



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA TEÓRICA E EXPERIMENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

PROPRIEDADES MAGNÉTICAS E
MAGNETORRESISTÊNCIA EM FILMES FINOS DE
 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

CRISTOVÃO PORCIANO DO NASCIMENTO JÚNIOR

NATAL-RN
JUNHO 2013

CRISTOVÃO PORCIANO DO NASCIMENTO JÚNIOR

PROPRIEDADES MAGNÉTICAS E
MAGNETORRESISTÊNCIA EM FILMES FINOS DE
 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$

*Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Departamento de Física Teórica e Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial para a obtenção do grau de **mestre** em Física.*

Orientador: Professor Dr. Felipe Bohn

NATAL-RN
JUNHO 2013

Dissertação de Projeto Final de Mestrado sob o título “*Propriedades Magnéticas e Magnetorresistência em Filmes Finos de Ni₈₁Fe₁₉*”, defendida por Cristovão Porciano do Nascimento Júnior e aprovada em 18 de Junho de 2013, em Natal, Estado do Rio Grande do Norte, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Felipe Bohn
Orientador

Prof. Dr. Marcio Assolin Corrêa
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Lucio Strazzabosco Dorneles
Universidade Federal de Santa Maria

Dedico este trabalho aos meus pais, Cristovão e Maria de Lourdes. A minha esposa, Maria de Lourdes e aos meus filhos, Mateus e Sofia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, aos meus pais, a minha esposa Maria de Lourdes (Dilú), aos meus irmãos Misteilor e Moabe, aos meus tios e tias, aos meus primos e aos meus avós que contribuíram diretamente ou indiretamente e apoiaram desde o início da graduação.

Aos meus filhos Mateus e Sofia, a Mateus pelos sorrisos carismáticos que conquista qualquer um e a Sofia que apesar de ainda está na barriga já é muito querida.

Ao meu orientador Dr. Felipe Bohn que me deu a oportunidade de ser orientando de mestrado, pela imensa paciência que teve comigo e pelas críticas feitas sempre aumejando a melhoria do trabalho e o meu crescimento como pesquisador.

Aos professores: Álvaro Ferraz, Dory Hélio, Márcio Assolin, Gandhi e Luciano Rodrigues que contribuíram com a minha formação acadêmica durante o mestrado.

A Thiago José de Almeida Mori, por ter cedido as amostras analisadas neste trabalho.

Ao professor Alexandre Barbosa de Oliveira e ao seu aluno de iniciação científica Abner pelos ensinamentos sobre a utilização do equipamento de magnetorresistência.

Aos amigos do LNMS, Ubiratam (Bira), Kennedy, Thatyara, Sérgio, Tibério, e a todos os outros que fazem parte do laboratório, pelas lições no dia-a-dia.

Aos amigos da pós-graduação, Francisco (Chico), Carlene, Tharcísyo, Nyladih, Gladstone, Edi, Pierre, Kelder, Crislane, Dr. Reben, Carlos Magno, Jefferson, Eliângela, Eloise, Bruno, Danilo, Brunão, Leonardo, Madson, Jânio, Heydson, Cesar, Mateus e muitos outros amigos que me apoiaram nesse trabalho.

As minhas amigas Izabel, Tiely e Aline Viviane pelas conversas descontraídas e motivadoras.

A Silvestre funcionário da biblioteca pelas conversas de corredores, a Celina secretária da coordenação da pós-graduação de física pelo apoio em situações administrativas.

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante essa jornada de trabalho.

Saibam que todos vocês contribuíram para que esse trabalho fosse concluído com sucesso.

Muito grato a todos vocês!

(Cristovão Júnior)

*Nunca amanheça o seu dia desejando fazer o mal a alguém,
porque amanhã você pode precisar da mesma.*

(Cristovão Júnior)

Resumo

Os materiais ferromagnéticos exercem um papel importante no desenvolvimento de diversos dispositivos eletrônicos e têm grande importância na medida que os mesmos podem determinar a eficiência, o custo e o tamanho dos dispositivos. Por este motivo, muitas das investigações científicas têm, atualmente, se concentrado no estudo de materiais em escalas cada vez menores, a fim de entender e controlar melhor as propriedades dos sistemas nanoscópios, ou seja, com dimensões da ordem de 10^{-9} m, tais como filmes finos ferromagnéticos.

