

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE FÍSICA**

**EVOLUÇÃO TEMPORAL DO EXCHANGE BIAS  
EM FILMES FINOS DE IrMn/CoFe**

**JUSSARA GUIMARÃES**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Porto Alegre - RS**

**Junho de 2016**

**JUSSARA GUIMARÃES**

**EVOLUÇÃO TEMPORAL DO EXCHANGE BIAS  
EM FILMES FINOS DE IrMn/CoFe**

Monografia apresentada ao Instituto de Física  
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
como requisito para obtenção do título de Ba-  
charel em Física

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sabrina Nicolodi Viegas.

**Porto Alegre - RS**

**Junho de 2016**

## RESUMO

O fenômeno de *Exchange Bias* resulta do acoplamento de troca entre um material ferromagnético e um material antiferromagnético adjacente. O deslocamento da curva de histerese e o aumento da coercividade são suas manifestações mais conhecidas. A evolução temporal do campo de *Exchange Bias* é analisada através da realização de diversas medidas de histerese após diferentes intervalos de tempo, em amostras imersas em altos campos magnéticos por cerca de até 600 horas ininterruptamente. O campo magnético externo foi aplicado de forma a forçar um alinhamento antiparalelo dos spins da camada ferromagnética, em relação ao campo de exchange bias das amostras analisadas, que consistem em filmes finos de IrMn/CoFe com espessura variável do IrMn. As medidas foram realizadas em amostras como feitas e após submetidas a tratamento térmico a 400 °C. Foram observadas variações significantes para os campos de *exchange bias* e coercividade nas amostras como feitas, enquanto para as amostras tratadas foram constatadas modificações menos expressivas no campo de exchange bias e uma coercividade praticamente constante.

## ABSTRACT

The time evolution of Exchange Bias field was analyzed by hysteresis measurements on samples immersed in high magnetic fields for about 600 hours. The external magnetic field was applied in order to force a spin antiparallel alignment of the ferromagnetic layer in relation to the exchange bias field in thin films of IrMn/CoFe with variable thickness of IrMn . The measurements were performed on samples as made and after annealed up to 400 °C. Significant changes were observed for the exchange bias field and coercivity for the samples as made while for the annealed samples were observed small changes in the exchange bias field and a nearly constant coercivity

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>2 REVISÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>6</b>
2.1 ORDENAMENTO MAGNÉTICO: FERROMAGNETISMO E ANTIFERROMAGNETISMO . . . . .	6
2.2 ANISOTROPIA MAGNÉTICA . . . . .	8
<b>2.2.1 Anisotropia Magnetocristalina</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>2.2.2 Exchange Bias</b> . . . . .	<b>10</b>
2.2.2.1 Modelo do Exchange Bias . . . . .	10
2.2.2.2 Características e propriedades do Exchange Bias . . . . .	12
<b>3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b> . . . . .	<b>14</b>
3.1 AS AMOSTRAS . . . . .	14
3.2 O MAGNETÔMETRO GRADIENTE DE FORÇA ALTERNADA . . . . .	15
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>17</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL . . . . .	17
4.2 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA . . . . .	18
<b>4.2.1 Amostras como feitas</b> . . . . .	<b>18</b>
<b>4.2.2 Amostras tratadas termicamente</b> . . . . .	<b>20</b>
<b>5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b> . . . . .	<b>28</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Exchange Bias é um efeito de interface gerado a partir do acoplamento entre um material ferromagnético (FM) e outro antiferromagnético (AF). Também conhecido como anisotropia de troca, tem como principais características o deslocamento em campo que pode ser acompanhado do aumento da coercividade. Desde de sua primeira observação em partículas de cobalto envoltas por seu óxido natural (CoO) [1, 2], foi observada em diversos outros sistemas, como pequenas partículas, materiais não homogêneos e filmes finos [3].

Apesar de ser um efeito que vem sendo amplamente estudado ao longo dos últimos anos, não existe uma teoria que consiga elucidar completamente este fenômeno. Sua importância se deve à diversidade de suas aplicações tecnológicas, como por exemplo, fabricação de mídias de gravação magnética, junções túnel magnéticas, válvulas de spin, cabeçotes de leitura magnética, sensores magnéticos, memórias magnetorresistivas, entre outros. Desta forma, torna-se fundamental a estabilidade térmica e temporal do efeito para o perfeito funcionamento destes dispositivos.

Neste trabalho, propõe-se fazer uma análise da evolução temporal do campo de *exchange bias* em filmes finos de IrMn/CoFe, com espessura variável da camada de Ir/Mn. A variação do efeito foi induzida apenas por aplicação de altos campos magnéticos (da ordem de 1 KOe), sem que as amostras tenham sido previamente submetidas a um procedimento de ativação do *exchange bias*.

No primeiro capítulo desta monografia serão apresentados os conceitos teóricos relevantes que envolvem o fenômeno estudado. Serão demonstrados os diferentes tipos de ordenamento magnético da matéria, assim como a definição e exemplificação dos tipos de anisotropia magnética. Finalmente serão abordados os conceitos do efeito de *exchange bias*, o modelo qualitativo que tenta explicá-lo, assim como suas características e principais propriedades.

No capítulo seguinte abordaremos os procedimentos experimentais aplicados na realização deste estudo. Será realizada uma esquematização das amostras empregadas no projeto e suas características detalhadas, com uma breve explicação sobre o equipamento utilizado para a realização de suas medidas, sendo este o Magnetômetro Gradiente de Força Alternada (AGFM).

No terceiro capítulo apresentaremos os principais resultados obtidos através da caracterização estrutural e magnética para os diferentes tipos de amostras, retratando o modelo de relaxamento de dois níveis de energia, que tenta explicar os resultados obtidos. Finalmente, no quarto capítulo, serão expostas as conclusões finais do trabalho, assim como suas perspectivas futuras.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os conceitos teóricos relevantes para a realização deste trabalho. Inicialmente, será feita uma revisão dos tipos de ordenamentos magnéticos. Destacando-se os materiais ferromagnéticos e antiferromagnéticos, e em seguida, ilustrando os conceitos de anisotropia magnética, ressaltando as anisotropias magnetocristalinas e de troca, ou ainda, *exchange bias*, principal conceito aplicado neste trabalho, especificando suas principais características e propriedades mais expressivas.

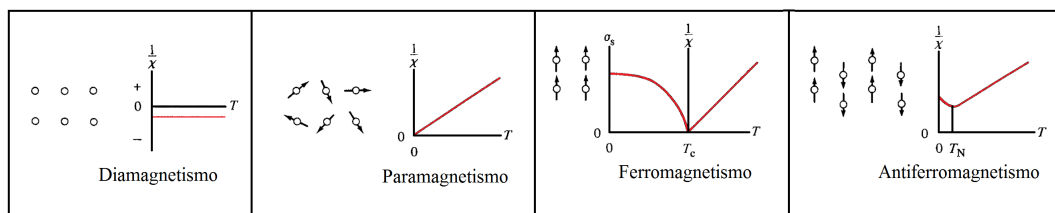
### 2.1 ORDENAMENTO MAGNÉTICO: FERROMAGNETISMO E ANTIFERROMAGNETISMO

A magnetização  $M$  é definida como o momento magnético total de um corpo por unidade de volume, ou seja, como um conjunto de momentos magnéticos microscópicos. Na presença de um campo magnético externo  $H$ , os momentos magnéticos dos átomos ou moléculas tendem a se redirecionar, alterando, desta forma, a magnetização da substância, sendo sua temperatura outro parâmetro que influencia diretamente na magnetização dos materiais. À medida que se aumenta a temperatura do sistema, os momentos magnéticos se tornam mais desordenados, diminuindo, conseqüentemente, a magnetização do material [4, 5]. A resposta da magnetização do sistema à aplicação de um campo magnético  $H$  é dada pela suscetibilidade magnética  $\chi$ , sendo a magnetização da substância representada por:

$$M = \chi H \quad (2.1)$$

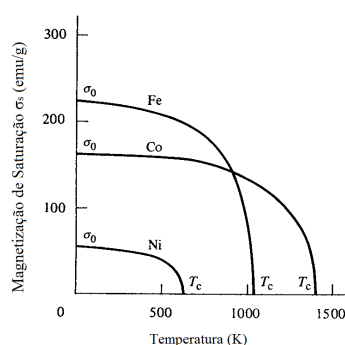
Uma das maneiras de classificarmos as manifestações magnéticas da matéria está na interação dos momentos magnéticos no interior dos sólidos. Há determinados materiais em que não existe interação entre os momentos magnéticos que constituem o sistema, onde se arranjam de forma aleatória e são independentes entre si. Essas formas fracas de magnetismos são denominadas: paramagnetismo e diamagnetismo (Figura 1) e diferem basicamente pelo sinal de suas suscetibilidades magnéticas [4, 6]. Na Figura 1 é possível observar o comportamento das suscetibilidades magnéticas em relação a temperatura para os principais tipos de ordenamentos magnéticos da matéria.

Contudo, existem na natureza determinados sistemas que apresentam magnetização espontânea, em outras palavras, apresentam magnetização não nula mesmo na ausência de um campo magnético externo, em razão da disposição ordenada dos momentos magnéticos no interior dos sólidos e da interação existente entre os mesmos. Estes materiais são conhecidos como ferromagnéticos (FM), representados na Figura 1 e apresentam uma magnetização remanente  $M_R$  quando  $H = 0$  [7].



**Figura 1** – Tipos de magnetismo [6].

Nestes sistemas, a magnetização aumenta à proporção que se intensifica o campo externo, até atingir uma magnetização máxima denominada magnetização de saturação  $M_S$ . Aumentando a temperatura do sistema, a agitação térmica tende a desorientar os momentos magnéticos da estrutura contribuindo para o decréscimo da magnetização  $M_S$ , até que esta se torne nula ao atingir um valor crítico de temperatura, conhecida como temperatura de Curie  $T_C$  [8]. Para temperaturas mais altas, como é possível observar na Figura 2, o sistema perde sua configuração ferromagnética e passa a se comportar como um material paramagnético.



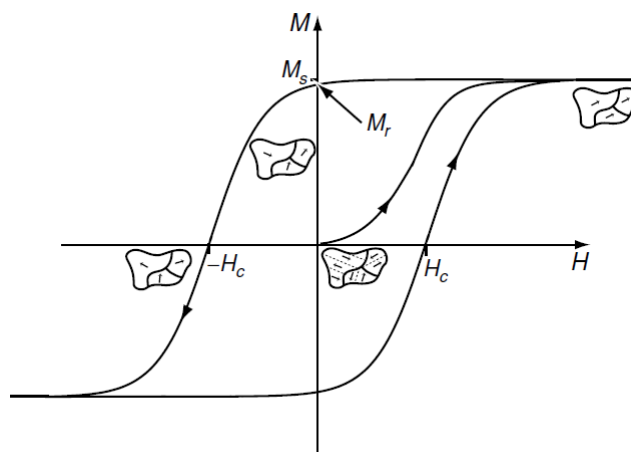
**Figura 2** – Magnetização de saturação do Ferro, Cobalto e Níquel em função da Temperatura [6].

