

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
BACHARELADO EM FÍSICA

Influência da direção do campo magnético aplicado durante o tratamento térmico em sistemas que apresentam *Exchange Bias*

Artur Harres de Oliveira

Monografia realizada sob orientação do Prof. Julian Penkov Geshev, e co-orientação de Sabrina Nicolodi de Oliveira, apresentada ao Instituto de Física da UFRGS em preenchimento parcial dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Física.

2008/02

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
2	CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	4
2.1	Ferromagnetismo e Antiferromagnetismo	4
2.2	Exchange Bias	5
3	TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	8
3.1	Magnetômetro de Gradiente de Campo Alternado (AGFM)	8
3.2	Forno	10
4	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	11
4.1	Amostras	11
4.2	Tratamentos Térmicos e Caracterização Magnética.....	13
5	CONCLUSÕES.....	26
	REFERÊNCIAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno de *Exchange Bias* [1-3] (EB) (em Português: viés de troca, ou polarização por intercâmbio) foi descoberto cerca de 50 anos atrás por Meiklejohn e Bean [1], e desde então foi observado em diversos sistemas. Este se tornou parte integral do Magnetismo moderno com implicações em pesquisa básica e desde 1996, aproximadamente, em inúmeras aplicações em dispositivos magneto-eletrônicos. Esta aplicabilidade promissora do fenômeno provocou um grande interesse no tema nas últimas décadas, resultando em mais de 600 publicações nos últimos cinco anos.

Neste trabalho, buscamos entender melhor o EB, caracterizando magneticamente amostras que apresentam o fenômeno. As amostras foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos, onde os parâmetros temperatura e orientação do campo magnético externo foram variados. Apresentaremos um estudo sistemático sobre a influência destes parâmetros no campo de EB (H_{EB}).

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo esta introdução o primeiro destes. No segundo Capítulo apresentaremos algumas considerações teóricas pertinentes para o desenvolvimento do trabalho, incluindo uma revisão sobre materiais ferromagnéticos e antiferromagnéticos. Depois o fenômeno de EB será brevemente discutido e um modelo intuitivo para explicá-lo será introduzido. Em seguida, no terceiro Capítulo, os equipamentos utilizados no tratamento e caracterização magnética das amostras serão descritos. Seus princípios de funcionamento, assim como sua montagem, serão abordados.

Os resultados dos tratamentos térmicos serão apresentados através das curvas de histerese obtidas com um magnetômetro de gradiente de campo alternado. Estes se encontram no Capítulo 4, juntamente com uma descrição das amostras utilizadas e uma explicação de todos os procedimentos experimentais realizados durante o desenvolvimento do trabalho.

Finalmente, o Capítulo 5 traz nossas conclusões sobre a influência dos parâmetros do tratamento térmico, temperatura e orientação do campo magnético, sobre o EB.

2 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

2.1 Ferromagnetismo e Antiferromagnetismo

Um material é dito ferromagnético [1] (FM) quando apresenta, abaixo de certa temperatura crítica, uma orientação espontânea paralela de seus spins adjacentes (Figura 2.1.1). Materiais deste tipo atingem a magnetização de saturação [5] (M_S) espontaneamente, ou seja, apresentam um momento magnético, mesmo na ausência de um campo externo. Entretanto, é difícil encontrar na natureza um pedaço de ferro, que é um material FM, magnetizado. Podemos explicar este fato assumindo que neste estado “desmagnetizado” o material FM é dividido em pequenas regiões chamadas domínios [6]. Cada um destes domínios apresenta magnetização de saturação, mas as direções de magnetização dos vários domínios estão dispostas de maneira que a magnetização total da amostra seja nula. Sendo assim, o processo de magnetização passa a ser o de converter um sistema com múltiplos domínios em um sistema com um único domínio magnetizado na mesma direção do campo aplicado.

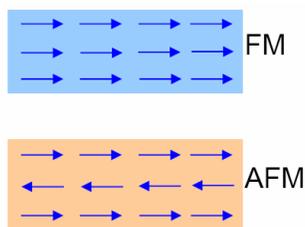


Figura 2.1.1: Representação ilustrativa dos arranjos FM e AFM [2].

A temperatura crítica acima de qual um material FM passa a se comportar como um material paramagnético é a chamada temperatura de Curie [5] (T_C). Acima de T_C , a magnetização de saturação tende a zero, pois o momento magnético efetivo é reduzido por efeito de excitação térmica.

Materiais antiferromagnéticos [5] (AFM) apresentam uma interação entre seus átomos vizinhos que tende a alinhar seus momentos magnéticos antiparalelamente (Figura 2.1.1). Esta interação faz com que o momento magnético total do sistema seja zero. Em outras palavras, a rede de íons magnéticos de um material AFM é dividida em duas sub-redes idênticas com momentos aproximadamente opostos. A 0 K o arranjo antiparalelo é perfeito. Em

contrapartida, acima de uma temperatura crítica, chamada de temperatura de Néel [5] (T_N), o material AFM torna-se paramagnético.

2.2 Exchange Bias

O fenômeno de EB foi observado pela primeira vez em 1956 por Meiklejohn e Bean [4], quando estes estavam estudando partículas de Co embebidas em seu óxido antiferromagnético CoO. Uma das manifestações mais conhecidas do EB é o deslocamento em campo do ciclo de histerese magnética de um material FM quando está em contato atômico com um material AFM. É um fenômeno associado à interação de troca na interface FM/AFM, sendo que o material AFM deve apresentar uma anisotropia muito mais forte que o FM. O EB pode ser induzido de três maneiras diferentes: por bombardeamento iônico [7], depositando filmes na presença de um campo magnético ou submetendo uma amostra a um tratamento térmico, também na presença de um campo magnético. Neste trabalho foram utilizados tratamentos térmicos para induzir o efeito; estes serão discutidos em detalhe na Seção 4.2.

Diversos sistemas contendo uma interface FM/AFM apresentam EB. Entre eles podemos citar pequenas partículas, bicamadas de material FM e AFM na forma de filmes finos [1]. Este último tem sido o sistema mais estudado, pois os parâmetros de sua interface podem ser controlados e caracterizados eficientemente. Além disso, a maioria das aplicações de materiais com EB em dispositivos é feita na forma de filmes finos. Estas aplicações são diversas. Entre elas podemos citar: estabilizadores de domínio em cabeçotes de gravação baseados em magnetoresistência anisotrópica e ímãs permanentes [1].

O fenômeno de EB pode ser entendido qualitativamente através de um modelo intuitivo que assume uma interação de troca na interface AFM/FM. Imagine uma amostra que contenha tal interface e que esteja a uma temperatura T , onde $T_N < T < T_C$. Aplicando um campo magnético externo a esta amostra, os spins da camada FM tenderão a se alinhar com tal campo, enquanto os spins na camada AFM permanecerão orientados aleatoriamente [Figura 2.2.1(a)]. Quando resfriamos o sistema a uma temperatura $T < T_N$, ainda na presença do campo, os spins da camada AFM próximos à interface com a camada FM tendem a se alinhar ferromagneticamente com esta. As camadas subsequentes de spins do material AFM seguem uma determinada “ordem” de maneira que a magnetização total nesta camada seja nula [Figura 2.2.1(b)].

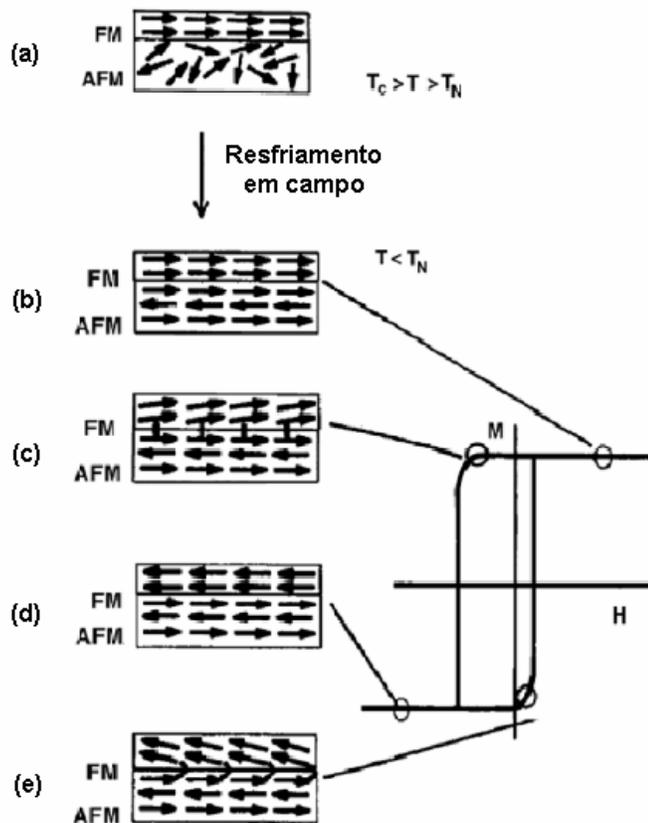


Figura 2.2.1: Diagrama esquemático da configuração de spins de uma bicamada FM/AFM [3].