Nesse trabalho, são analisadas as propriedades estruturais e magnéticas e o efeito da magnetorresistência em filmes finos ferromagnéticos de *Permalloy* produzidos por *magnetron sputtering*. Neste caso, visto que o efeito da magnetorresistência é dependente das interfaces dos filmes finos, este trabalho é dedicado ao estudo da magnetorresistência em amostras de *Permalloy* com configurações nominais de: Ta[4nm]/Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/Py[16nm]/O₂/Ta[4nm], Ta[4nm]/O₂/Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/O₂/Py[16nm]/O₂/Ta[4nm], na condição de como feitas e submetidas a tratamentos térmicos com temperaturas de 160°C, 360°C e 460°C, a fim de verificar a influência da inserção das camadas de O₂ na estrutura das amostras e de tratamentos térmicos realizados após a produção das amostras. Os resultados obtidos são interpretados em termos da estrutura das amostras, tensões residuais armazenadas durante a deposição, tensões induzidas pelos tratamentos térmicos e anisotropias magnéticas.

Palavras chave: *Filmes finos, Permalloy, materiais ferromagnéticos, magnetorresistência anisotrópica.*

Abstract

The ferromagnetic materials play an important role in the development of various electronic devices and, have great importance insofar as they may determine the efficiency, cost and, size of the devices. For this reason, many scientific researches are currently focused on the study of materials at ever smaller scales, in order to understand and better control the properties of nanoscale systems, i.e. with dimensions of the order of nanometers, such as thin film ferromagnetic. In this work, we analyze the structural and magnetic properties and magnetoresistance effect in Permalloy-ferromagnetic thin films produced by magnetron sputtering. In this case, since the magnetoresistance effect depends on the interfaces of thin films, this work is devoted to the study of the magnetoresistance in samples of Permalloy in nominal settings of: Ta[4nm]/Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/Py[16nm]/O₂/Ta[4nm], Ta[4nm]/O₂/Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/O₂/Py[16nm]/O₂/Ta[4nm], as made and subjected to heat treatment at temperatures of 160°C, 360°C and 460°C, in order to verify the influence of the insertion of the oxygen in the layer structure of samples and thermal treatments carried out after production of the samples. Results are interpreted in terms of the structure of the samples, residual stresses stored during deposition, stresses induced by heat treatments and magnetic anisotropies.

Key words: *Thin Films, permalloy, ferromagnetic materials, hysteresis and anisotropic magnetoresistance.*

1	Introdução	1
2	Filmes finos, curva de magnetização e magnetorresistência	3
2.1	Filmes finos	3
2.2	Curva de magnetização	4
2.3	Magnetorresistência - MR	6
2.3.1	Magnetorresistência Normal	7
2.3.2	Magnetorresistência Gigante – GMR	9
2.3.3	Magnetorresistência Colossal – CMR	11
2.3.4	Magnetorresistência Túnel - TMR	11
2.3.5	Magnetorresistência Anisotrópica - AMR	15
3	Procedimento experimental	21
3.1	Amostras	21
3.2	Difração de raios-x	23
3.2.1	Raios-x	23
3.3	Caracterização magnética	25
3.4	Magnetorresistência	26

4	Resultados e discussões	32
4.1	Caracterização estrutural	32
4.2	Propriedades magnéticas	34
4.2.1	Ciclo histerético dos filmes de <i>Permalloy</i> sem tratamento térmico . .	34
4.2.2	Ciclo histerético dos filmes de <i>Permalloy</i> para diferentes temperaturas	36
4.3	Magnetorresistência	37
4.3.1	Curvas de magnetorresistência em função da direção de aplicação do campo magnético	37
4.3.2	Relação entre a curva de histerese e a de magnetorresistência	42
4.3.3	Influência das camadas de O ₂ sobre o comportamento magnetorre- sistivo	44
4.3.4	Influência da temperatura dos tratamentos térmicos sobre o com- portamento magnetorresistivo	46
4.3.5	Análise experimental da AMR	48
5	Conclusões e perspectivas	50
	Referências bibliográficas	53

A humanidade percebeu há alguns séculos atrás que poderia fazer uso de fenômenos magnéticos e das propriedades magnéticas da matéria para melhoria de sua condição de vida. Atualmente, o magnetismo está presente no nosso dia a dia em várias utilidades, como, por exemplo, em núcleos de transformadores, imãs de geladeira, sensores, computadores, entre outros. Foi com a curiosidade do homem em desvendar os segredos do magnetismo que surgiram tanto aplicações quanto novas técnicas para análise dos materiais magnéticos.