A magnetização espontânea dos ferromagnetos é normalmente associado à sua curva de histerese (Figura 3), que fornece informações essenciais sobre propriedades magnéticas dos materiais, como por exemplo, a magnetização de saturação  $M_S$ , a magnetização remanente  $M_R$  e o campo coercivo  $H_C$ , que se vincula a fatores como: forma, rugosidade da sua superfície, defeitos microscópicos e propriedades térmicas das amostras [8].

Além dos materiais ferromagnéticos, há outro tipo de ordenamento magnético que também apresenta momentos magnéticos ordenados. São os sistemas antiferromagnéticos (AF). Enquanto os spins dos materiais ferromagnéticos estão alinhados paralelamente, os spins dos antiferromagnéticos estão alinhados de forma antiparalela o que resulta na magnetização  $M = 0$ , que é semelhante a dos materiais paramagnéticos (Figura 1). Da mesma maneira que nos ferromagnéticos, os antiferromagnéticos também apresentam uma temperatura crítica, conhecida como temperatura de Néel (Figura 1) [4, 5, 6].

Existem algumas hipóteses que tentam explicar tais fenômenos: a primeira delas, foi proposta em 1907 por Pierre Weiss e é conhecida como teoria do campo médio ou campo





**Figura 3** – Curva de histerese com ilustração esquemática dos domínios magnéticos para um estado desmagnetizado na origem, o estado magnetizado  $M = M_S$ , o estado remanente de magnetização  $M = M_R$  e o estado  $H = H_C$ , o campo coercivo no qual  $M$  muda de sinal [8].

molecular. Para Weiss, no interior dos materiais haviam domínios que interagem entre si, o que resultava numa magnetização espontânea na ausência de campo magnético externo, mas que era afetada por agitações térmicas. Estas eram associadas a campos térmicos que competiam energeticamente com campos moleculares [7].

Duas décadas depois, uma nova formulação proposta com base nos conhecimentos de Mecânica Quântica, foi formulada por Heisenberg, conhecida como interação de troca. O Hamiltoniano de Heisenberg é construído a partir de duas formas de interação: a interação spin-spin (interação de troca ou exchange) e a interação do spin com campo magnético externo [7]. A primeira é representada pela expressão a seguir:

$$E_{ex} = -J_E \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad (2.2)$$

Na equação acima,  $J_E$  representa a constante de integral de troca, enquanto  $S_i$  e  $S_j$  são os operadores de spin dos elétrons. A constante  $J_E$  é que vai determinar o comportamento dos spins. Se  $J_E > 0$  os spins tendem a se alinhar paralelamente, comportando-se como um ferromagneto, mas se  $J_E < 0$ , ocorre o alinhamento antiparalelo que configura o estado antiferromagnético [4, 5, 8].

## 2.2 ANISOTROPIA MAGNÉTICA

Para diversos sistemas, o comportamento da magnetização em função de um campo externo aplicado depende da direção de aplicação deste campo magnético externo. Este efeito se deve a anisotropia magnética. A importância deste fato se deve a interesses práticos, uma vez que a anisotropia é aplicada no desenvolvimento da maioria dos materiais magnéticos de

importância comercial, sendo de extrema relevância o conhecimento aprofundado da anisotropia para a concepção de tais materiais [6, 9].

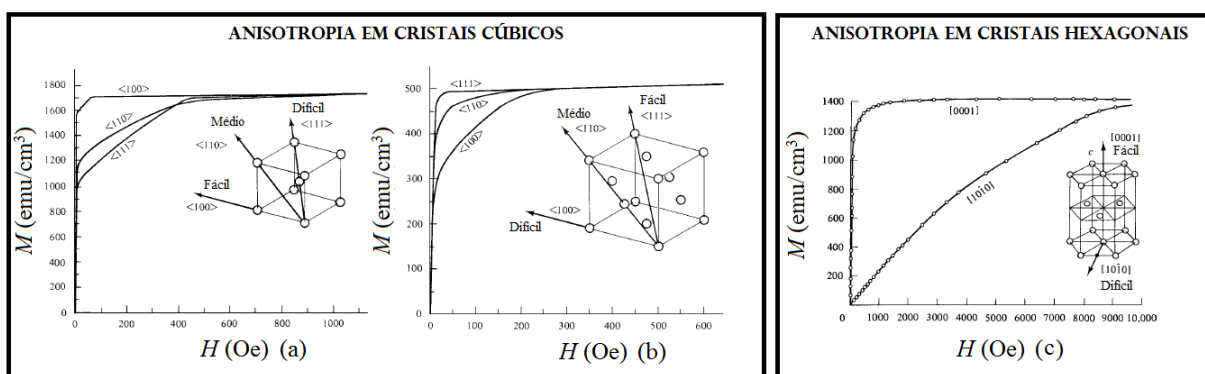
Existem diferentes tipos de anisotropias magnéticas, como por exemplo, a anisotropia de forma, anisotropia de stress, anisotropia induzida, e ainda, as anisotropias magnetocristalina e de troca [6]. As duas últimas, especialmente a anisotropia de troca, serão discutidas neste trabalho.

### 2.2.1 Anisotropia Magnetocristalina

A origem desta anisotropia reside no fato que os momentos no interior do material magnético não apontam aleatoriamente em qualquer direção em relação aos eixos cristalinos. Para cada cristal, existe uma direção preferencial de alinhamento dos spins conhecida como eixo fácil de magnetização. Aplicando um campo magnético ao longo desta direção, obtêm-se a magnetização  $M_S$  com baixos valores de  $H$ . Porém, em determinados eixos são necessários altos campos magnéticos para se obter a magnetização de saturação. Estes são conhecidos como eixo duro ou de difícil magnetização [9].

O processo de magnetização é diferente quando o campo é aplicado ao longo de distintas direções cristalográficas, uma vez que a anisotropia reflete a simetria do cristal. A direção de fácil magnetização do mesmo coincide com a orientação do domínio espontâneo da magnetização na ausência de campo externo. Este tipo de anisotropia é devido, principalmente, ao acoplamento spin-órbita [6, 8].

Na Figura 4, é possível visualizar as curvas de magnetização por campo aplicado para cristais de estrutura cúbica e hexagonal. Primeiramente, mostra-se resultados para o ferro, que tem uma estrutura cúbica de corpo centrado, e para o níquel, com estrutura cúbica de face centrada. Em seguida, visualiza-se a curva de magnetização para cobalto, que possui estrutura hexagonal compacta a temperatura ambiente. Observa-se que o cobalto possui um único eixo fácil, ao longo do qual, a magnetização pode apontar para cima ou para baixo. Este tipo de anisotropia é denominada uniaxial [6, 9].

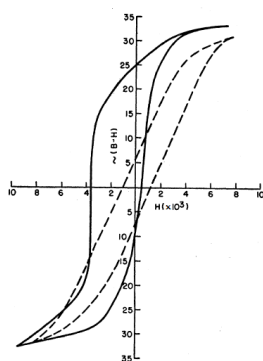


**Figura 4** – Curva de magnetização para cristais de ferro (a), níquel (b) e cobalto (c) [6].

### 2.2.2 Exchange Bias

Observado pela primeira vez em 1956 por Meiklejohn e Bean [1, 2], o Exchange Bias (EB) foi descrito como um novo tipo de anisotropia magnética, a anisotropia de troca, como resultado de uma interação entre o material antiferromagnético e o ferromagnético.

Através da análise de finas partículas com núcleo de cobalto envolto por seu óxido natural, CoO, Meiklejohn e Bean desenvolveram uma ideia qualitativa do Exchange Bias. Acima da temperatura de Néel do antiferromagneto (estado paramagnético), as partículas apresentam propriedades magnéticas de cobalto puro. Todavia, ao atingir temperaturas abaixo da temperatura de Néel do óxido de cobalto, passa a existir uma interação entre os spins do cobalto ferromagnético e de seu óxido antiferromagnético [1, 2].



**Figura 5** – Primeira manifestação do Exchange Bias (linha sólida) em partículas de Co oxidadas. Na curva pontilhada é demonstrada a curva de histerese para as partículas de CoO antes de resfriadas na presença de campo magnético. [1].

Na Figura 5, retirada do artigo publicado por Meiklejohn e Bean [1], é possível observar o deslocamento na curva de histerese onde o sistema foi resfriado da temperatura ambiente até 77K, abaixo da temperatura de Néel do CoO. Quando resfriado na ausência de campo magnético, a curva de magnetização apresenta comportamento de material ferromagnético (curva pontilhada na Figura 5), simetricamente centralizada em  $H = 0$ . No entanto, ao ser resfriado quando imerso em campo positivo, a curva de histerese é deslocada para valores negativos [10].

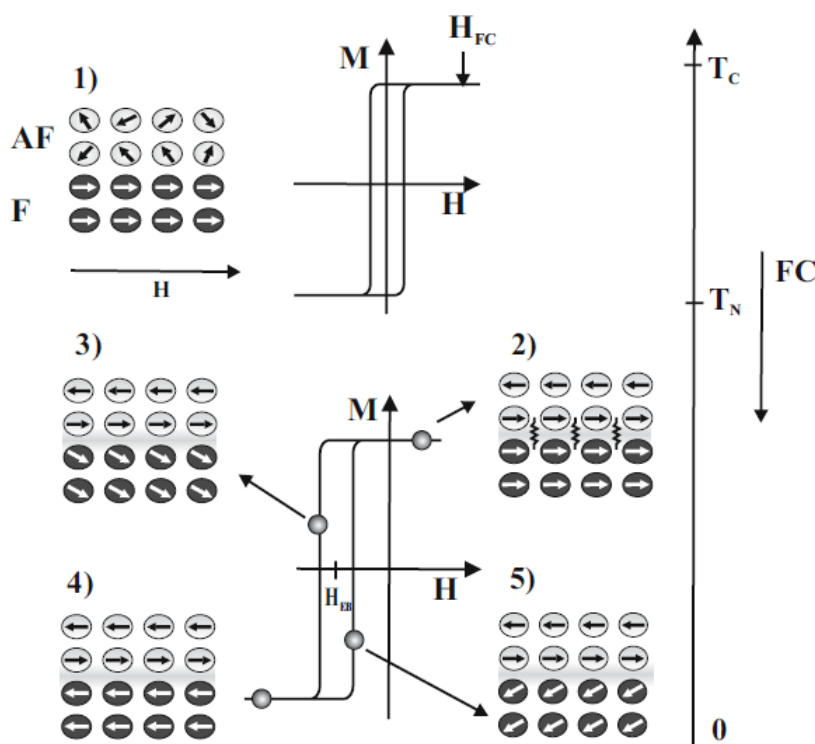
Desde a descoberta do EB, este efeito foi observado em diferentes sistemas com interface FM-AF como, por exemplo, pequenas partículas, materiais não-homogêneos, filmes finos, entre outros. No final da década de 90, um modelo teórico foi desenvolvido por Nogués e Schuller [3], a partir do estudo realizado em filmes finos com bicamadas FM-AF, no qual foi demonstrado um modelo intuitivo para o EB que será apresentado no item seguinte deste trabalho.