Quando revertemos o sentido do campo, os spins da camada FM começam a girar, de maneira a se alinharem com este novo sentido. Entretanto, os spins da camada AFM permanecerão inalterados se esta camada apresentar uma anisotropia suficientemente grande. Então, a interação de troca na interface FM/AFM tentará manter os spins da camada FM ferromagneticamente alinhados com os da camada AFM. Em outras palavras, a camada AFM exercerá um torque nos spins da camada FM na tentativa de mantê-los em sua posição original [Figura 2.2.1(c)]. O que acontece, então, é que o campo necessário para reverter completamente a orientação dos spins da camada FM aumenta devido à presença da camada AFM. Por outro lado, quando o sentido do campo é novamente revertido, retornando a sua orientação original, os spins da camada FM começarão a girar em um campo menor, pela ação do torque exercido pela camada AFM [Figura 2.2.1(e)]. O sistema funciona como se houvesse um campo, H_{EB} , interno, gerando assim um desvio no ciclo de histerese. Para a grande maioria dos sistemas magnéticos que apresentam EB o ciclo de histerese é deslocado no

sentido contrário ao do campo magnético do tratamento. Isto é, se durante o resfriamento foi aplicado um campo no sentido positivo, o ciclo de histerese desloca-se para campos negativos. Uma curva de histerese típica de um sistema que apresenta EB pode ser vista na Figura 2.2.2, onde definimos

$$H_c = -\frac{H_C^1 - H_C^2}{2} \quad \text{e} \quad H_{EB} = \frac{H_C^1 + H_C^2}{2},$$

sendo H_c o campo coercivo.

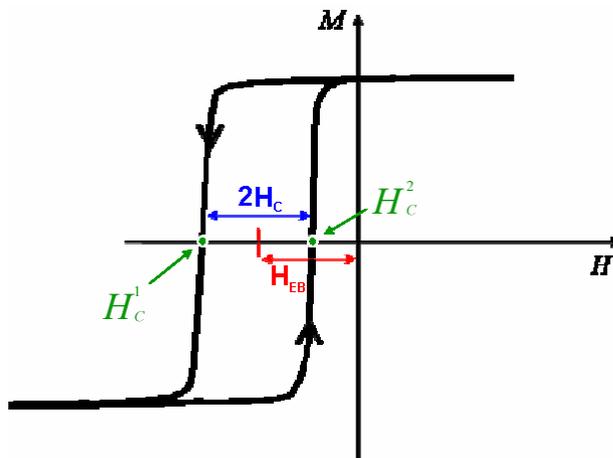


Figura 2.2.2: Curva de histerese típica de um sistema que apresenta EB [2].

Em sistemas com EB, existe uma temperatura crítica, para qual o efeito não é mais observado, chamada de temperatura de bloqueio (T_B), e em geral $T_B < T_N$. Na prática, é possível induzir o efeito de EB com temperaturas de tratamento da ordem de $T_C > T > T_B$, como é o caso do sistema IrMn/Co estudado neste trabalho.

3 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

3.1 Magnetômetro de Gradiente de Campo Alternado (AGFM)

O *Alternating Gradient Force Magnetometer* [8] (AGFM) é um dispositivo capaz de medir variações no momento magnético com alta sensibilidade, possibilitando medidas de magnetização em filmes com espessuras da ordem de 1 nm. Seu princípio de funcionamento baseia-se na força sofrida por um momento magnético quando submetido a um gradiente de campo magnético.

O equipamento é constituído basicamente por uma haste, uma cápsula que a protege, um eletroímã e pequenas bobinas de gradiente. A haste é formada por um tubo capilar de vidro. Em uma de suas extremidades encontra-se um pedaço retangular de vidro, que serve como porta-amostra, enquanto na outra temos um elemento de material piezoelétrico colado a um suporte plástico. Pequenos fios de cobre são soldados ao piezoelétrico e o conectam ao suporte plástico, onde se encontram coletores para a leitura do sinal elétrico.

A cápsula envolve a haste e serve para protegê-la contra choques mecânicos e interferências eletromagnéticas (ver Figura 3.1.1). Ela possui um conector de sinal, ligado aos coletores da haste, que será utilizado para transferir o sinal elétrico produzido pelo piezoelétrico até um amplificador *Lock-In*.

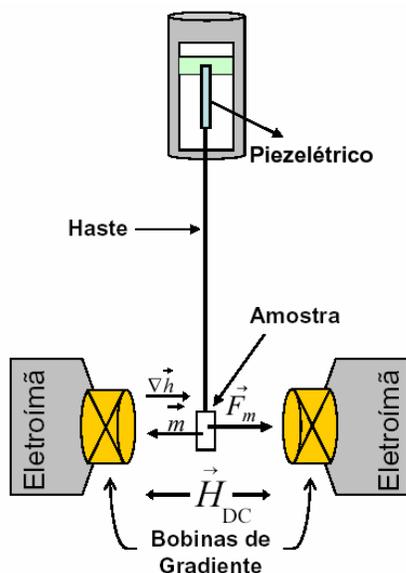


Figura 3.1.1: Esquema do AGFM [2].

A extremidade da haste, onde se encontra o porta-amostra, é colocada entre as bobinas de gradiente, que por sua vez estão entre os pólos do eletroímã. Este produz um campo DC responsável pela magnetização da amostra, que definiremos como H . As bobinas de gradiente produzem um campo magnético alternado, fazendo com que a amostra que ali se encontra sofra uma força \vec{F}_m .

$$\vec{F}_m = \vec{m}\nabla\vec{h}.$$

Tal força também é alternada e é proporcional ao momento magnético \vec{m} da amostra e ao gradiente de campo $\nabla\vec{h}$.

O gradiente de campo é usualmente aplicado na mesma frequência da ressonância mecânica do sistema (piezoelétrico, haste, porta-amostra e amostra), aumentando assim a amplitude de oscilação da haste. Conforme a haste oscila, ela gera torções no material piezoelétrico, que por sua vez cria uma diferença de potencial entre suas extremidades. Desta maneira somos capazes de transformar a oscilação da haste em um sinal elétrico proporcional a amplitude desta oscilação.

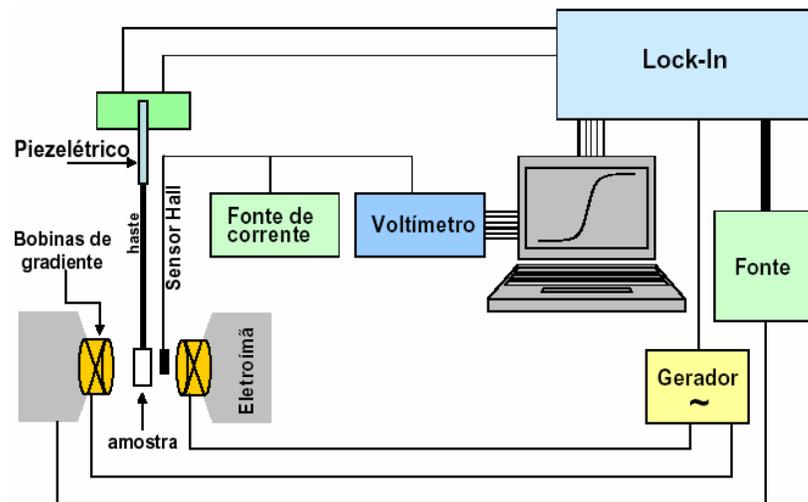


Figura 3.1.2: Diagrama de blocos e configuração do AGFM [2].

Quando trabalhamos na frequência de ressonância do sistema, a amplitude é proporcional à força F_m , que por sua vez depende da componente da magnetização da amostra na direção de H . Assim, variando-se o momento magnético, através do eletroímã, e monitorando o sinal elétrico, com ajuda de um *Lock-In*, obtemos a curva $M \times H$ da amostra,

ou seja, a curva de histerese magnética. A Figura 3.1.2 mostra um esquema do AGFM com todos os seus componentes.

