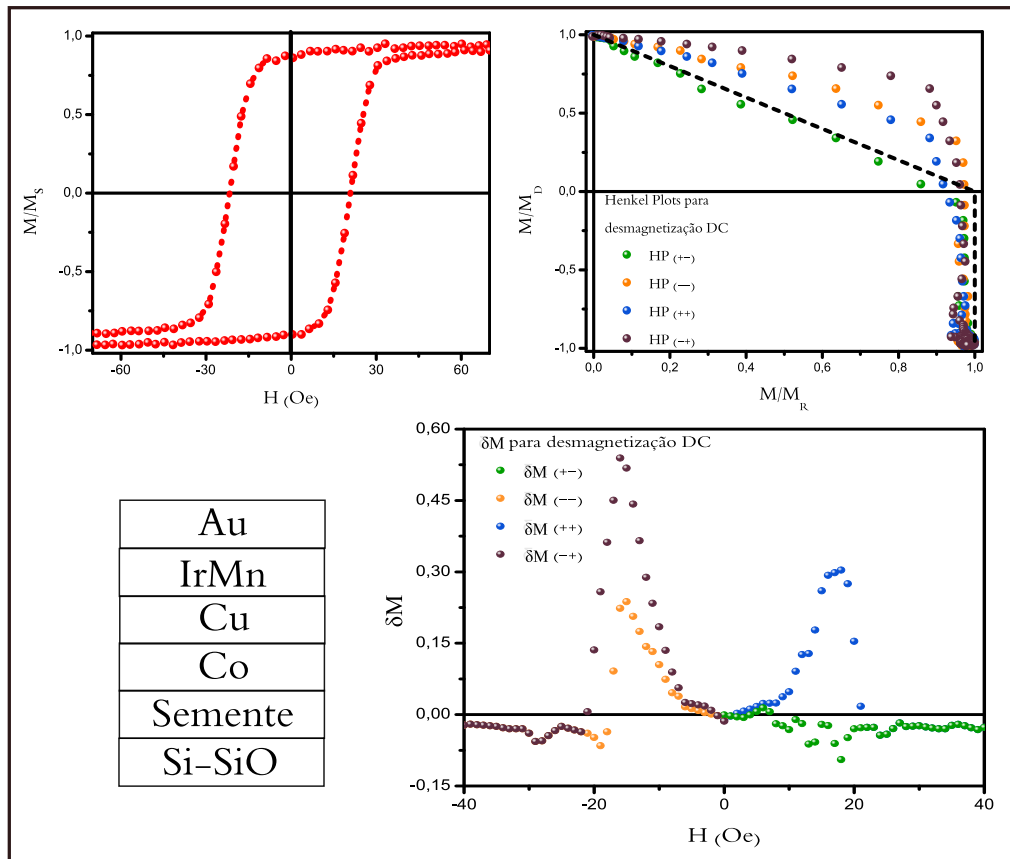


Figura 17: A esquerda observa-se os laços de histerese e a estrutura da amostra, já a direita na parte superior temos os gráficos de Henkel e abaixo encontramos os δM s, referente a amostra IrMn/Cu (1.50 nm)/Co.

3.2.4 Novas abordagens

Aproveitando as medidas realizadas, agora podemos definir dois novos gráficos através do arranjo das curvas M_r e M_d , sendo tais operações enunciadas abaixo.

i. $\Delta M_r(H) = M_{r-} - M_{r+}$.

ii. $\Delta M_d(H) = M_{d-} - M_{d+}$.

Realizando as operações definidas acima, pode-se visualizar e analisar os gráficos obtidos através do novo equacionamento.

Através dos gráficos da figura 18 podemos notar o papel do efeito de EB. Percebe-se claramente que, ao se diminuir o espaçador de Cu, existe uma redução significativa da área sob a curva. Tal efeito possivelmente ocorre devido a dificuldade de reversão da magnetização provocado pela existência da interação FM/AFM. Também é possível, notar para curvas ΔM_d , que o seu pico está localizado sob o ponto H_{c1} ; além disso, a largura do pico equivale a H_c