#### 2.2.2.1 Modelo do Exchange Bias

Por ser um efeito de interface é necessário existir contato microscópico entre as camadas FM e AF do material para que se verifique a manifestação do Exchange Bias. A curva de histerese

nada mais é que a observação macroscópica dessa interação a nível atômico. Na Figura 6.1, analisa-se a situação onde  $T > T_N$ , na qual os spins da camada FM se alinham na direção do campo aplicado, enquanto aqueles da camada AF encontram-se aleatoriamente orientados em seu estado paramagnético. Nesta situação, a curva de histerese é equivalente a de um sistema FM, não sendo afetada pela camada AF [10].

A partir de então, resfria-se o sistema aplicando um campo alto o suficiente para saturar o material FM ( $H_{FC}$ ), a uma temperatura abaixo de  $T_N$ . Nesta situação, os momentos magnéticos no interior da camada AF se organizam antiparalelamente, enquanto os spins interfaciais em seu interior (dispostos de maneira não compensada) se alinham paralelamente com os spins da camada FM, que estão alinhados na direção do alto campo externo aplicado (Figura 6.2). Isto se dá devido a interação de troca na interface do material FM com o AF [10].



**Figura 6** – Modelo intuitivo do Exchange Bias em bicamadas FM/AF [10].

Quando ocorre a reversão de campo aplicado, os spins da camada FM tentam rotacionar no plano, na tentativa de se realinhar com o campo externo na direção oposta, porém o acoplamento com a camada AF dificulta essa reorientação. Consequentemente, para vencer essa interação será necessária a aplicação de campos magnéticos mais intensos (Figura 6.3). Após alcançar a magnetização de saturação (Figura 6.4), os spins do material FM rotacionam sem dificuldade para valores positivos de campo magnético e campos pouco intensos são suficiente para fazê-los retornar a direção original (Figura 6.5)[10, 3].

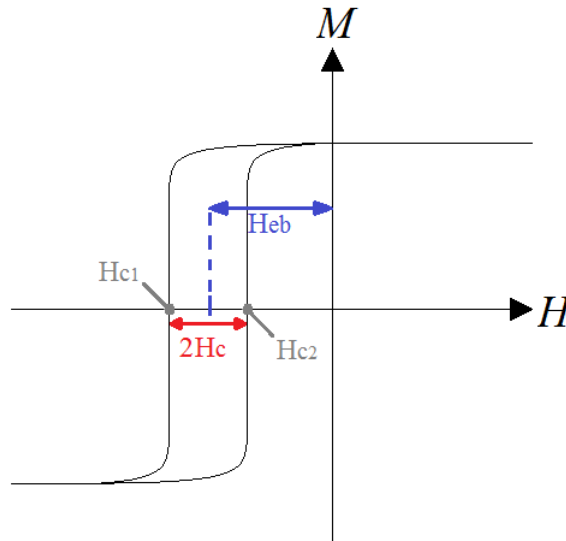
Isso ocorre por quê há um torque atuando nos spins ferromagnéticos em todos os outros

ângulos, exceto para a direção estável ao longo da qual foi aplicado o campo  $H_{FC}$ , o que configura uma anisotropia unidirecional. Enquanto isso, os spins AF são considerados rígidos e fixados na direção de  $H_{FC}$  durante todo o processo de reversão. Como resultado, teremos um deslocamento da curva de histerese para valores negativos de campo aplicado. Esse deslocamento é conhecido como campo de *exchange bias* ( $H_{EB}$ ) [10].

### 2.2.2.2 Características e propriedades do Exchange Bias

Além do deslocamento em campo, outra característica do efeito de EB é o aumento da coercividade na maioria dos casos, em relação ao material FM desacoplado. Na Figura 7 é possível observar a indicação dos campos  $H_{EB}$  e  $H_c$ . Enquanto o campo  $H_{EB}$  é definido como o deslocamento em campo em relação à origem, o campo  $H_c$  é definido como metade da largura da curva de histerese quando a magnetização é nula. Tais campos são definidos na Equação 2.3 e demonstrados na Figura 7.

$$H_{EB} = \frac{|H_{C1} + H_{C2}|}{2} \quad \text{e} \quad H_c = \frac{|H_{C1} - H_{C2}|}{2}. \quad (2.3)$$



**Figura 7** – Curva de magnetização para um sistema FM/AF acoplado com a manifestação do EB.

Apesar de explicar de maneira compreensível o efeito em questão, o modelo apresentado no item anterior desconsidera muitas propriedades que influenciam neste fenômeno, como por exemplo: espessura das camadas FM e AF, assim como a formação dos domínios magnéticos nestas camadas, a rugosidade da interface FM/AF, a cristalinidade das amostras, efeitos térmicos, anisotropia do material AF entre outros [11, 12, 13].

Além disso, outra propriedade importante diretamente vinculada ao EB é conhecida como efeito de treinamento, que se manifesta através da redução do  $H_{EB}$  com o número

de ciclos de histerese magnética realizados consecutivamente. Tal efeito se manifesta de duas maneiras diferentes, uma delas se dá entre a primeira e a segunda medida de magnetização, enquanto a outra maneira é caracterizada pela redução do  $H_{EB}$  proporcional ao número de medidas de histerese realizadas,

$$H_{EB} \propto \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (2.4)$$

onde  $n > 2$  e é o número de histereses realizadas [12]. Entre suas origens, pode-se citar a reconfiguração dos spins interfaciais AF, ou movimento de domínios durante a medida da histerese [14].

Outro aspecto importante do *Exchange Bias* é a necessidade de ativá-lo, uma vez que na maioria dos casos, somente o contato atômico entre o material ferromagnético e antiferromagnético não é suficiente para manifestação do fenômeno. Dentre as técnicas utilizadas para ativar o EB pode-se citar o tratamento térmico, bombardeamento iônico, fabricação de amostra na presença de campo magnético ou ainda submetê-las a campos muito intensos [11, 12, 13, 15]. Neste trabalho, o campo de *Exchange Bias* foi induzido apenas por aplicação de altos campos magnéticos por longo período de tempo, sem que as amostras tenham sido submetidas a um procedimento prévio de ativação do efeito.

### 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão detalhadas as características das amostras investigadas neste estudo, além de uma breve descrição dos aparatos experimentais, disponíveis no Laboratório de Magnetismo do Instituto de Física da UFRGS (LAM), que foram utilizados para caracterizar magneticamente tais amostras, assim como uma sucinta formulação física de seu funcionamento.

#### 3.1 AS AMOSTRAS

Na execução deste estudo, foram analisadas um série de amostras de filmes finos de IrMn/CoFe depositadas sobre substrato de Si(100), onde o IrMn é o material AF e o CoFe o material FM, com a espessura do material AF ( $t_{IrMn}$ ) variando de 5nm a 20nm. As camadas de 5nm de Ta e 15nm de Ru são empregadas como sementes, com objetivo de auxiliar no crescimento preferencial (111) do IrMn, enquanto a cobertura de 3nm de Ru é utilizada para prevenir oxidação.

Tais amostras foram produzidas através da técnica *magnetron sputtering*, na Unité Mixte de Physique CNRS/Thales, depositadas na ausência de campo magnético. Sua composição nominal consiste em: Ta(5nm)/Ru(15nm)/IrMn( $t_{IrMn}$ )/Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>(5nm)/Ru(3nm), foram esquematizadas na Figura 8.



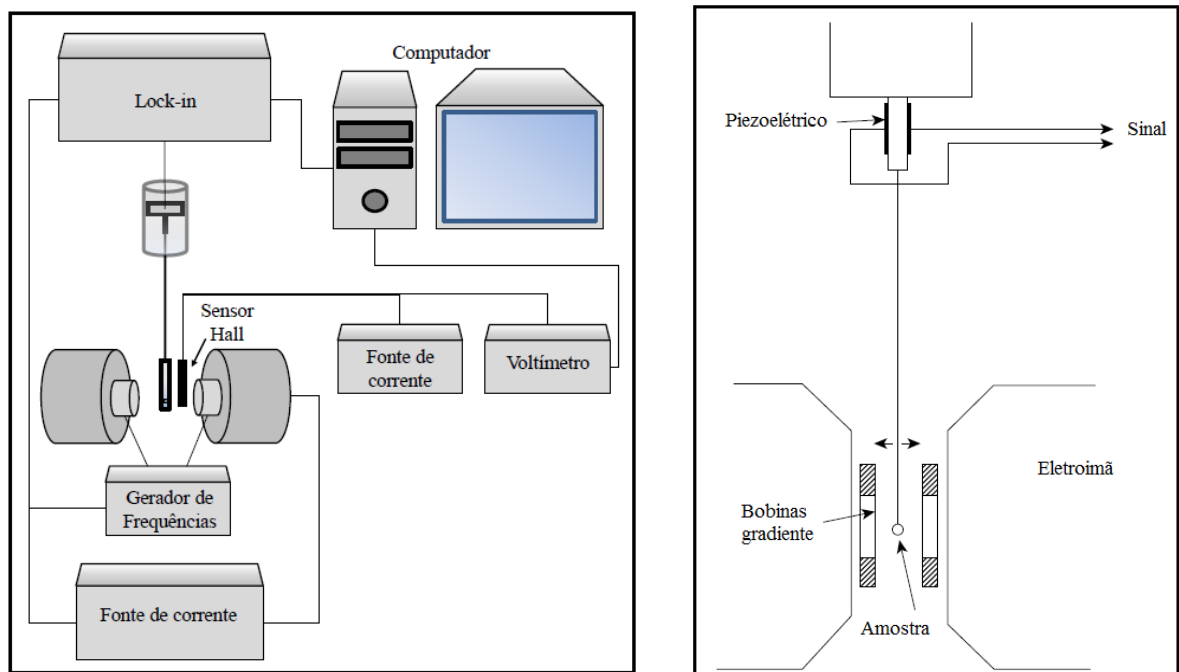
**Figura 8** – Esquematização das amostras.

As caracterizações magnéticas foram realizadas em dois grupos de amostras distintas: amostras como feitas e amostras submetidas a tratamento térmico. No segundo caso, as amostras foram aquecidas utilizando um forno a vácuo tubular convencional, localizado no laboratório de Implantação Iônica do Instituto de Física da UFRGS, da temperatura ambiente até 400 °C, também na ausência de campo magnético, durante um tempo de 3 horas e 50 minutos em pressão de  $2,5 \cdot 10^{-6}$  mbar. Após esse processo, foram resfriadas novamente até a temperatura ambiente.