3.2 Forno

Os diversos tratamentos térmicos realizados no decorrer deste trabalho foram feitos com ajuda de um forno. O equipamento é constituído basicamente de uma haste, que possui uma resistência elétrica em sua ponta, onde encontra-se um porta-amostra. A haste é envolvida por uma cápsula, isolando o sistema do ambiente. Um conjunto de duas bombas de vácuo, uma mecânica e outra difusora, garante que a pressão dentro do sistema mantenha-se baixa durante os tratamentos, evitando a oxidação das amostras.

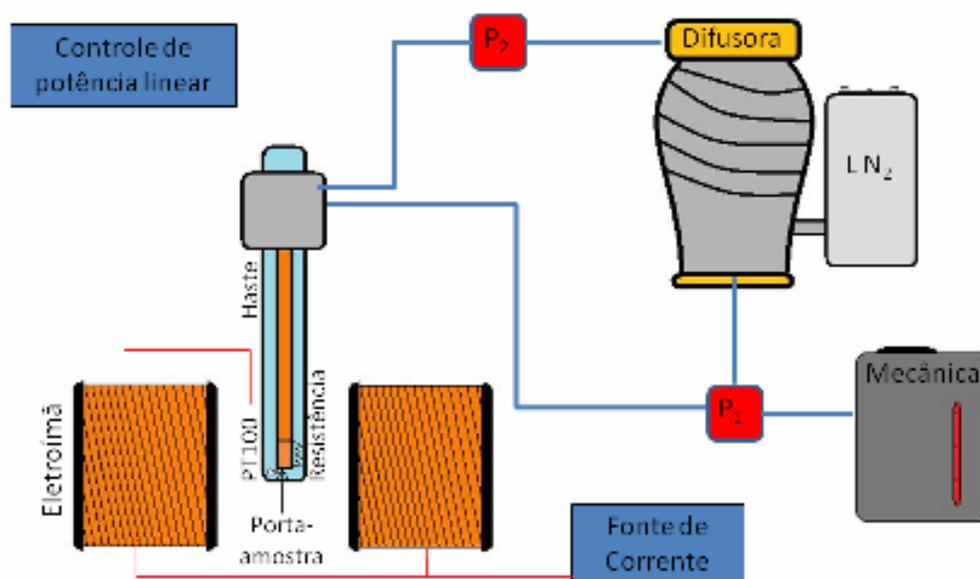


Figura 3.2.1: Diagrama de blocos e configuração do forno.

O sistema de vácuo é montado de maneira que a bomba mecânica possa bombear tanto a cápsula quanto a boca da bomba difusora, bastando para isso que uma chave seja ativada. A bomba difusora está ligada a um recipiente onde colocamos nitrogênio líquido, que será utilizado para resfriá-la. Para garantir que a bomba difusora não superaqueça também existe uma mangueira que atravessa o sistema e carrega água refrigerada. Para a otimização do vácuo, o sistema deve ser ligado na seguinte ordem: liga-se a bomba mecânica, fazendo com

que ela trabalhe diretamente na cápsula. Um medidor de pressão tipo Pirani (P_1 na Figura 3.2.1) conectado ao sistema nos permite monitorar a pressão dentro da cápsula. Assim que o medidor Pirani marcar uma pressão da ordem de 10^{-2} Torr, muda-se a chave para que a bomba mecânica atue sobre a difusora. Esta então é ligada, porém sua conexão com a cápsula permanece fechada. Depois é necessário que o recipiente conectado a bomba difusora seja preenchido com cerca de quatro litros de nitrogênio líquido. Mudamos novamente a chave para que a bomba mecânica faça um pré-vácuo na cápsula, para que possamos, enfim, abrir a válvula da difusora para o sistema. Agora podemos ligar o medidor tipo Penning (P_2 na Figura 3.2.1), que trabalha em uma faixa de pressão mais baixa que o de Pirani. Durante nossos tratamentos térmicos alcançamos pressões da ordem de 10^{-6} Torr.

Colocado próximo ao porta-amostra, existe um sensor de temperatura do tipo PT100 que conecta-se a um controlador de potência linear. Neste controlador somos capazes de programar a temperatura na qual desejamos realizar o tratamento térmico. O controlador então faz com que uma corrente elétrica percorra a resistência que existe na ponta da haste, fazendo com que o sistema se aqueça. Conforme a temperatura dentro do sistema varia, o sensor PT100 manda esta informação para o controlador de potência linear, que aumenta ou diminui a corrente na resistência de maneira a alcançar e manter a temperatura programada.

Para a realização de tratamentos térmicos na presença de um campo magnético externo, colocamos a haste com as amostras entre as bobinas de um eletroímã. Este é conectado a uma fonte de corrente, o que nos possibilita controlar o campo aplicado nas amostras variando a corrente que percorre as bobinas. Um gaussímetro é usado para monitorar este campo, que no nosso caso sempre estava em torno de 2 kOe.

4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

4.1 Amostras

Neste trabalho foram utilizados filmes finos de composição nominal Si(100)/Ru(15 nm)/IrMn(15 nm)/Cu(0,25 nm)/Co(5 nm)/Ru(3 nm), sendo a camada de IrMn a antiferromagnética e a de Co a ferromagnética. O silício serve como substrato, enquanto a primeira camada de Ru, de 15 nm, foi utilizada como semente (*buffer*). Esta camada

influencia na cristalinidade, na aderência e na rugosidade dos filmes, parâmetros importantes para o controle do EB. A camada de 3 nm de Ru, que cobre o filme, serve como proteção. A Figura 4.1.1 apresenta um esquema ilustrativo da amostra.

O sistema IrMn/Co foi escolhido por apresentar várias propriedades interessantes do ponto de vista tecnológico. Dentre elas estão boa resistência a corrosão, relativamente grande constante de anisotropia, alta temperatura de bloqueio e baixa espessura crítica do IrMn, ou seja, poucas camadas atômicas são suficientes para que o efeito de EB se manifeste.



Figura 4.1.1: Ilustração esquemática da amostra [2].

Os filmes foram depositados através da técnica de desbastamento iônico (*magnetron sputtering*). Esta técnica utiliza íons para desbastar um alvo composto de determinado material. Os fragmentos arrancados desta maneira são depositados em um substrato. Para isto o alvo e o substrato são colocados dentro de uma câmara que é esvaziada. A câmara é preenchida com um gás inerte, geralmente argônio, e aplica-se uma diferença de potencial entre o alvo e o substrato, ionizando o gás e criando um plasma. Este plasma é composto por elétrons e íons de alta energia que ao colidirem com o alvo arrancam seus átomos, fornecendo a eles energia suficiente para que sejam arremessados na direção do substrato, formando o filme. Para aumentar a eficiência do processo, utilizam-se certas configurações de ímãs abaixo do alvo, induzindo os íons a se chocarem contra o alvo em determinadas regiões. Portanto, a deposição das amostras é feita na presença de um pequeno campo magnético.

As amostras utilizadas neste trabalho foram depositadas na Unité Mixte de Physique CNRS/Thales, Université Paris-Sud, Orsay, França, por C. Deranlot e F. Petroff.

4.2 Tratamentos Térmicos e Caracterização Magnética

As amostras descritas na Seção 4.1 foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos, buscando induzir o efeito de EB. Nosso objetivo era estudar a variação do campo de EB em função de dois parâmetros deste tratamento térmico, a temperatura e orientação das amostras em relação ao campo externo aplicado.

O campo magnético existente na deposição de filmes através da técnica de desbastamento iônico, embora pequeno, é suficiente para induzir certa orientação dos spins da amostra, criando um eixo fácil de magnetização. As amostras como-depositadas foram caracterizadas magneticamente com AGFM. Desta maneira fomos capazes de determinar qual era o seu eixo fácil de magnetização.

Conhecido o eixo fácil, submetemos os filmes a um tratamento térmico, feito em um forno (Seção 3.2), onde aplicamos um campo magnético em diferentes ângulos em relação a tal eixo. Foram utilizados quatro ângulos distintos, 0° , 90° , 180° e 45° e as amostras foram chamadas de A, B, C e D respectivamente (Figura 4.2.1). Um campo magnético de 2 kOe foi aplicado no plano do filme e foi mantido enquanto este era aquecido até uma temperatura máxima de 200°C . O sistema permaneceu nesta temperatura durante quinze minutos e depois foi resfriado, sempre mantendo o campo magnético aplicado. Para evitar oxidação das amostras, a pressão do sistema durante os tratamentos foi controlada e mantida em torno de 3.8×10^{-6} Torr.