Os materiais ferromagnéticos exercem um papel importante no desenvolvimento de diversos dispositivos eletrônicos e têm grande importância na medida que os mesmos podem determinar a eficiência, o custo e o tamanho dos dispositivos [1]. Talvez o dispositivo de armazenamento de dados em um computador, o HD, seja um dos exemplos mais representativos da aplicação do magnetismo em dispositivos eletrônicos, pois consiste de camadas magnéticas produzidas e fortemente investigadas em laboratórios de pesquisa. Dessa forma, muitas das investigações científicas, atualmente, têm se concentrado no estudo de materiais em escalas cada vez menores, a fim de entender e controlar melhor as propriedades dos sistemas nanoscópios, ou seja, com dimensões da ordem de 10^{-9} m [2].

Dentre as várias formas de amostras com dimensões reduzidas, destacam-se os filmes finos. Diferentes fenômenos interessantes vêm sendo estudados em filmes finos com maior ênfase por vários grupos científicos. Após o conhecimento do comportamento magnético da amostra via a obtenção de sua curva de magnetização, diferentes efeitos,

dentre eles a magnetorresistência, podem ser investigados por apresentarem pontos de física fundamental e boa aplicação em sensores, armazenamento de dados e dispositivos lógicos [3].

Obviamente, a forma da curva de magnetorresistência depende do comportamento magnético da amostra estudada. É possível obter uma relação entre a curva de magnetorresistência e o processo de produção da amostra. Sendo assim, um minucioso trabalho de caracterização estrutural e magnética durante a fase de produção da amostra é de fundamental importância para o desenvolvimento desse trabalho.

Dentre esses materiais acessíveis para o crescimento de filmes finos e investigação do efeito de magnetorresistência, destaca-se a liga metálica $Ni_{81}Fe_{19}$, conhecida como *Permalloy* (Py) [4]. Sendo assim, visto que o efeito da magnetorresistência é dependente das interfaces dos filmes finos, este trabalho é dedicado à caracterização estrutural e magnética, bem como estudo do efeito da magnetorresistência, de amostras de *Permalloy* produzidas por *sputtering*. Neste caso, foram estudadas amostras com configurações nominais de: Ta[4nm]/Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/Py[16nm]/ O_2 /Ta[4nm], Ta[4nm]/ O_2 /Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/ O_2 /Py[16nm]/ O_2 /Ta[4nm], na condição de como feitas e submetidas a tratamentos térmicos com temperaturas de 160°C, 360°C e 460°C durante 90 minutos.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: No capítulo 2, é apresentada uma revisão teórica sobre as curvas de magnetização, na qual são abordados os principais tipos de efeitos magnetorresistivos.

No capítulo 3, é descrito o procedimento experimental. Neste, são apresentadas as amostras estudadas [4] e os procedimentos empregados para caracterização estrutural e magnética, bem como os utilizados para o estudo do efeito da magnetorresistência.

No capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados relacionados à caracterização estrutural, magnética e às curvas de magnetorresistência obtidas nos filmes finos de *Permalloy*.

Finalmente, o capítulo 5 é destinado às principais conclusões desta dissertação e às perspectivas para continuidade do trabalho.

CAPITULO 2

FILMES FINOS, CURVA DE MAGNETIZAÇÃO E MAGNETORRESISTÊNCIA

2.1 Filmes finos

Amostras na forma de filmes finos correspondem a uma camada de um dado material, com espessura da ordem de nanômetros (10^{-9}m), depositado sobre algum tipo de substrato como, por exemplo, vidro e silício. Filmes finos podem ser crescidos artificialmente por diferentes técnicas, tais como *Molecular Beam Epitaxy (MBE)*, *magnetron-sputtering*, *evaporação térmica*, *Pulsed Laser Deposition (PLD)*, *Physical Vapour Deposition (PVD)* e outros.