### 3.2 O MAGNETÔMETRO GRADIENTE DE FORÇA ALTERNADA

Do inglês *Alternating Gradient Force Magnetometer* ou AGFM, [16] é um instrumento de medida de magnetização onde uma amostra é fixada na ponta de uma haste de vidro sendo submetida a um campo dc fixo e a um campo gradiente alternado, produzido por um par de bobinas de gradiente. Este campo gradiente produz uma força alternada na amostra, que gera uma oscilação na mesma, flexionando a haste de vidro. Se a frequência de oscilação do campo gradiente for a mesma frequência de ressonância do conjunto que forma a haste, a amplitude dessa vibração se eleva [6].

Essa vibração é convertida em sinal elétrico através da utilização de um cristal piezoelétrico que transforma deformação mecânica em voltagem. Logo, o sinal gerado pelo piezoelétrico é proporcional à magnetização da amostra, provocada pelo campo dc gerado por meio de eletroímã [6].



(a) Desenho esquemático do AGFM, onde os componentes necessários para seus funcionamento são destacados [11].

(b) Esquematização do Magnetômetro Gradiente de Força Alternada [6].

**Figura 9 – AGFM**

Esse sinal elétrico é lido e processado através de um computador, que gera as curvas de histerese para caracterização magnética das amostras. Para leitura do campo dc, se fez uso ainda de um sensor Hall.

O equipamento empregado para realização das medidas foi totalmente produzido no LAM, indicado na Figura 9, com sensibilidade da ordem de  $10^{-8}$  emu e pode caracterizar magneticamente estruturas de ordem nanométrica, como é o caso dos filmes finos analisados neste trabalho. [11, 12]

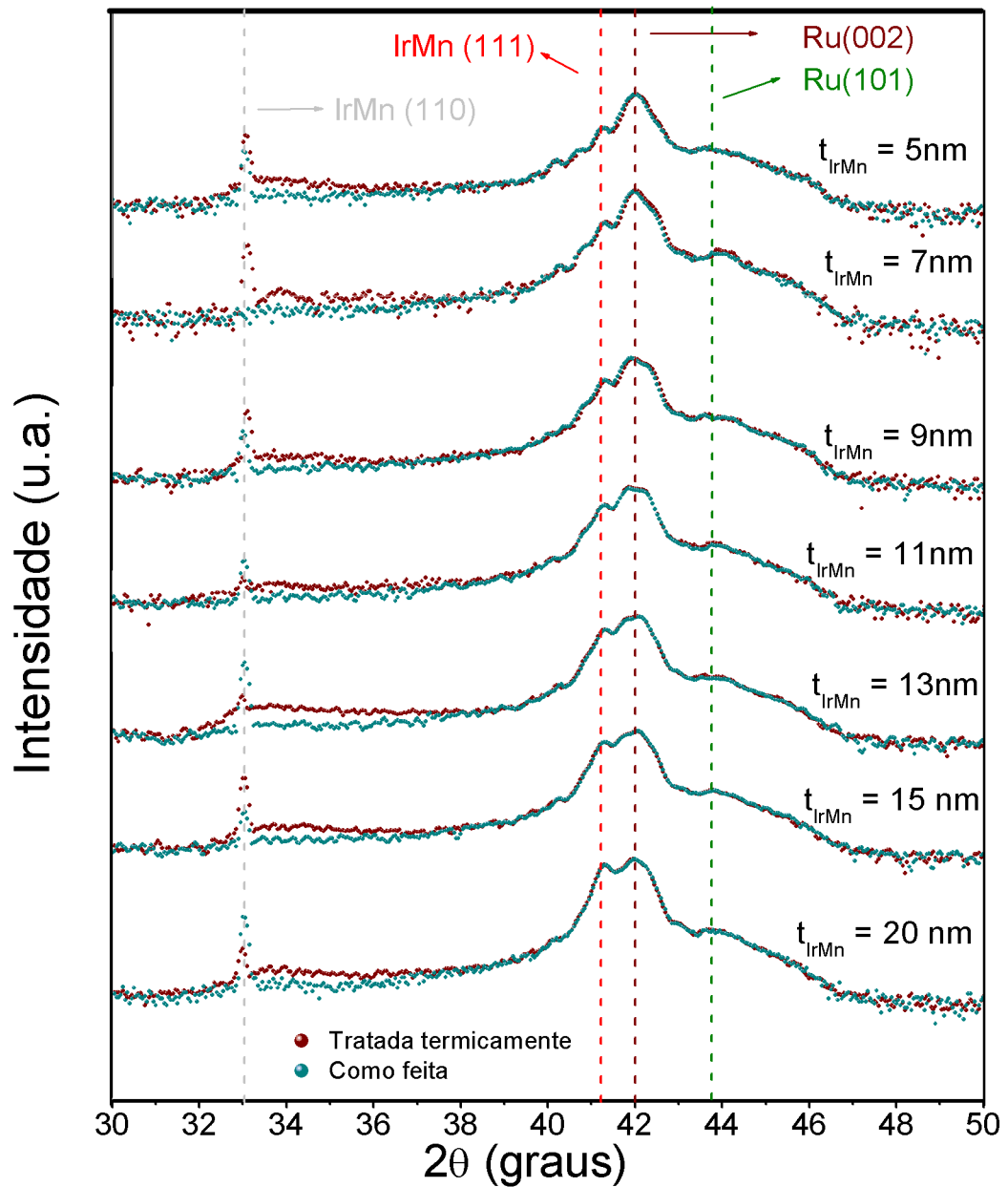


O AGFM foi utilizado para realizar as curvas de histerese, caracterizando magneticamente as amostras. Os campos  $H_{EB}$  e  $H_C$  foram determinados em função do tempo, no qual o filme fino foi exposto há campos magnéticos externos altos o suficiente para saturar o material FM, com sentido contrário ao campo  $H_{EB}$  da amostra, forçando desta maneira o alinhamento antiparalelo da magnetização da camada ferromagnética e do  $H_{EB}$ . Foram realizadas pelo menos duas medidas de histerese, em diferentes intervalos de tempo, para se obter os valores médios de *exchange bias* e coercividade para um total de aproximadamente 600 horas de medidas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

Para a verificação da estrutura cristalina das amostras estudadas, foi utilizada a técnica de difração de raio-x, através da radiação  $K_{\alpha}$  do Cu, cujo comprimento de onda é  $\lambda = 1,5418\text{\AA}$ , na configuração  $\theta - 2\theta$ . Os difratogramas obtidos para os diferentes filmes finos analisados são apresentados na Figura 10.



**Figura 10** – Difratogramas de raios-x das amostras com diferentes espessuras do espaçador AF ( $t_{IrMn}$ ) como feitas e após o tratamento térmico.

Foram observados quatro picos significativos no difratograma que se localizam em:  $2\theta = 33,0^\circ$ ;  $41,1^\circ$ ;  $42,0^\circ$ ; e  $43,7^\circ$ . Através da utilização do software *Crystallographica Search Match* (CSM), que realiza pesquisas em base de dados cristalográficos como o ICDD (*International Centre for Diffraction Data*), sendo possível comparar os ângulos que satisfazem a condição de difração obtida experimentalmente. Os dados extraídos de bases de dados, utilizados nesta comparação, estão especificados na Tabela 1 abaixo.

$2\theta$	Material	Plano
$32,8^\circ$	IrMn	(110)
$41,3^\circ$	IrMn	(111)
$42,1^\circ$	Ru	(002)
$44,0^\circ$	Ru	(101)

**Tabela 1** – Dados cristalográficos obtidos através do programa CSM.

Verificou-se que não houve modificações significantes no padrão de difração das amostras como feitas após o tratamento térmico. Além disso, observou-se a presença da estrutura cristalina (111) do material AF, cuja intensidade acentuou-se à medida que a espessura do IrMn ( $t_{IrMn}$ ) aumentou. A presença do plano (111) do IrMn é uma característica de estruturas cúbicas de face centrada que colabora para indução do EB na interface dos materiais FM/AF [13].

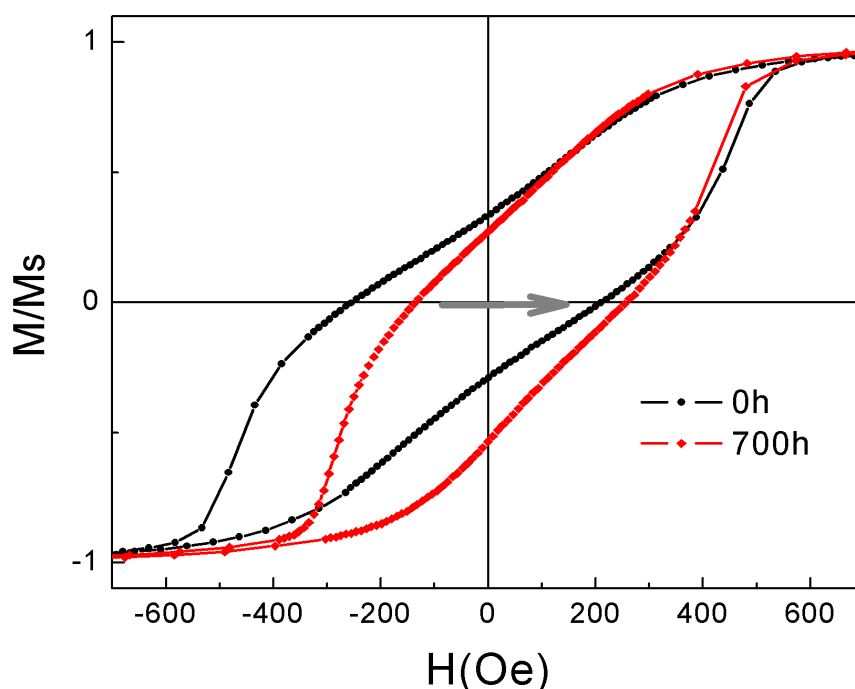
## 4.2 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA

Como já mencionado anteriormente, as caracterizações magnéticas foram realizadas em dois grupos: amostras como feitas e amostras submetidas a tratamento térmico. Esta seção do trabalho será dividida em duas partes, onde demonstrará os resultados obtidos para cada uma das séries de amostras serão apresentados.