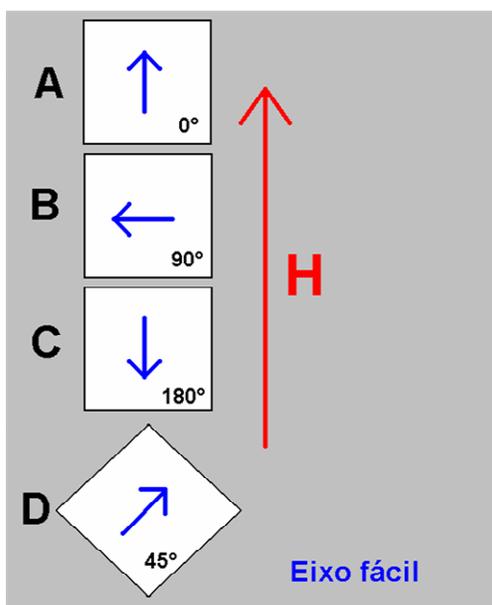


Figura 4.2.1: Orientação das amostras em relação ao campo magnético externo durante o tratamento.

Após o tratamento, foi feita a caracterização magnética das amostras, via AGFM. Aplicamos H em diferentes orientações em relação ao campo do tratamento, e em cada orientação foi obtida a curva de histerese da amostra. Inicialmente H foi aplicado a 0° em relação ao campo de tratamento. Depois, este ângulo, que definiremos como ϕ_H , foi variando de 10° em 10° até completarmos uma volta completa. Estas medidas foram feitas à temperatura ambiente e com H máximo de 1 kOe aplicado no plano dos filmes.

Os dados obtidos foram figurados com a ajuda do software ORIGIN. Para cada curva obtivemos o campo de EB, definido na Seção 2.2. A seguir encontram-se algumas curvas de histerese medidas neste trabalho. A Figura 4.2.2 refere-se à amostra virgem, onde definimos a direção do eixo fácil como sendo de 0° em relação ao campo aplicado com o AGFM. As Figuras 4.2.3 a 4.2.6 ilustram as curvas obtidas para as amostras A, B, C e D respectivamente. Nestas o ângulo representado é aquele formado entre a direção do campo do AGFM e a direção do campo de tratamento.

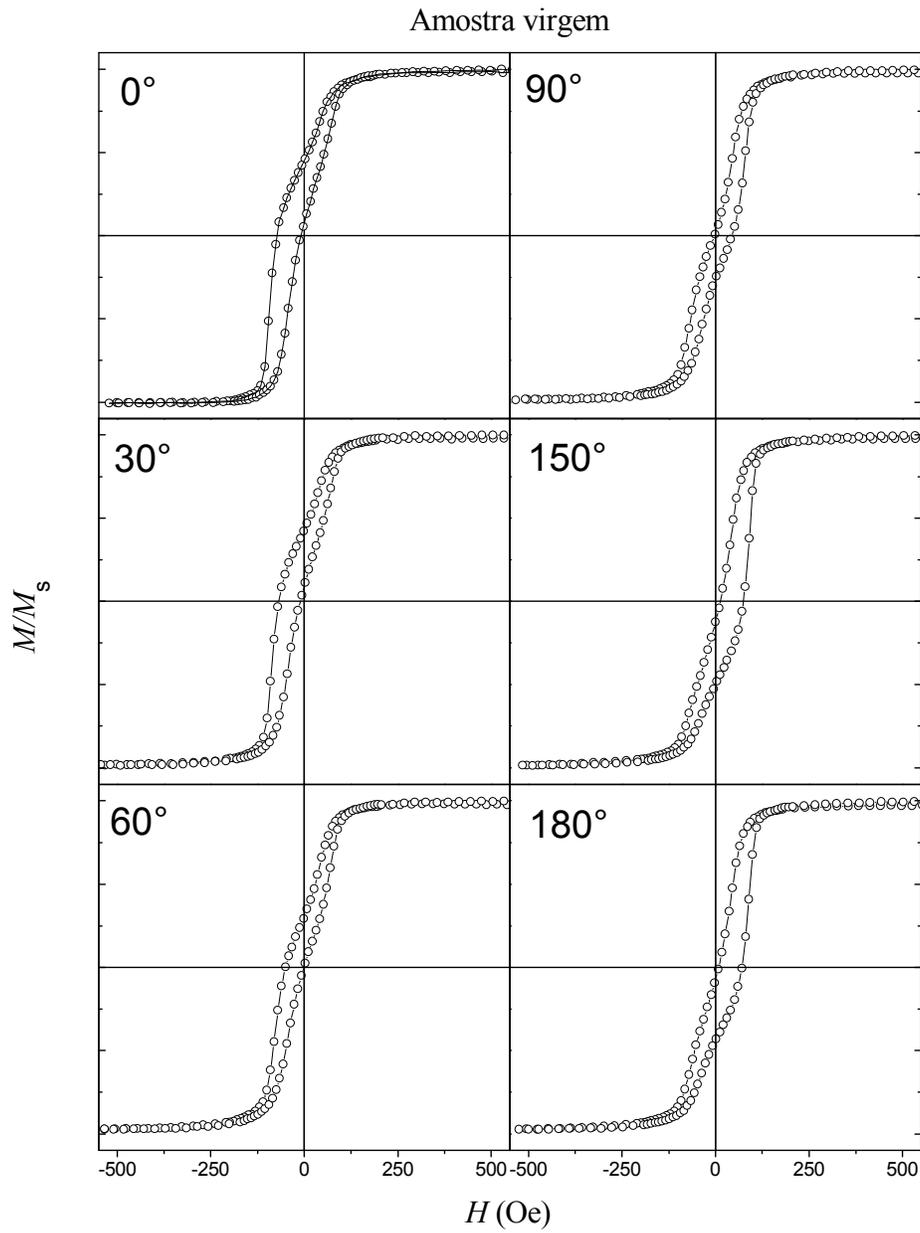


Figura 4.2.2: Curvas de histerese obtidas para a amostra virgem aplicando campo em diferentes ângulos em relação ao campo de tratamento térmico.