O estudo de amostras na forma de filmes finos se torna de fundamental importância visto que quando as dimensões físicas de um material são reduzidas, em geral, são observadas alterações em suas propriedades magnéticas. Sendo assim, em estudos de amostras na forma de filmes, visa-se compreender e otimizar suas propriedades, visto que estes estão presentes em uma vasta aplicação na indústria tecnológica, como por exemplo discos rígidos, diodos e nas interconexões em circuitos integrados.

2.2 Curva de magnetização

Um dos fatos que mais despertou o fascínio dos pesquisadores na área de materiais magnéticos é que a magnetização de uma amostra, inicialmente igual a zero na ausência de campo magnético externo, pode variar para um valor de saturação pela simples aplicação de um campo de intensidade muito pequena.

Partindo de um ponto de vista microscópico, pode-se inicialmente analisar uma amostra de material ferromagnético como sendo formada por regiões nas quais os momentos magnéticos internos estão alinhados na mesma direção e sentido, chamadas domínios magnéticos. O fato da orientação dos domínios magnéticos apresentarem uma aleatoriedade irá resultar em uma magnetização resultante nula. A figura (2.1) apresenta de maneira simplificada esse tipo de comportamento.

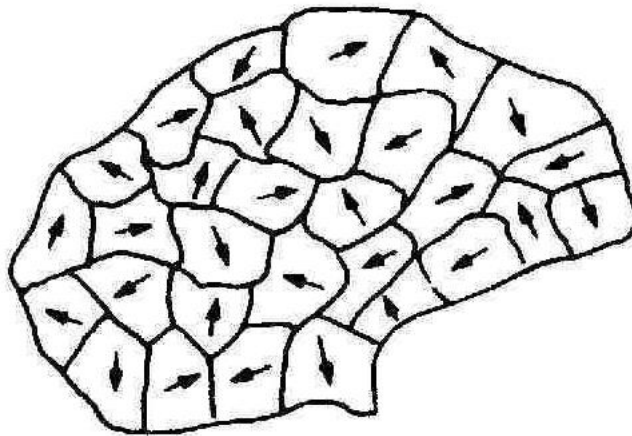


Figura 2.1: Estrutura de domínios magnéticos de um material ferromagnético. Os domínios magnéticos estão orientados aleatoriamente, resultando em uma magnetização igual a zero. Figura retirada de [5].

Quando um campo magnético externo (\vec{H}) é aplicado ao material desmagnetizado, aumentando continuamente a intensidade de \vec{H} , alguns momentos dos domínios começam a se alinhar com o campo externo, aumentando o valor da magnetização do material. Na direção do campo este processo é representado pela curva 0 - 1 na figura (2.2). Na medida que se aumenta a intensidade do campo \vec{H} , há uma maior dificuldade para alinhar os domínios magnéticos até a saturação de $\vec{B} \rightarrow \vec{B}_s$.

Reduzindo a intensidade do campo magnético aplicado ao material ferromagnético até zero, o caminho percorrido pela magnetização é a curva 1 - 2. No ponto 2, o

campo magnético aplicado foi retirado, mas ainda existe uma magnetização residual \vec{B}_r no material, chamada de magnetização remanente. Isso ocorre porque alguns domínios magnéticos desalinham e outros permanecem no seu alinhamento anterior.

Para obter a magnetização nula, é necessário aplicar um campo magnético no sentido contrário ao anterior, ponto 3, \vec{H}_c , que é reconhecido como campo coercivo.

Aumentando cada vez mais o módulo do campo no sentido contrário ocorrerá uma saturação dos momentos magnéticos de sentido inverso ao 1. Aumentando progressivamente o módulo do campo magnético, ter-se-á a curva de retorno 4561, com os mesmos valores de \vec{B}_r e \vec{H}_c só que de sinais contrários.