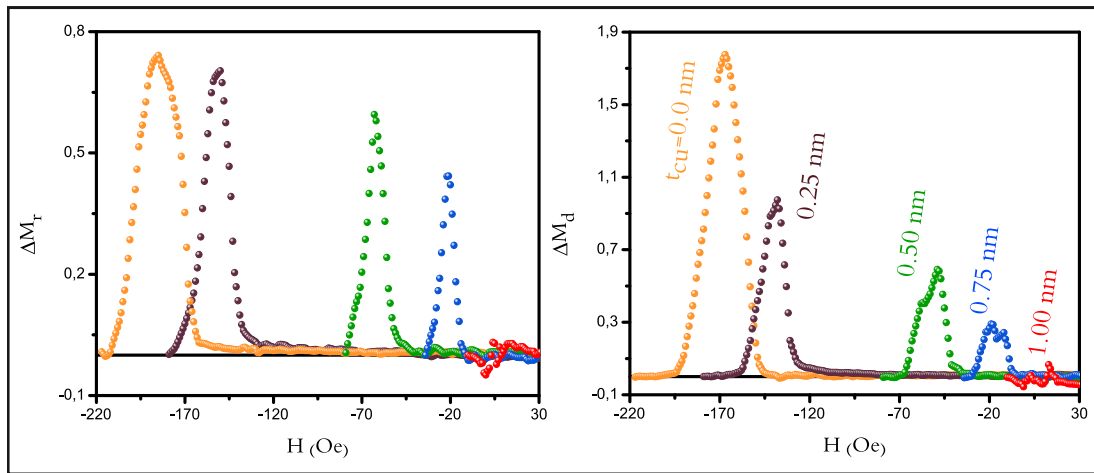


Figura 18: A esquerda temos a comparação entre as curvas ΔM_r , já a direita a comparação entre as curvas ΔM_d .

da amostra respectiva. Infelizmente, o número de amostras é insuficiente para se realizar uma boa estatística e verificar se existe alguma relação entre a área sob as curvas ΔM_r e ΔM_d e a constante de decaimento de EB, $C \times \exp(1/t)$.

3.2.5 Englobando dados da série IrMn/Cu/Co

Para visualizar a evolução da série, pode-se construir os gráficos de δM e observar a evolução em função dos espaçador. Analisando a figura 19 podemos notar que, em ambos os gráficos, as curvas referentes aos maiores deslocamentos apresentam maior amplitude e maior largura da base frente a evolução do espaçador, sendo que os únicos pontos que fogem a está regra são referentes a espaçadores maiores.

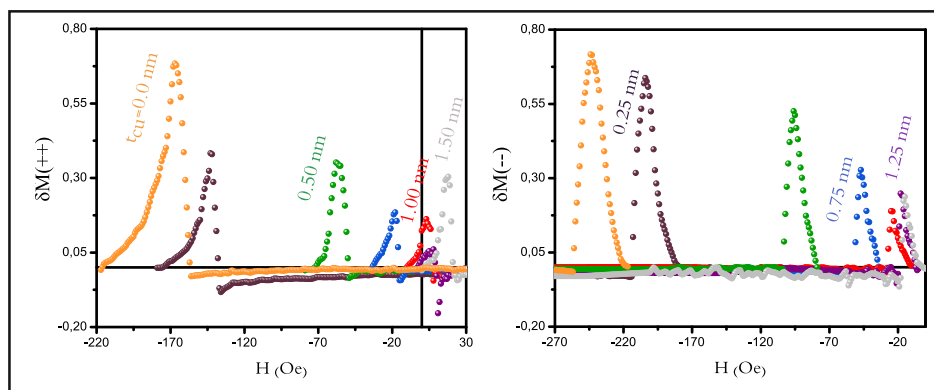


Figura 19: A esquerda podemos observar os δM_{++} ; já a direita os δM_{--} .

4 *Perspectivas*

4.1 Próximos passos

Tratando-se de uma adaptação inovadora, não se encontram disponíveis na literatura informações suficientes para à análise e compreensão dos dados obtidos; apenas estão disponíveis dados referentes a sistemas simples e que não apresentam deslocamento em campo. O próximo passo consiste no desenvolvimento de um recurso computacional com a finalidade de ajustar as curvas experimentais e compreender as interações por trás das amostras utilizadas. O programa utiliza a equação de Landau-Lifshits-Gilbert (LLG), com o propósito de encontrar o estado de equilíbrio de um determinado estado de sítios magnéticos, sendo a LLG descrita abaixo.