### 4.2.1 Amostras como feitas

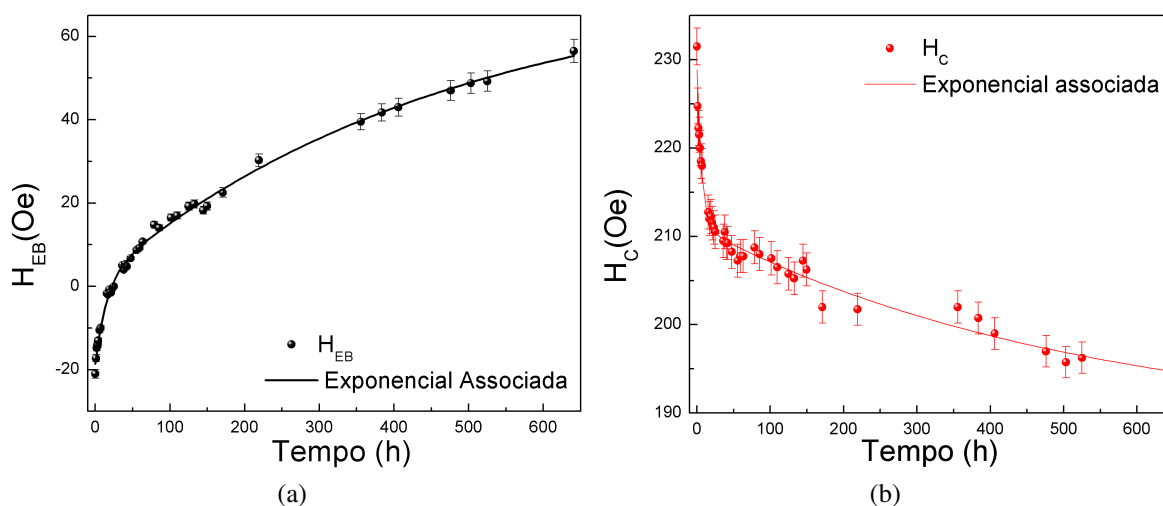
A primeira série de medidas foi realizada em amostras como feitas, que não foram depositadas na presença de campo magnético, ou seja, sem terem sido expostas a qualquer efeito de ativação do *Exchange Bias*. Ainda assim, mesmo que pequenos ( $H_{EB} \approx -20$  Oe), foi possível observar deslocamentos nas curvas de histereses para essas amostras. Após a realização das primeiras curvas de histerese para verificar o estado inicial da amostra, esta foi mantida em um campo magnético externo de aproximadamente 1kOe, antiparalelo ao sentido do campo  $H_{EB}$ , por quase de 600 horas. Foi possível observar modificações significativas nos laços de histerese (Figura11).

Constatou-se um aumento de aproximadamente 80 Oe no  $H_{EB}$ , além de uma variação no campo coercivo  $H_C$  de aproximadamente 40 Oe. As variações temporais do  $H_{EB}$  e do  $H_C$  podem ser verificadas na Figura 12. É possível observar um crescimento exponencial de  $H_{EB}$  e um



**Figura 11** – Curvas de histerese para a amostra de IrMn(20nm)/CoFe antes e após cerca de 700 horas imersa em campo magnético de aproximadamente 1kOe.

decaimento do  $H_C$  em relação ao tempo. Após 20 horas submetida a altos campos magnéticos, o efeito de EB foi suprimido e o campo  $H_{EB}$  tornou-se nulo nesta amostra.

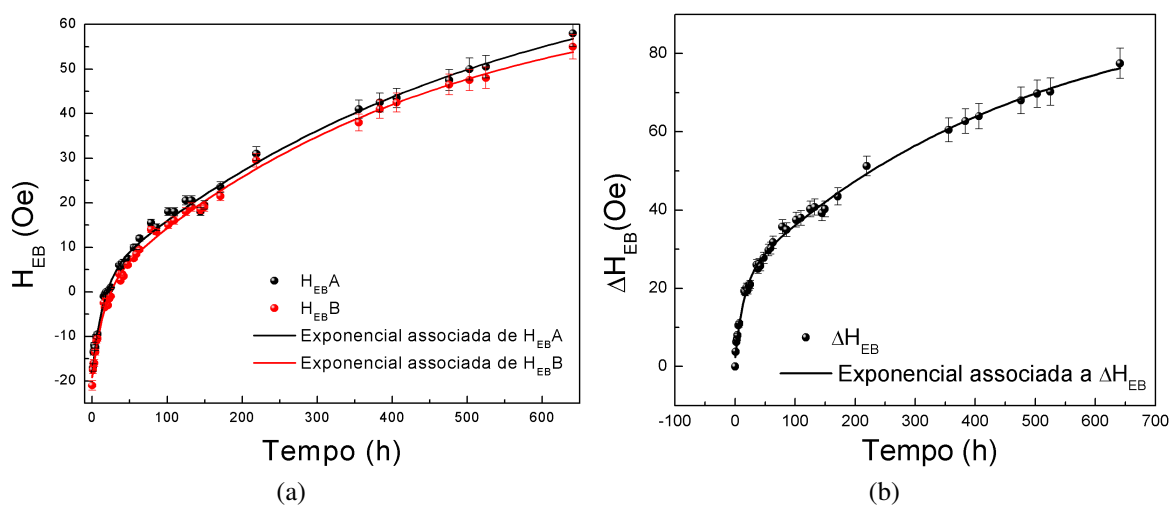


**Figura 12** – Evolução temporal do  $H_{EB}$  em (a) e decaimento do  $H_C$  em função do tempo em (b) para a amostra IrMn(20nm)/CoFe. Os dados obtidos experimentalmente são representados pelos pontos. As linhas sólidas foram obtidas através do ajuste exponencial dos dados experimentais.

Outra característica que deve ser considerada neste estudo é o efeito de treinamento. Analisando a evolução temporal do *Exchange Bias* para as diferentes curvas de histerese medidas consecutivamente, foi possível notar uma pequena diferença no campo  $H_{EB}$  entre a primeira

medida de magnetização (medida A) e a segunda curva de histerese realizada (medida B). Esta diferença se acentua com o tempo de exposição a altos campos magnéticos, conforme Figura 13a.

Na Figura 13b é demonstrada a variação do campo  $H_{EB}$  em função do tempo, independente de seu sentido. O valor de  $\Delta H_{EB}$  é obtido ao se tomar os valores absolutos da diferença entre cada valor de  $H_{EB}$  medidos em determinado instante de tempo e o  $H_{EB\text{inicial}}$ . Ao término da medida, após quase 700 horas, a variação  $\Delta H_{EB}$  não se estabiliza, apresentando tendência de crescimento.



**Figura 13** – Evolução temporal do  $H_{EB}$  nas medidas distintas A e B em (a). Em (b) é analisada a variação  $\Delta H_{EB}$  em função do tempo. Ambos para a amostra IrMn(20nm)/CoFe. Os dados obtidos experimentalmente são representados pelos pontos. As linhas sólidas foram obtidas através do ajuste exponencial dos dados experimentais.

Apesar de não ter passado por nenhum processo de ativação do efeito de EB, acredita-se que este efeito se manifesta em tais amostras devido a alta magnetização remanente  $M_R$  que elas apresentam, resultado do processo de medida, podendo ser responsável pela indução do  $H_{EB}$  [13]. Além de possuir um pequeno  $H_{EB}$ , tal amostra apresentou comportamento metaestável do Exchange Bias.

Para as amostras como feitas foi possível realizar apenas uma reversão magnética devido a limitações do instrumento de medida utilizado. É necessário que se façam mais experimentos para saber se a evolução temporal do  $H_{EB}$  e do  $H_C$  é reversível ou não.

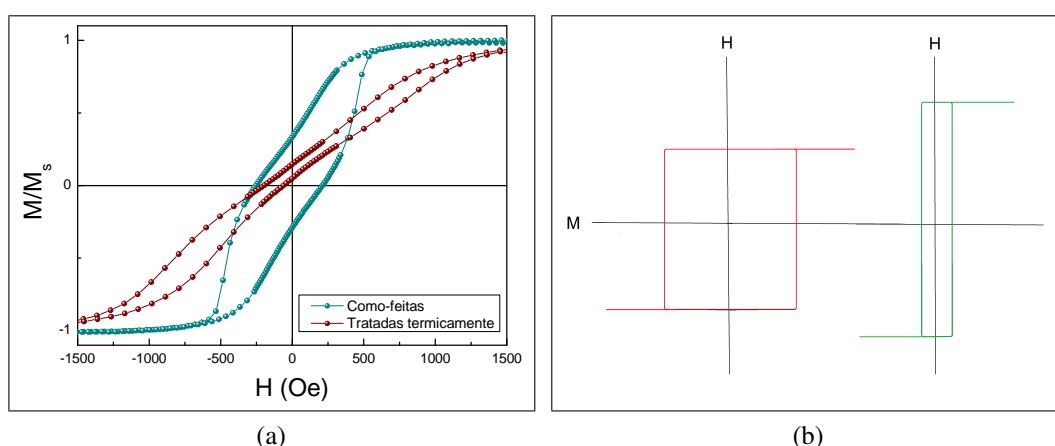
#### 4.2.2 Amostras tratadas termicamente

O segundo grupo de amostras caracterizadas magneticamente se trata de filmes finos que passaram por tratamento térmico na ausência de campo magnético externo. Para esta série foi possível analisar a variação dos valores de  $H_{EB}$  e  $H_C$  para duas reversões magnéticas. Na

primeira reversão, similar ao que foi feito com as amostras como produzidas, o campo externo é aplicado no sentido oposto ao campo  $H_{EB}$ . Na segunda reversão, o sinal do campo magnético externo é invertido, e a reversibilidade deste processo é analisada.

Na Figura 14 é possível visualizar uma comparação entre a curva de histerese para uma amostra como feita e para a mesma amostra após submetida a tratamento térmico a  $400^\circ\text{C}$ . Nota-se que este processo ocasionou uma variação de aproximadamente 100 Oe no campo  $H_{EB}$  desta amostra, acentuando, o deslocamento da curva de histerese, enquanto o campo coercivo  $H_C$  reduziu cerca de 160 Oe.

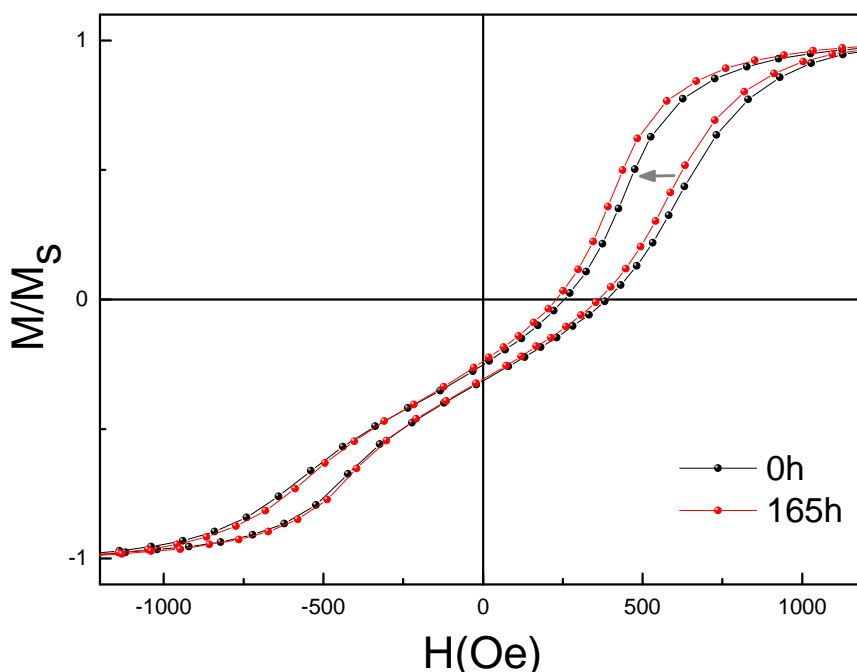
O novo formato da curva de histerese evidencia a formação de duas fases magnéticas distintas no filme fino, induzido pelo tratamento térmico, sendo uma dessas fases magnética macia e outra dura. Essas fases magnéticas estão esquematizadas separadamente na Figura 14b. Além disso, nas amostras tratadas foi mais difícil atingir a magnetização de saturação, sendo necessária a aplicação de campos mais altos para que  $M_S$  fosse alcançada.