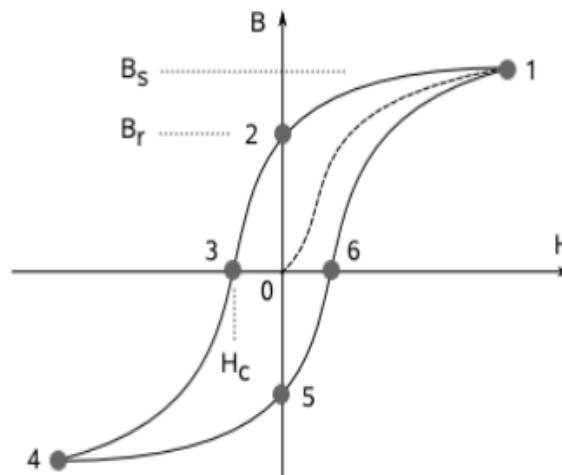


Figura 2.2: Curva de magnetização ou ciclo de histerese. Figura retirada de [6].

Assim, definem-se:

- ◇ \vec{B}_S → é a magnetização de saturação, quando todos os domínios magnéticos estão alinhados na direção do campo.
- ◇ \vec{B}_r → é a magnetização remanente, a magnetização que permanece mesmo na ausência de \vec{H} .
- ◇ \vec{H}_c → é o campo coercivo, representa a intensidade do campo magnético necessário para obter $\vec{B} = 0$.

Os materiais ferromagnéticos podem ser classificados como magnéticamente duros ou macios. Os materiais ferromagnéticos duros apresentam um ciclo de histerese mais

largo, ou seja, necessitam de um campo maior para obter uma magnetização nula, ou melhor, apresentam um campo coercivo alto, como pode ser observado na figura (2.3). Em geral, esse tipo de material apresenta uma magnetização remanente alta. Materiais como esses podem ser utilizados em aplicações que necessitam de campos magnéticos permanentes, como em armazenamento magnético de informações (em discos rígidos e flexíveis de computadores) [7] e na construção de ímãs permanentes, por apresentar uma maior dificuldade na desmagnetização.

Os materiais ferromagnéticos macios apresentam um ciclo de histerese estreito, ou seja, se magnetizam mais facilmente na presença do campo magnético e a curva que representa o comportamento desses materiais macios também é apresentada na figura (2.3). Esse tipo de material é utilizado em aplicações em que se precisa de campos magnéticos intensos, mas que possam ser ligados e desligados de acordo com a necessidade, por exemplo eletroímãs, núcleo de transformadores, fitas magnéticas e blindagem magnética [7], pois eles têm pouca perda de energia.

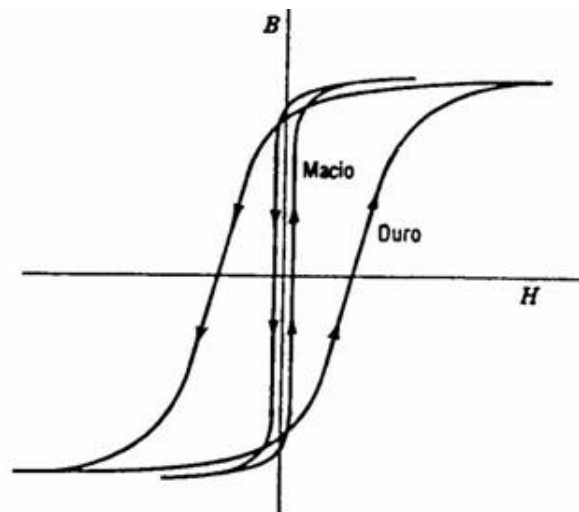


Figura 2.3: Curva de magnetização para materiais magnéticos macios e duros. Figura retirada de [8].

2.3 Magnetorresistência - MR

A magnetorresistência é a propriedade que certos materiais possuem de alterar a resistência elétrica na presença de um campo magnético externo, em outras palavras, refere-se à influência no arranjo do momento magnético na camada magnética e no movi-

mento dos elétrons.

O efeito de magnetorresistência foi descoberto por William Thomson, embora ele não tenha conseguido diminuir a resistência elétrica de nenhum material mais do que 5%. Mais tarde esse efeito recebeu o nome de magnetorresistência ordinária (MRO) [9].

Na presença de um campo magnético externo, ocorrem mudanças no arranjo dos momentos magnéticos e subsequentemente na mobilidade dos elétrons. A intensidade MR deste efeito é definida, tradicionalmente, como:

$$MR = \frac{R(H) - R(H = 0)}{R(H = 0)} \times 100\% = \frac{\Delta R}{R} \times 100\% \quad (2.3.1)$$

onde $R(H)$ é a resistência elétrica na presença de um campo magnético externo H e $R(H = 0)$ é a resistência na ausência do campo magnético.