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\frac{\gamma}{1 + \alpha^2} (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{ef}) - \frac{\gamma\alpha}{(1 + \alpha^2)M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{ef}). \quad (4.1)$$

Com o objetivo de criar um software robusto e eficaz, inúmeros testes foram utilizados realizando computação convencional, ou seja, executando cálculos no processador. Os resultados obtidos foram insatisfatórios visto o tempo de execução frente ao uso de um sistema com grande número de sítios magnéticos. Foi necessário então migrar para a computação em paralelo utilizando unidades gráficas de processamento (GPU), aonde se torna possível utilizar sistemas de grande dimensionalidade para tempos de simulação relativamente pequenos.

Tal recurso computacional nos possibilitará melhor compreensão, além de tornar possível expandir a técnica a diferentes sistemas, tais como:

- i. Sistemas que possuem IrMn/Cr/Co, aonde encontra-se uma oscilação no valor de EB devido a presença do Cr, o qual possui propriedades de ser um material AFM de baixa interação.
- ii. Sistemas que possuem IrMn/(Fe ou Py)/Co; tal sistema apresenta a peculiaridade de que, para determinadas espessuras de Fe e Py, ocorre um aumento de EB, frente a amostra com

contato direto. Além disso, tais espaçadores não limitam a interação de EB, sendo que mesmo grandes espessuras possuem bom valor de campo de EB.

- iii. Aplicação em sistemas diversificados para exploração da técnica, tais como sistemas em forma de pó, ou sistemas de nanopartículas interagentes, buscando melhor compreender os efeitos das interações de troca e/ou dipolar.

Em suma, a implementação da técnica requer agora embasamento teórico, além de utilizar sistemas diferentes a procura de melhor entender suas propriedades magnéticas.

Como prévia do recurso computacional o qual está sendo aprimorado, segue abaixo um simulação realizada para as amostras do sistema IrMn/Cu/Co, indicando que estamos no caminho certo para o entendimento das interações por trás da reversão da magnetização.

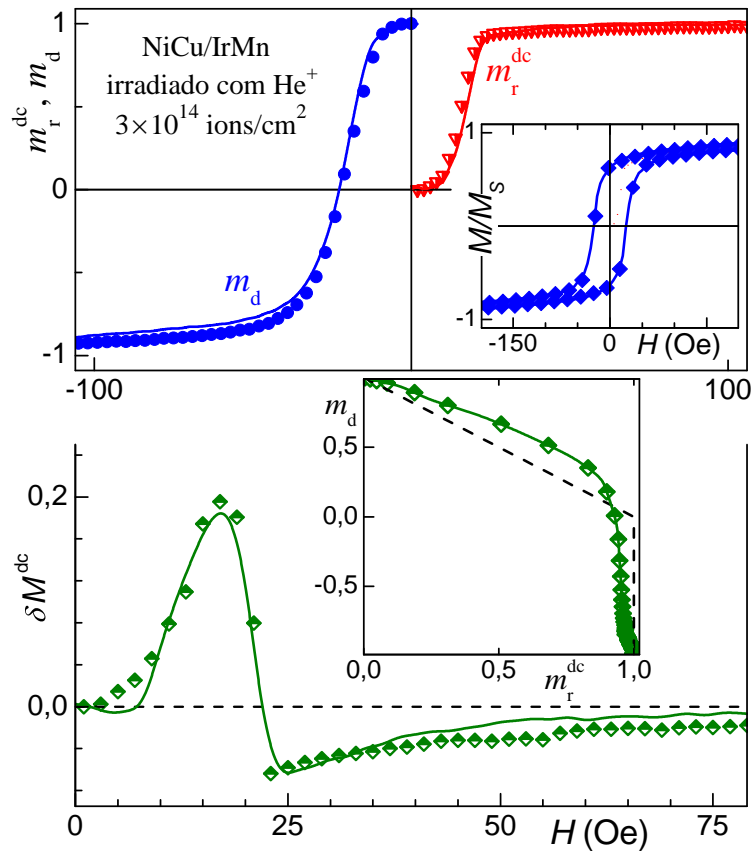


Figura 20: Segue uma demonstração do uso do software computacional em desenvolvimento, onde as curvas de histerese, M_r , M_d , os gráficos de Henkel e δM são reproduzidos.