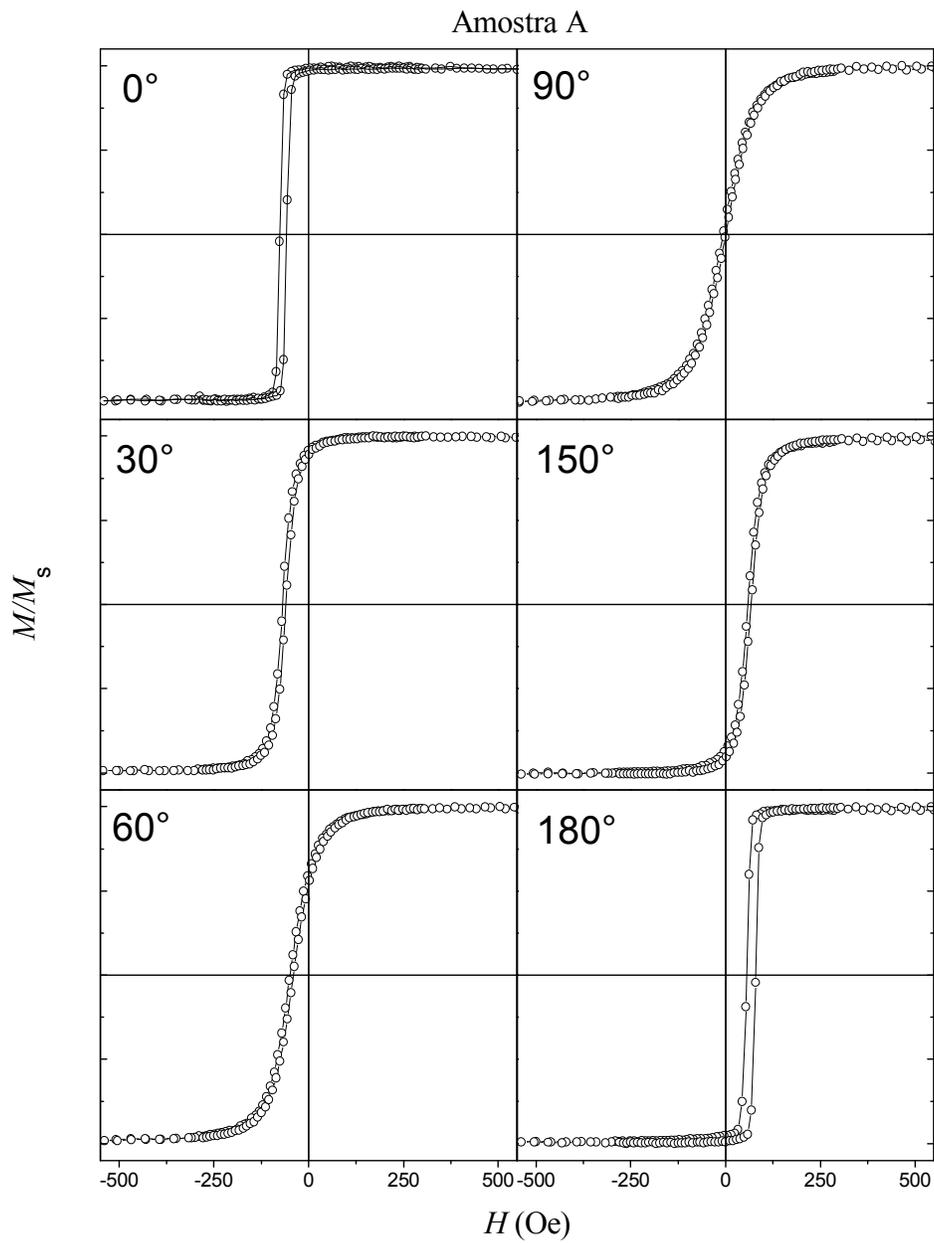


Figura 4.2.3: Curvas de histerese obtidas para a amostra A aplicando campo em diferentes ângulos em relação ao campo de tratamento térmico.

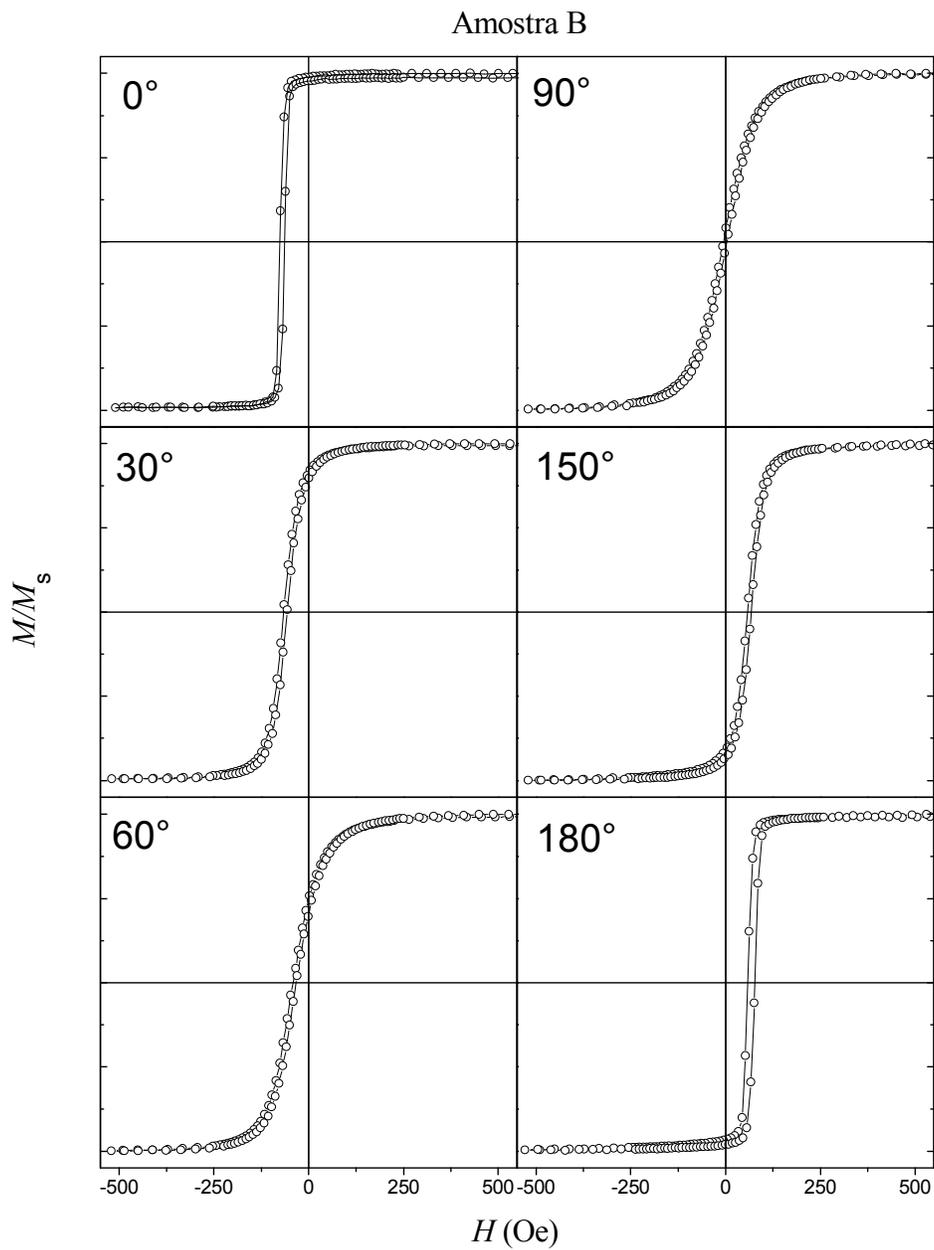


Figura 4.2.4: Curvas de histerese obtidas para a amostra B aplicando campo em diferentes ângulos em relação ao campo de tratamento térmico.