**Figura 14** – Na Figura 14a, têm-se as curvas de histerese para amostra IrMn(20nm)/CoFe como feita e após tratamento térmico. Em (b) é demonstrado um esquema que exhibe as duas fases magnéticas desse material separadamente, onde a histerese em vermelho representa a fase de difícil magnetização e a fase em verde representa a fase de fácil magnetização.

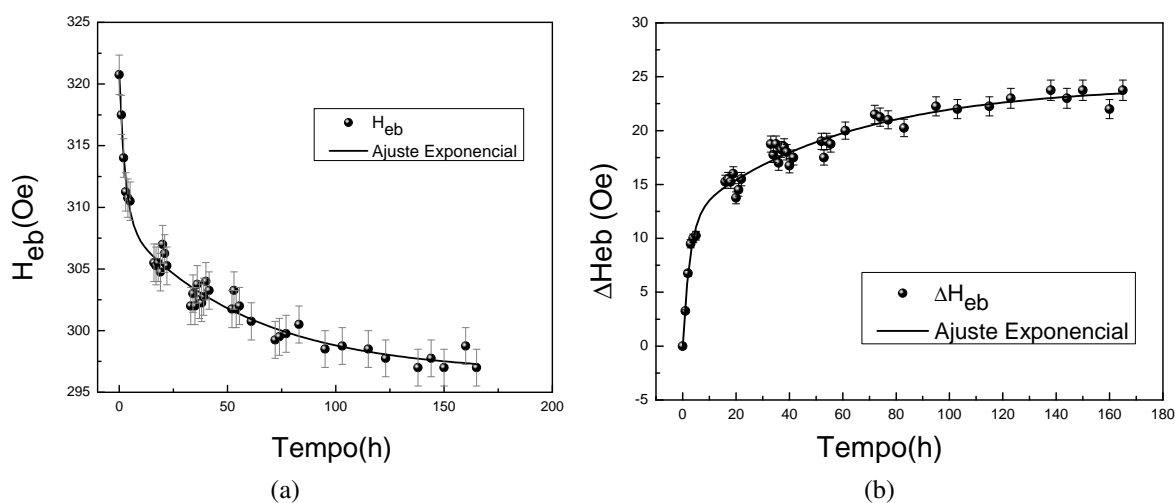
Posteriormente, foi feito o estudo da evolução temporal do  $H_{EB}$  e do  $H_C$  das amostras tratadas, similarmente ao procedimento utilizado para as amostras como feitas. É possível inferir modificações na curva de histerese medida no início do procedimento e após 165 horas sob efeito do campo magnético externo. Essas variações foram mais evidentes em uma das fases magnéticas do material que em outra. Tais resultados podem ser observados na Figura 15

É plausível constatar que, diferentemente dos resultados obtidos para as amostras como feitas, o campo EB apresentou um decaimento com relação ao tempo, como é analisado nos gráficos da Figura 16. Isso ocorre pois o valor de  $H_{EB}$  para esta amostra é positivo, enquanto para a amostra como feita analisada anteriormente, o valor de  $H_{EB}$  era negativo. Analisando a variação  $\Delta H_{EB}$  na Figura 16b, independente do sinal de  $H_{EB}$ , nota-se que essa variação em



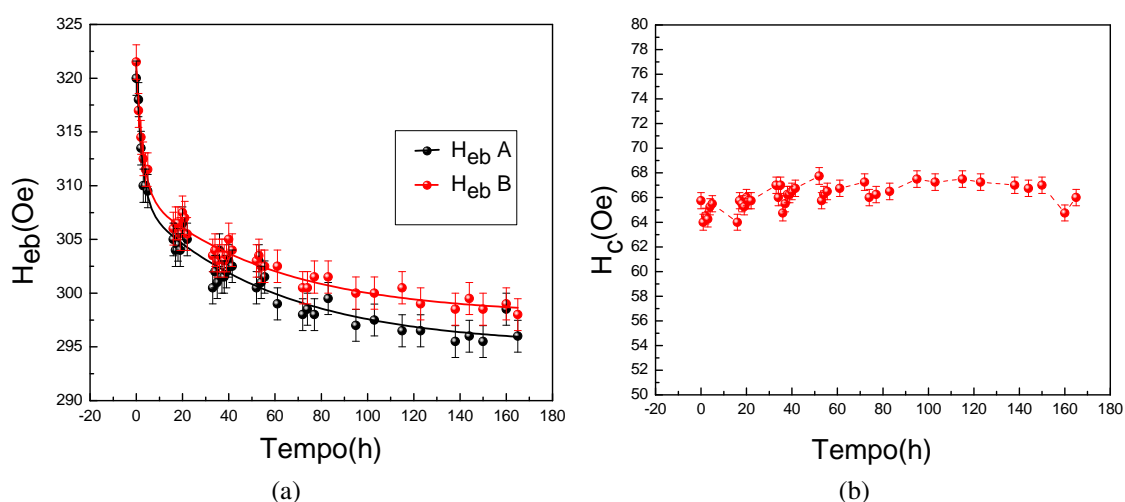
**Figura 15** – Curvas de histerese para a amostra de IrMn(9nm)/CoFe antes e após cerca de 165 horas imersa em campo magnético.

função do tempo foi menor do que no caso das amostras como feitas. Nas primeiras 10 horas de medida o valor de  $H_{EB}$  variou rapidamente, tornando mais estável a partir de então. O mesmo não ocorreu com as amostras como feitas, que apresentaram característica mais instáveis. Nos dois casos, a variação de campo de *exchange bias* com relação ao tempo apresentou tendência exponencial. A magnetização reversa às quais foram submetidas as amostras, tanto como feitas quanto tratadas, provocou um decaimento do exchange bias com tempo.



**Figura 16** – Evolução temporal do  $H_{EB}$  em (a) e variação do campo  $H_{EB}$  em relação ao tempo em (b), para a amostra IrMn(9nm)/CoFe após tratada termicamente.

Na Figura 17a está ilustrada a evolução do campo de *exchange bias* para as medidas A e



**Figura 17** – Evolução temporal do  $H_{EB}$  nas medidas distintas A e B em (a), no qual os dados obtidos experimentalmente são representados pelos pontos. As linhas sólidas foram extraídas através do ajuste exponencial dos dados experimentais. O campo coercivo  $H_C$  em função do tempo em visualizado em (b). Ambos os gráficos são referentes a amostra IrMn(9nm)/CoFe tratada termicamente.

B em função do tempo. O efeito de treinamento é ressaltado novamente nas medidas. Muitas destas medidas realizadas para cálculo de  $H_{EB}$  e  $H_C$  tiveram que ser repetidas bem mais que duas vezes pois, dentre outros fatores, havia a necessidade de campos mais altos para saturar magneticamente o material e nem sempre essa magnetização  $M_S$  era atingida nas duas primeiras medidas.

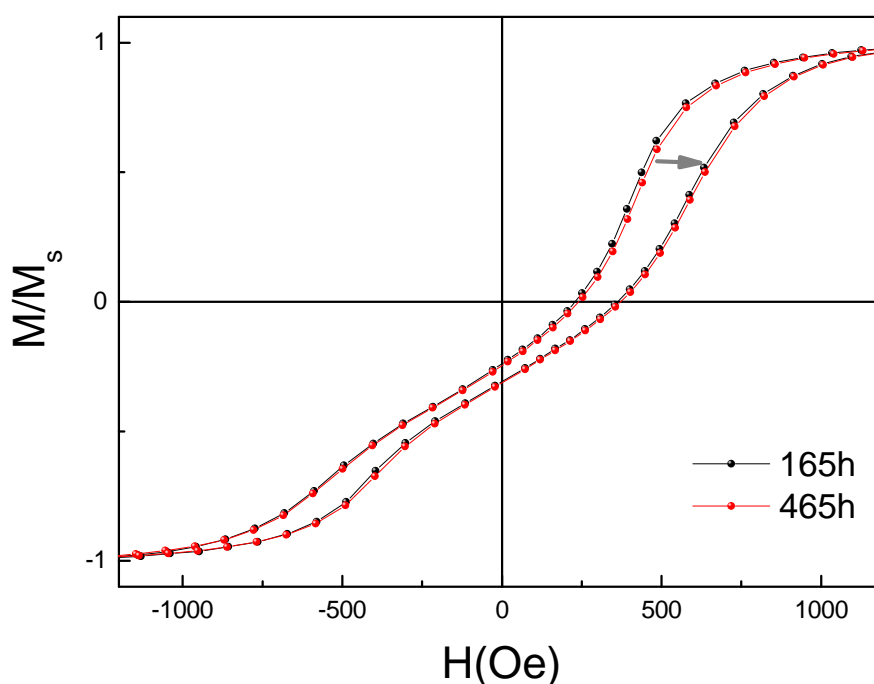
Outro fato interessante é expresso no gráfico da Figura 17b, que revela a variação do campo  $H_C$  com o tempo. Para as amostras tratadas a coercividade não variou consideravelmente, indicando que o tratamento térmico agiu estabilizando a coercividade do sistema.

Ao atingir 165 horas imersa em campo magnético antiparalelo ao campo de  $H_{EB}$  das amostras, foi realizada uma nova reversão de campo magnético onde seu sinal foi invertido. A amostra ficou imersa em campo magnético por volta de 300 horas após a reversão do campo. Analisando a Figura 18, foi possível constatar que houve mudanças na curva de histerese do material neste intervalo de tempo, ainda que pequenas, deslocando a curva de histerese novamente para campos positivos.