Referências

- [1] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, “New magnetic anisotropy,” *Physical Review*, vol. 102, no. 5, p. 1413, 1956.
- [2] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, “New magnetic anisotropy,” *Physical Review*, vol. 105, p. 904, Fevereiro 1957.
- [3] M. Takahashi, A. Yanai, S. Taguchi, and T. Suzuki, “A study of exchange anisotropy in Co-CoO evaporated thin films,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 19, p. 1093, 1980.
- [4] R. Jungblut, R. Coehoorn, M. Johnson, J. aan de Stegge, and A. Reinders, “Orientational dependence of the exchange biasing in molecular-beam-epitaxy-grown Ni₈₀Fe₂₀/Fe₅₀Mn₅₀ bilayers,” *Journal of Applied Physics*, vol. 75, p. 6659, 1994.
- [5] S. Nicolodi, L. C. C. M. Nagamine, A. D. C. Viegas, J. E. Schmidt, L. G. Pereira, C. Deranlot, F. Petroff, and J. Geshev, “Copper spacer thickness dependence of the exchange bias in IrMn/Cu/Co ultrathin films,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 316, p. e97, 2007.
- [6] A. E. Berkowitz and J. H. Greiner, “Exchange anisotropy and strain interactions in the Ni-NiO system,” *Journal of Applied Physics*, vol. 36, p. 3330, 1965.
- [7] T. J. Moran, J. M. Gallego, and I. K. Schuller, “Increased exchange anisotropy due to disorder at permalloy/CoO interfaces,” *Journal of Applied Physics*, vol. 78, p. 1887, 1995.
- [8] N. March, P. Lambin, and F. Herman, “Cooperative magnetic-properties in single-phase and 2-phase 3d metallic alloys relevant to exchange and magnetocrystalline anisotropy,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 44, p. 1, 1984.
- [9] J. Kouvel, “A ferromagnetic-antiferromagnetic model for copper-manganese and related alloys,” *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 24, p. 795, 1963.
- [10] R. Cichelero, L. G. Pereira, T. Dias, J. E. Schmidt, C. Deranlot, F. Petroff, and J. Geshev, “Engineering double-shifted hysteresis loops in Co/IrMn/Cu/Co films,” *Applied Physics Letters*, vol. 95, p. 112501, Setembro 2009.
- [11] A. Harres, S. Nicolodi, L. G. Pereira, J. E. Schmidt, A. D. C. Viegas, and J. Geshev, “Effect of short-duration annealing on the exchange bias in IrMn/Co films,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 323, p. 2398, 2011.
- [12] J. Fassbender and J. McCord, “Magnetic patterning by means of ion irradiation and implantation,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008.

-
- [13] J. Fassbender, D. Ravelosona, and Y. Samson, "Tailoring magnetism by light-ion irradiation," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 37, p. R179, Novembro 2004.
- [14] D. Schafer, J. Geshev, S. Nicolodi, L. G. P. and J. E. Schmidt, and P. L. Grande, "Controlled rotation of the exchange-bias direction in IrMn/Cu/Co via ion irradiation," *Applied Physics Letters*, vol. 93, p. 042501, Julho 2008.
- [15] D. Schafer, P. L. Grande, L. G. Pereira, and J. Geshev, "Ion irradiation effects on the exchange bias in IrMn/Co films," *Journal of Applied Physics*, vol. 109, p. 023905, 2011.
- [16] E. P. Wohlfarth, "Relations between different modes of acquisition of the remanent magnetization of ferromagnetic particles," *Journal of Applied Physics*, vol. 29, p. 595, 1958.
- [17] P. Mayo, A. Bradbury, R. Chantrell, P. Kelly, H. Jones, and P. Bissell, "Interaction effects in the remanence curves of CoTi-WPED BaFe systems.," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 25, p. 3881, 1989.
- [18] P. J. Flanders, "An alternating-gradient magnetometer," *Journal of Applied Physics*, vol. 63, p. 3940, 1988.
- [19] B. D. Cullity, *Introduction to magnetic materials*. Menlo Park: Addison-Wesley Publishing Company, 1972.
- [20] D. M. Mattox, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. Westwood, New Jersey, USA: Noyes publications, 1998.