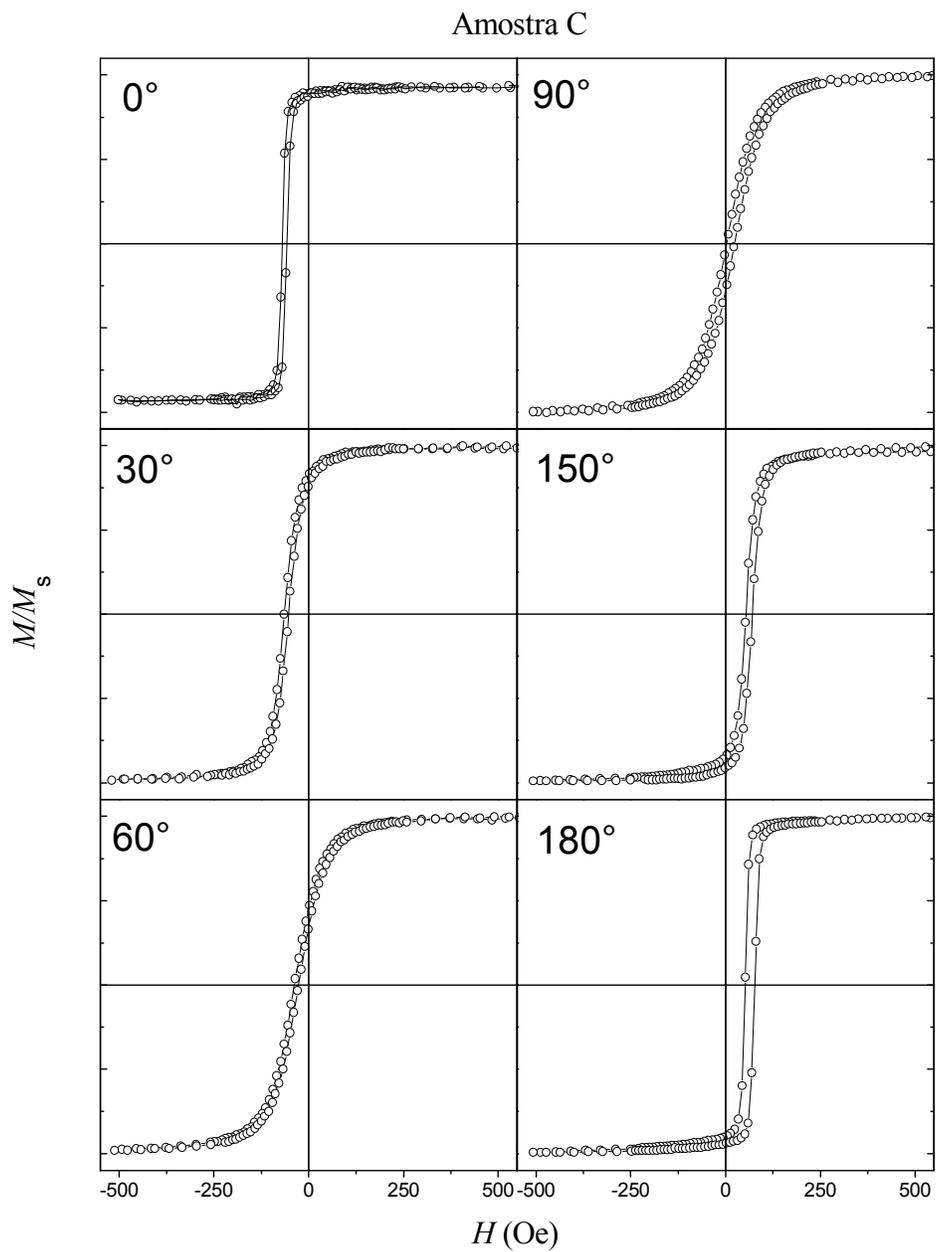


Figura 4.2.5: Curvas de histerese obtidas para a amostra C aplicando campo em diferentes ângulos em relação ao campo de tratamento térmico.

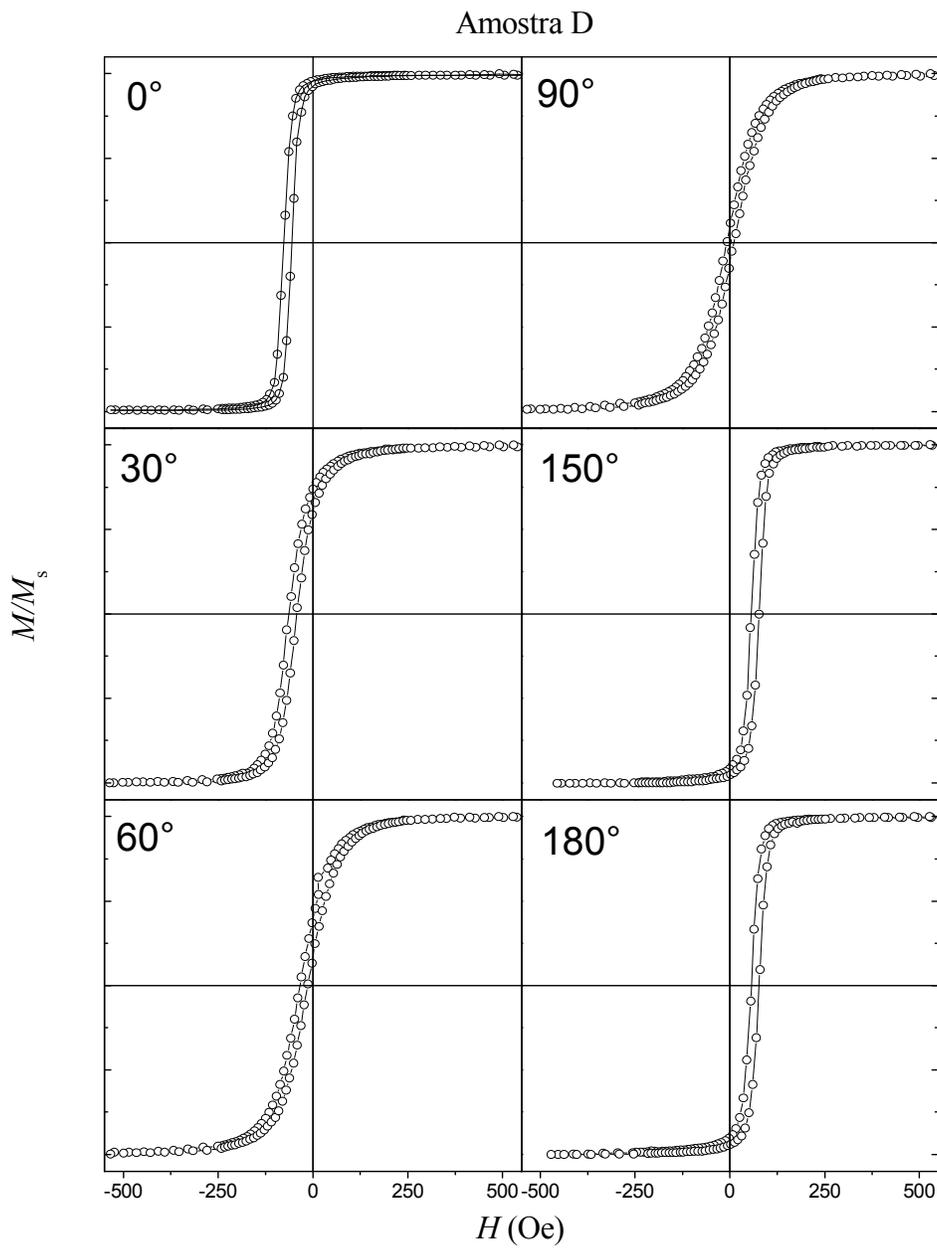


Figura 4.2.6: Curvas de histerese obtidas para a amostra D aplicando campo em diferentes ângulos em relação ao campo de tratamento térmico.

Ao compararmos as curvas de histerese obtidas para as diferentes amostras, podemos notar algumas diferenças claras. A Figura 4.2.7 mostra as curvas de histerese das amostras A, B, C e D, medidas aplicando H na mesma direção do campo de tratamento de cada uma delas. Nota-se que o H_{EB} é diferente para cada uma delas, e as curvas de C e D mostram-se mais arredondadas que as curvas de A e B.

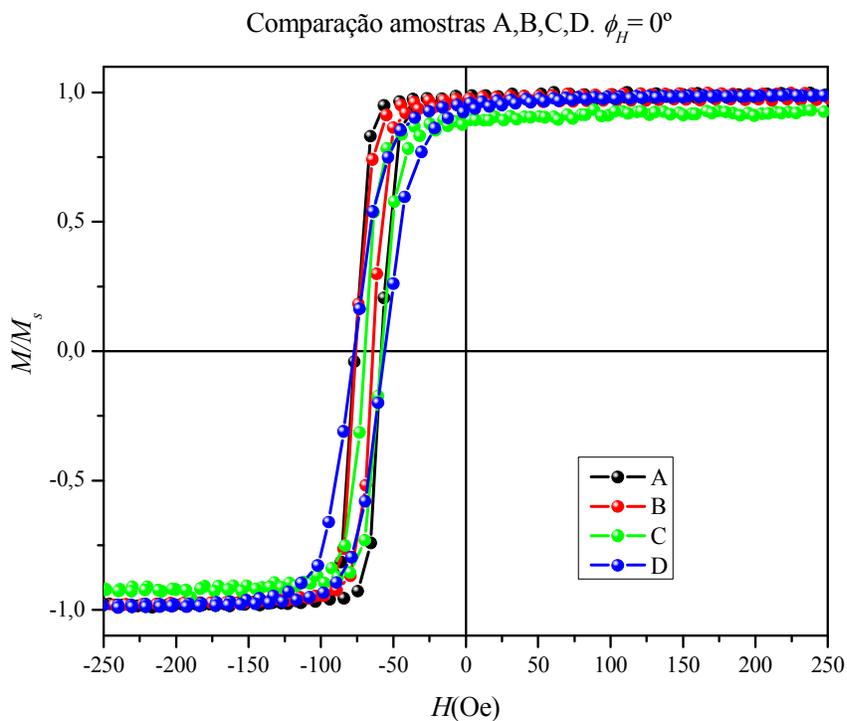


Figura 4.2.7: Curvas de histerese das amostras A, B, C e D obtidas aplicando-se campo na mesma direção do campo de tratamento.

Figura 4.2.8 mostra as curvas H_{EB} contra ϕ_H para cada uma das amostras, onde podemos ver que as curvas referentes às amostras C e D tiveram um pequeno deslocamento para a direita em relação à curva da amostra A.

Aqui termina a primeira parte de nosso trabalho, onde a influência da orientação do campo magnético aplicado durante o tratamento foi estudada.