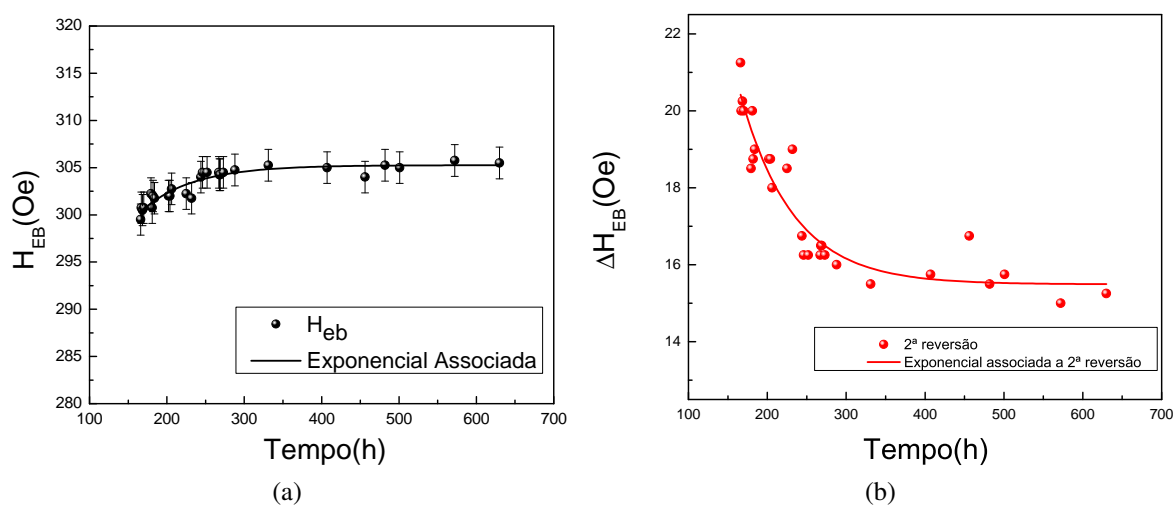
A evolução do campo de  $H_{EB}$  também foi menor para a segunda reversão magnética, como pode ser analisado na Figura 19a. A variação do efeito de *exchange bias* demonstrada no gráfico da Figura 19b diminuiu com o tempo, praticamente estabilizando após quase 300 horas da reversão de campo magnético, revelando que este tenta reverter as modificações ocorridas durante a primeira reversão de campo, buscando alcançar novamente os valores iniciais de  $H_{EB}$ .

Na Figura 20a são ilustradas as pequenas diferenças na evolução do  $H_{EB}$  para as medidas A e B utilizadas ao se computar parâmetros de interesse, revelando a influência do efeito de





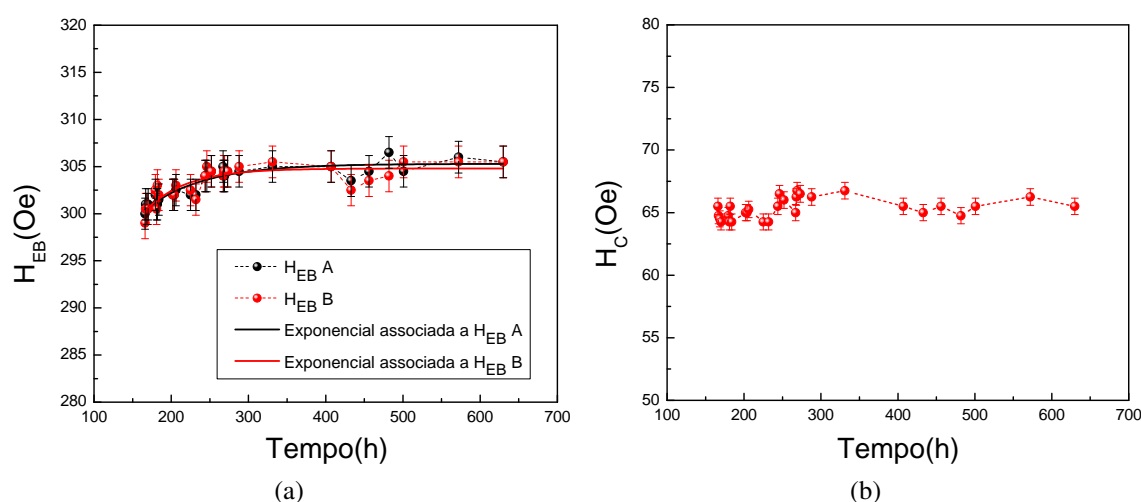
**Figura 18** – Curvas de histerese para a amostra de IrMn(9nm)/CoFe antes e após cerca de 300 horas imersa em campo magnético, após reversão deste campo.



**Figura 19** – Evolução temporal do  $H_{EB}$  em (a) e variação do campo  $H_{EB}$  em relação ao tempo em (b), para a amostra IrMn(9nm)/CoFe após tratada termicamente, na segunda reversão magnética.

treinamento sobre as medidas. As variações sofridas pela coercividade das amostras foram muito pequenas, como já havia sido observada na primeira reversão magnética. Logo se pode inferir que o campo  $H_C$  se mantém quase constante nas duas reversões magnéticas realizadas.

Para efeito de comparação, os gráficos referentes a evolução do *exchange bias*, o campo coercivo em função do tempo e a variação do campo  $H_{EB}$ , obtidos na primeira e segunda reversão magnética, foram colocados novamente no mesmo gráfico, exposto na Figura 21.



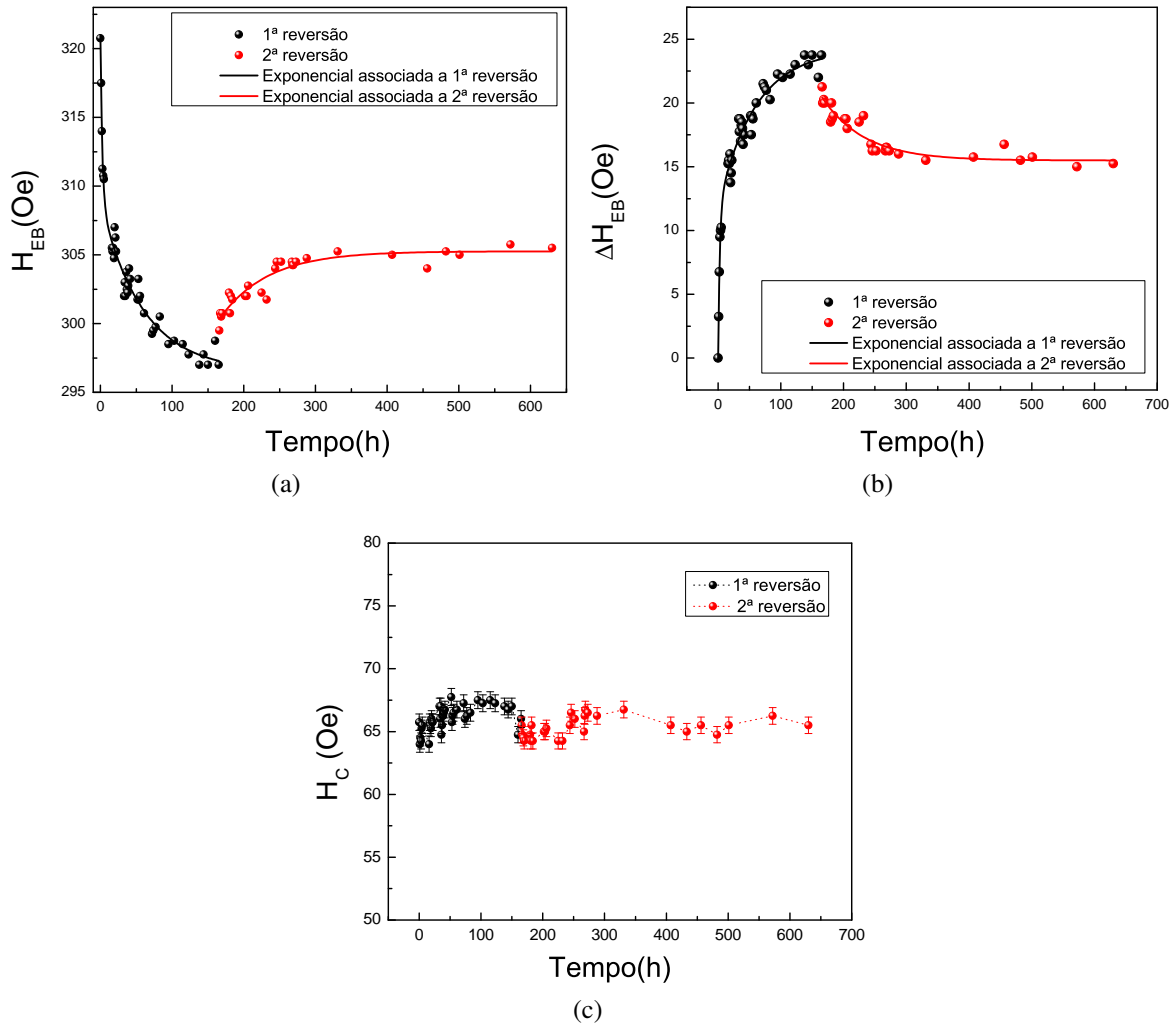
**Figura 20** – Evolução temporal do  $H_{EB}$  nas medidas distintas A e B em (a), no qual os dados obtidos experimentalmente são representados pelos pontos. As linhas sólidas foram extraídas através do ajuste exponencial dos dados experimentais. O campo coercivo  $H_C$  em função do tempo em visualizado em (b). Ambos os gráficos são referentes a amostra IrMn(9nm)/CoFe tratada termicamente, durante a segunda reversão magnética.

Outra característica a respeito da evolução temporal do *exchange bias* é demonstrada na Figura 22, que exhibe o valor de  $\Delta H_{EB}$  em função do tempo. Para diferentes espessuras do material antiferromagnético, as curvas adquirem formatos diferentes, além de possuírem uma diferença na variação máxima para cada espessura.

A dependência temporal do *exchange bias* pode ser explicada através do modelo de relaxamento de dois níveis de energia. Nesse modelo, a camada AF é considerada como agrupamento de pequenas partículas que não interagem entre si, mas estão acopladas com os momentos magnéticos da camada FM adjacente [17].

Os grãos que formam o material AF variam em tamanho e forma, podendo existir diferentes anisotropias e energias de acoplamento. Desta maneira, a dependência temporal do processo não pode ser descrita por uma única barreira de energia e um único tempo de relaxamento, mas por uma distribuição de barreiras de energia. As partículas do AF necessitam de várias energia de ativação para superar essas barreiras e diminuir sua energia, que resulta no alinhamento de seus momentos paralelos à magnetização FM [17].

A evolução do  $H_{EB}$  em função do tempo foi ajustada a curvas resultantes das somas de exponenciais com erro experimental abaixo de 10%. Os resultados obtidos estão de acordo com a literatura, uma vez que essa variação temporal não pode ser descrita por uma única função exponencial, indicando a existência de um conjunto de domínios não idênticos na camada AF do material. Esse conjunto de domínios resulta na distribuição  $\tau$  [18]. Desta maneira, a dependência



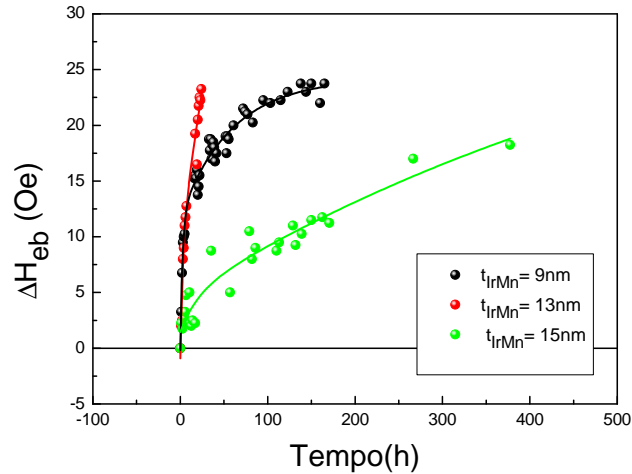
**Figura 21** – Evolução temporal do  $H_{EB}$  (a), variação do campo  $H_{EB}$  em função do tempo em (b) e modificações do campo coercivo  $H_C$  em (c) para a primeira e segunda reversão magnética da amostra IrMn(9nm)/CoFe (nas cores preto e vermelho respectivamente), após mais de 600 horas de medidas, no qual os dados obtidos experimentalmente são representados pelos pontos. As linhas sólidas foram extraídas através do ajuste exponencial dos dados experimentais.

temporal de  $H_{EB}$  pode ser dada por:

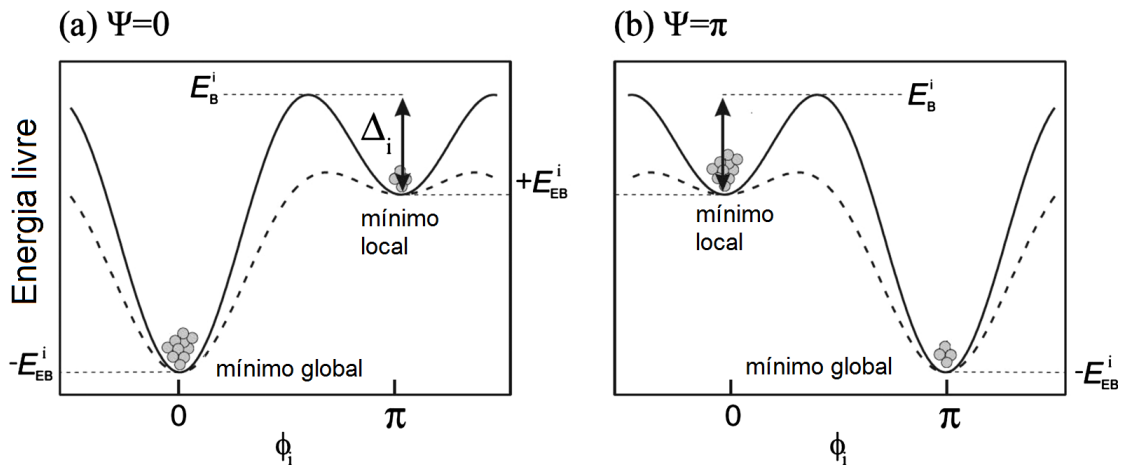
$$H_{EB}(t) = e^{-t/\tau} \quad (4.1)$$

O valor de  $\tau$  depende de parâmetros como a área do domínio AF, barreira de energia, constantes de anisotropia  $K_F$  e  $K_{AF}$  do material FM e AF, respectivamente, as espessuras das camadas FM e AF, energia de EB, entre outros fatores [18]. Na Figura 23 há um esquema que explica o modelo de relaxamento de dois níveis de energia.

É possível observar na Figura 23 a existência de mínimos locais e globais de energia. Para grãos que se encontram em estado de mínimo local de energia, sua configuração pode ser alterada com pequenas flutuações térmicas. Mas se os grãos estiverem localizados em mínimos



**Figura 22** –  $\Delta H_{EB}$  em função do tempo para a amostra tratada termicamente e valores de  $t_{IrMn}$  iguais a 9nm, 13nm e 20nm.



**Figura 23** – Modelo de relaxamento de dois níveis de energia. A energia livre por grão como função do ângulo entre momentos interfaciais não compensados da camada AF e a direção de magnetização FM com anisotropia unidirecional em  $\sigma = 0$  e  $\sigma = \pi$  [19].

globais de energia, apenas flutuações de altas amplitudes devem retirar o sistema deste estado de energia mínima [13].

Na segunda reversão magnética, os grãos interfaciais tentam retornar a sua configuração inicial; isso só ocorre se estes se encontram em um estado de mínimo local de energia. O tratamento térmico age aumentando a energia de ativação dos grãos, conseqüentemente, mais partículas AF podem superar a barreira energética.

## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a variação do campo de *Exchange Bias* em filmes finos de IrMn/CoFe com espessura variável do IrMn, com objetivo de analisar a estabilidade deste efeito quando submetido a altos campos magnéticos. Uma série de medidas de magnetização foram realizadas em dois grupos de amostras: como feitas e tratadas termicamente.

A caracterização magnética foi realizada por meio da utilização de um Magnetômetro Gradiente de Força Alternada (AGFM), disponível nas instalações do Laboratório de Magnetismo do Instituto de Física da UFRGS. Devido a limitações deste equipamento, foram encontradas algumas dificuldades para realização das medidas de histerese. Para se estudar a evolução temporal de  $H_{EB}$  nos filmes finos, as amostras devem permanecer por muitas horas imersas em um campo magnético que era gerado pelos eletroímãs do AGFM. As medidas levam cerca de um mês para serem realizadas completamente, mas neste intervalo de tempo ocorriam inúmeras interrupções de energia elétrica, ocasionando perda de dados, e horas de medidas tinham que ser descartadas.

Apesar das dificuldades encontradas na realização deste trabalho, foram encontrados alguns resultados interessantes. No caso das amostras como feitas, foi observado a existência de um pequeno campo de *exchange bias*. Acredita-se que este deslocamento em campo da curva de histerese tenha sido ocasionado devido a alta magnetização remanente das amostras resultado do processo de medida. Ao analisar a evolução deste campo, quando submetido a altos campos magnéticos, constatou-se uma variação de aproximadamente 80 Oe de campo  $H_{EB}$ , enquanto o campo coercivo diminuiu cerca de 40 Oe, evidenciando características de metaestabilidade do *Exchange Bias*. O campo  $H_{EB}$  chegou a anular-se após 26 horas submetido a campo magnético intenso. Devido as limitações no processo de medida citadas anteriormente, não foi possível fazer a segunda reversão magnética para tais amostras, não sendo permitido determinar a reversibilidade deste processo de variação do *exchange bias* com o tempo.

Para as amostras tratadas termicamente, houve um decréscimo de pouco mais que 20 Oe no campo de  $H_{EB}$ , enquanto o campo coercivo manteve-se quase constante, oscilando aproximadamente 4 Oe em torno de seu valor inicial. Foi realizada uma segunda reversão magnética, na qual o *exchange bias* aumentou por volta de 7 Oe, enquanto não houve modificações significativas para o campo coercivo, caracterizando assim a irreversibilidade da evolução temporal do *exchange bias* para as amostras tratadas.

Dentre os principais resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Altos campos magnéticos podem mudar drasticamente o comportamento do efeito, podendo suprimir o efeito em algumas horas, como ocorreu para o primeiro grupo de amostras estudado.

- O tratamento térmico, mesmo na ausência de campo magnético externo, permitiu maior estabilidade do efeito de EB, tornando quase constante a coercividade do sistema, antes variável.
- A reversão magnética forçada da camada ferromagnética, em sistemas onde há acoplamento FM/AF resultando na manifestação do *Exchange Bias*, pode levar a diminuição do campo de  $H_{EB}$ .
- O alinhamento não paralelo entre o campo  $H_{EB}$  e a magnetização da camada ferromagnética tem importante influência sobre a estabilidade do efeito de *Exchange Bias*.
- A distribuição dos domínios no material antiferromagnético é necessário para descrever a variação do  $H_{EB}$  em função do tempo.

O próximo passo na realização desta pesquisa será construir um mecanismo onde as amostras relaxem em campo magnético produzido por um ímã permanente, não dependendo mais do eletroímã do AGFM. A partir destas modificações será possível obter mais informações sobre a evolução do *exchange bias* em filmes finos, que não foram possíveis de se obter nesta etapa do trabalho, como por exemplo:

- reversibilidade de  $H_{EB}$  e  $H_C$  nas amostras como feitas.
- relacionar a forma da evolução temporal do *exchange bias* com a variação da espessura da camada AF.

Outro importante passo será aumentar o número de curvas de histerese realizadas para se calcular o  $H_{EB}$  e  $H_C$  médio. Desta forma será possível entender como o efeito de treinamento afeta a evolução do *exchange bias* em função do tempo.

## REFERÊNCIAS

- 1 MEIKLEJOHN, W. H.; BEAN, C. P. New magnetic anisotropy. **Physical review**, APS, v. 102, n. 5, p. 1413, 1956.
- 2 MEIKLEJOHN, W. H.; BEAN, C. P. New magnetic anisotropy. **Physical Review**, APS, v. 105, n. 3, p. 904, 1957.
- 3 NOGUÉS, J.; SCHULLER, I. K. Exchange bias. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Elsevier, v. 192, n. 2, p. 203–232, 1999.
- 4 ASHCROFT, N.; MERMIN, N. **Solid State Physics**. [S.l.]: W.B. Saunders Co., 1976.
- 5 KITTEL, C. **Introdução à Física do Estado Sólido, 8ª Ed.** [S.l.]: LTC, Rio de Janeiro, 2006.
- 6 CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- 7 PUREUR, P. **Estado Sólido**. [S.l.]: Instituto de Física-UFRGS, 2001.
- 8 COEY, J. M. D. **Magnetism and Magnetic Materials**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- 9 GUIMARÃES, A. P. **Magnetism and magnetic resonance in solids**. [S.l.]: Wiley, 1998.
- 10 ZABEL, H.; BADER, S. D. **Magnetic heterostructures: advances and perspectives in spinstructures and spintransport**. [S.l.]: Springer Verlag, 2008.
- 11 OLIVEIRA, A. H. d. **Curvas de remanência de sistemas que apresentam exchange bias**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- 12 NICOLODI, S. **Estudo do Exchange Bias em filmes de IrMn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co e IrMn/Cr/Co**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- 13 CICHELERO, R. **Análise micromagnética e desenvolvimento computacional aplicados a sistemas que apresentam acoplamento de troca**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- 14 BINEK, C. Training of the exchange-bias effect: A simple analytic approach. **Physical Review B**, APS, v. 70, n. 1, p. 014421, 2004.
- 15 RADU, F.; ZABEL, H. Exchange bias effect of ferro-/antiferromagnetic heterostructures. In: **Magnetic heterostructures**. [S.l.]: Springer, 2008. p. 97–184.
- 16 FLANDERS, P. An alternating-gradient magnetometer. **Journal of Applied Physics**, AIP Publishing, v. 63, n. 8, p. 3940–3945, 1988.
- 17 PAETZOLD, A.; RÖLL, K. Thermally activated self-alignment of exchange coupling in nio/nife bilayers. **Journal of applied physics**, AIP Publishing, v. 91, n. 10, p. 7748–7750, 2002.
- 18 HEIJDEN, P. Van der et al. Thermally assisted reversal of exchange biasing in nio and femn based systems. **Applied physics letters**, v. 72, n. 4, p. 492, 1998.

---

19 EHRESMANN, A. et al. Thermal exchange bias field drift in field cooled mn<sub>83</sub>ir<sub>17</sub>/co<sub>70</sub>fe<sub>30</sub> thin films after 10 keV He ion bombardment. **Journal of Applied Physics**, AIP Publishing, v. 109, n. 2, p. 023910, 2011.