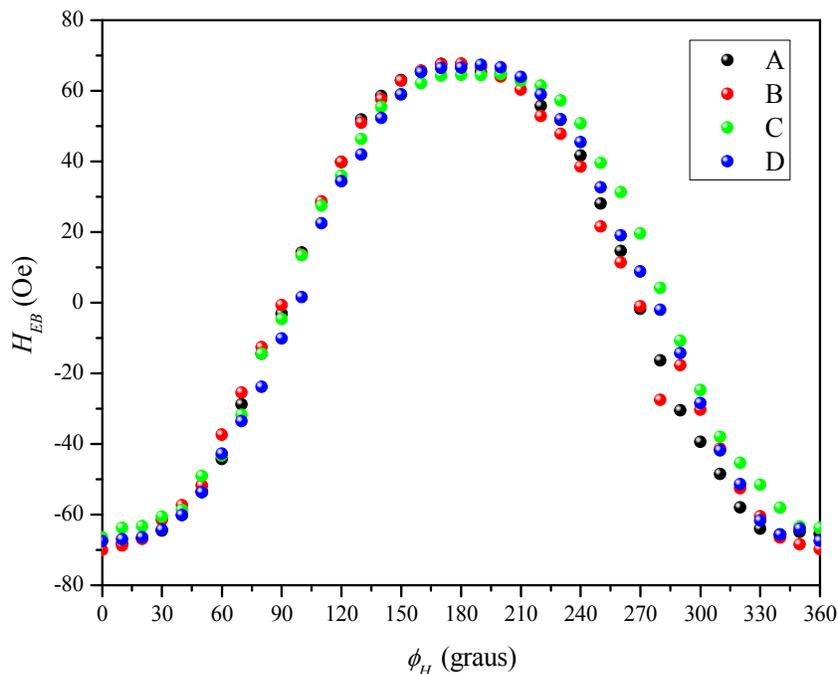


Figura 4.2.8: Gráficos H_{EB} contra ϕ_H para as amostras A, B, C e D.

Terminada a primeira parte de nosso trabalho, passamos a estudar a variação do campo de EB em função da temperatura de tratamento (T_i). Dez pedaços aproximadamente iguais de nosso filme foram cortados e tratados em diferentes temperaturas. Os tratamentos foram feitos em um forno (Seção 3.2), todos na presença de um campo magnético de 2 kOe aplicado na mesma direção do eixo fácil das amostras. Começamos com 200 °C, e nos tratamentos subsequentes fomos aumentando a temperatura de dez em dez graus, até chegarmos a 300 °C.

De posse destas dez amostras tratadas, passamos para a fase de caracterização magnética, utilizando um AGFM (Seção 3.1). Foi feita a variação angular de H em relação à direção do campo magnético do tratamento térmico, da mesma maneira que fizemos com as amostras A, B, C e D. Assim, para cada amostra obtivemos trinta e sete curvas de histerese, referentes à variação angular de 0° a 360°.

A Figura 4.2.9 mostra uma comparação entre as curvas de histerese no eixo fácil para as diferentes temperaturas de tratamento. Também foram feitas as curvas de $H_{EB} \times \phi_H$, e estas estão ilustradas nas Figuras 4.2.10 e 4.2.11.

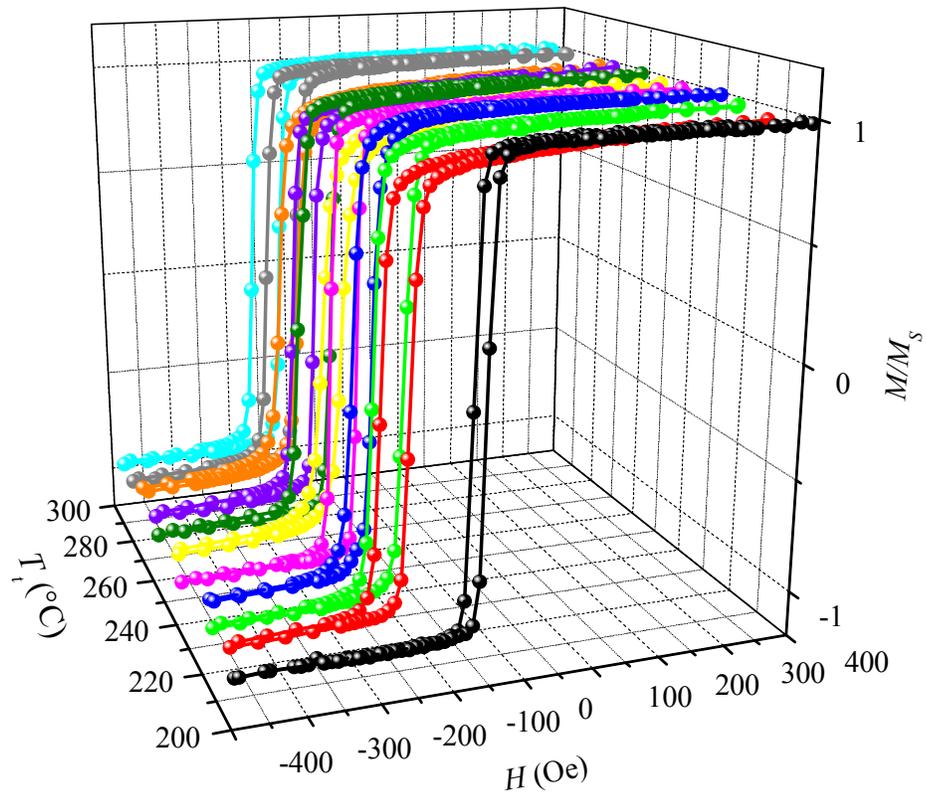


Figura 4.2.9: Curvas de histerese das amostras tratadas em diferentes temperaturas para $\phi_H = 0$.

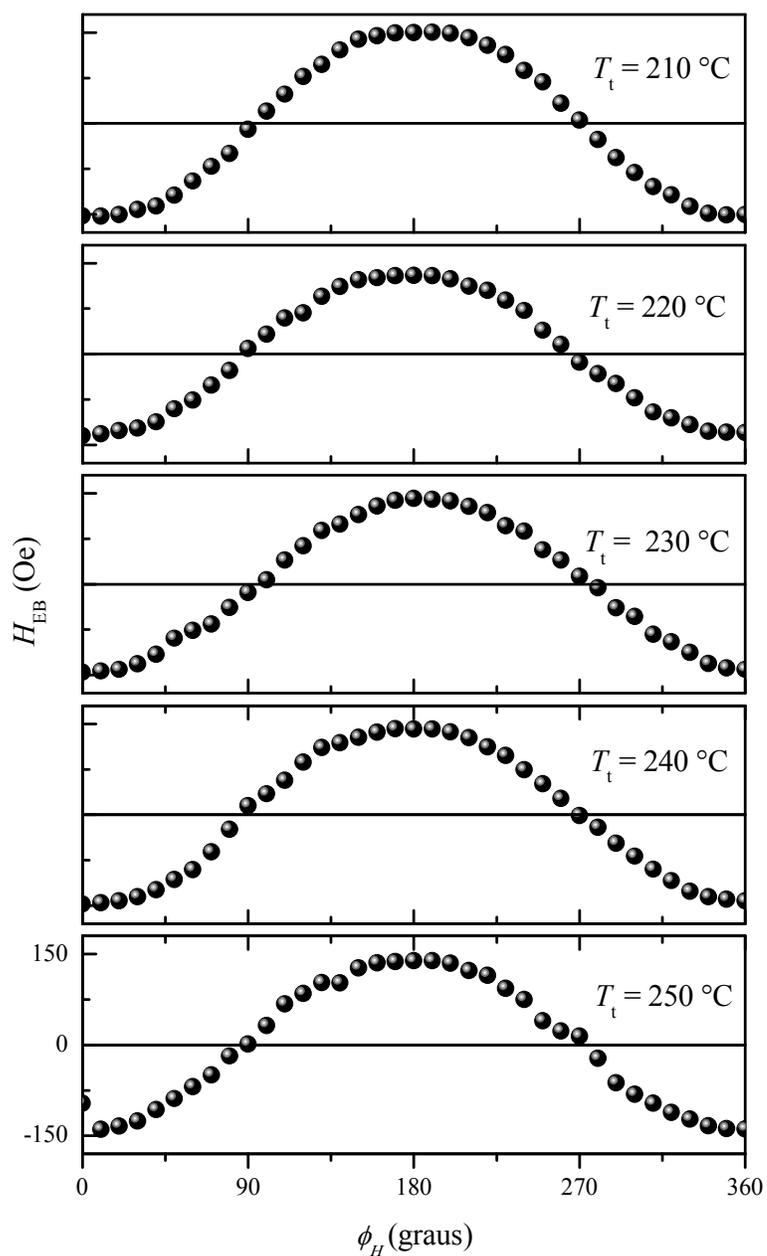


Figura 4.2.10: Variação do H_{EB} em função do ângulo do campo aplicado em relação à direção do campo do tratamento térmico. Amostras tratadas com temperaturas de 210 °C a 250 °C.

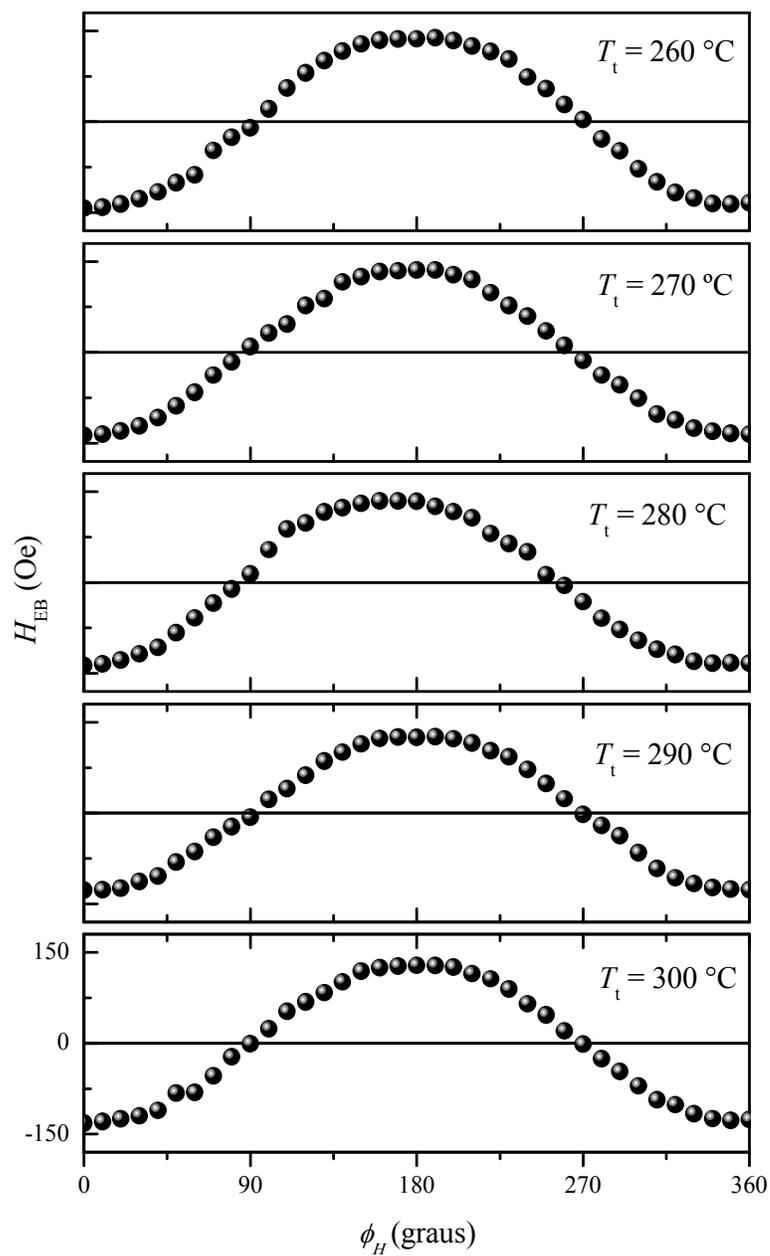


Figura 4.2.11: Variação do H_{EB} em função do ângulo do campo aplicado em relação à direção do campo do tratamento térmico. Amostras tratadas com temperaturas de 260 °C a 300 °C.

Depois que todas as curvas de histerese foram medidas, comparamos os H_{EB} máximos para os diferentes tratamentos. A Figura 4.2.12 mostra a relação entre H_{EB} máximo e as temperaturas de tratamento. Podemos notar que a interação atingiu um máximo em torno de 210 °C e a partir daí decresceu com o aumento da temperatura de tratamento.

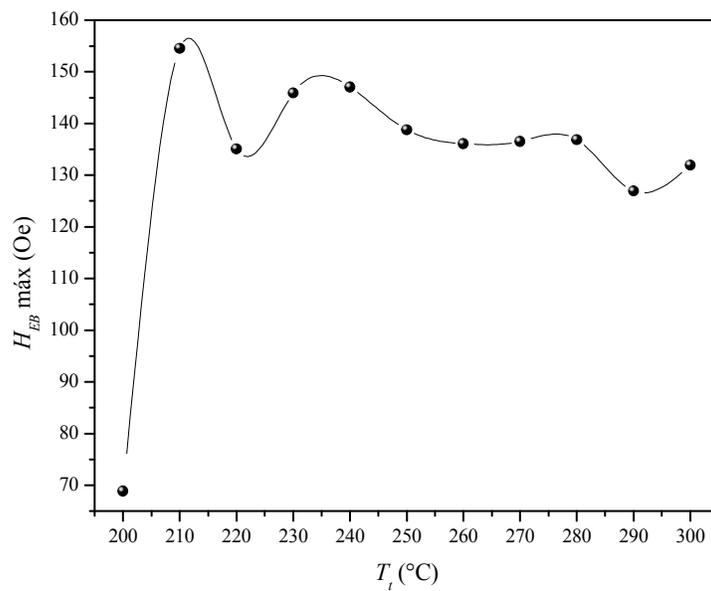


Figura 4.2.12: H_{EB} máximo para os diferentes tratamentos térmicos.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo da variação do campo de *Exchange Bias* em uma série de filmes de Si(100)/Ru(15 nm)/IrMn(15 nm)/Cu(0,25 nm)/Co(5 nm)/Ru(3 nm) em função de dois parâmetros utilizados durante tratamentos térmicos. Foram variadas (a) a orientação do campo magnético aplicado em relação ao eixo fácil de magnetização das amostras e (b) a temperatura do tratamento. As amostras foram caracterizadas magneticamente antes e depois dos tratamentos.

Foi observada uma reorientação do eixo comum de EB variando a direção do campo magnético externo durante o tratamento térmico, acompanhada de arredondamento das curvas de histerese, não apresentando modificação do valor máximo do deslocamento. Isto se deve, provavelmente, a um realinhamento dos momentos magnéticos, que se orientaram de modo a ficar próximos a outro eixo de fácil magnetização, o qual se encontra mais adjacente da nova direção do campo externo. Isso se deve ao fato de que as camadas FM (Co) e AFM (IrMn), sendo estruturas cristalinas cúbicas, possuem mais de um eixo de fácil magnetização.

Foi observado que o campo máximo de EB foi obtido com uma temperatura de tratamento de cerca de 210 °C, apresentando um enfraquecimento gradual com o aumento da temperatura. Provavelmente, o que ocorreu foi que, aquecendo as amostras a temperaturas mais altas de 210 °C, as camadas FM e AFM começam a se “misturar”, criando imperfeições na interface comum. Como o EB é um efeito causado pela interação entre as camadas FM e AFM justamente em sua interface, a criação de imperfeições reduz esta interação de troca, assim diminuindo o H_{EB} .

Referências

- [1] J. Nogués, Ivan K. Schuller, *Journ. Magn. Magn. Mater.* **192**, (1999) 203.
- [2] S. Nicolodi, Dissertação de Mestrado, *Exchange bias em filmes de IrMn/Cu/Co*, Porto Alegre, (2006).
- [3] J. Nogués, J. Sort, V. Langlais, V. Skumryev, S. Sunrinach, J. S. Muñoz, M. D. Baró, *Physics Reports*, **422**, (2005) 65.
- [4] W. H. Meiklejohn, C. P. Bean, *Phys. Rev.* **102**, (1956) 1413.
- [5] B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*. Massachussets: Addison Wesley, (1972).
- [6] P. Weiss, *J. Phys.* **6**, (1907) 661.
- [7] D. Schafer, J. Geshev, S. Nicolodi, L. G. Pereira, J. E. Schmidt, P. L. Grande, *Appl. Phys. Lett.* **93**, (2008) 042501.
- [8] P. J. Flanders, *Journ. Appl. Phys.* **63**, (1988) 3940.