Com esta definição a magnetorresistência tem o valor máximo de 100%. A sensibilidade com relação aos efeitos magnetorresistivos é definida como:

$$S = 100\% \times \frac{\Delta R}{R} / H_s \quad (2.3.2)$$

a unidade de S é dada em $\%/Oe$ (Oersted) e H_s é o campo mínimo que ocorre a saturação dos efeitos magnetorresistivos.

Dentro dos efeitos magnetorresistivos mais importantes, destacam-se [10]:

- ◇ Magnetorresistência Normal;
- ◇ Magnetorresistência Gigante (GMR);
- ◇ Magnetorresistência Colossal (CMR);
- ◇ Magnetorresistência Túnel (TMR);
- ◇ Magnetorresistência Anisotrópica (AMR).

2.3.1 Magnetorresistência Normal

Na maioria das vezes a magnetorresistência positiva ou normal é caracterizada por um aumento da resistência devido à aplicação de um campo magnético externo.

O campo magnético externo aplicado em materiais não-magnéticos força os elétrons a deslocarem-se em trajetórias espirais, consequência da força de Lorentz, diminuindo o livre caminho médio eficaz entre duas colisões, o que leva a um aumento da resistência.

Em materiais de transições ferromagnéticas como por exemplo, ferro e níquel, a resistência é reduzida para temperaturas abaixo da temperatura de Curie, com relação a materiais não-magnéticos como o Paládio. Este efeito de diminuição da resistência, apresentado na figura (2.4), é chamado de magnetorresistência negativa.

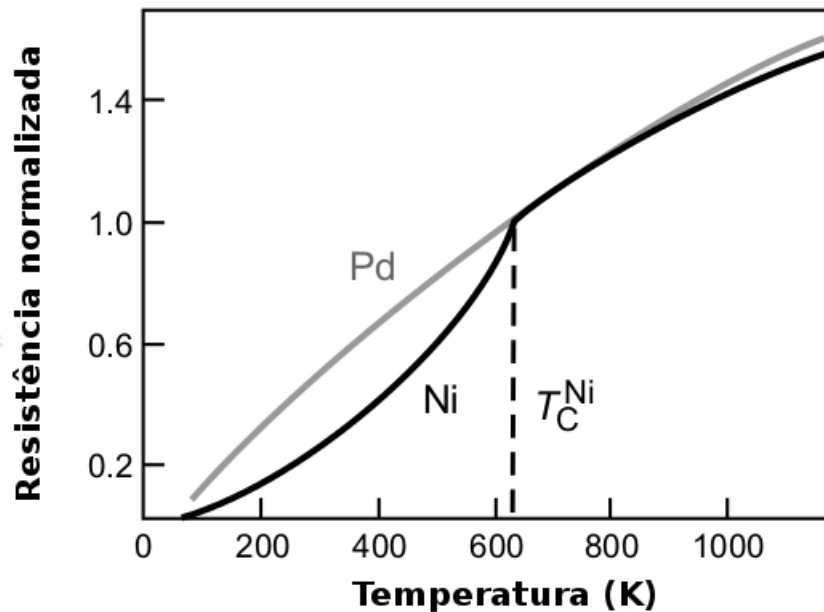


Figura 2.4: Redução da resistência elétrica em função da temperatura para o Níquel (*Ni*) e o Paládio (*Pd*), para temperaturas abaixo da temperatura de Curie. A normalização das curvas é feita com relação a temperatura de Curie do *Ni*. Figura adaptada de [10].

Pode-se interpretar o conceito de resistência elétrica através da consideração do espalhamento dos elétrons do estado *s* para uma camada *d*, vizinha ao nível da energia de Fermi E_F . Na figura (2.5) (A), observa-se que a densidades de estados de spin *up* e *down* é a mesma para materiais não-magnéticos ou ferromagnéticos acima da temperatura de Curie T_C . A hipótese para o caso de materiais ferromagnéticos abaixo da temperatura de Curie é que ocorre a separação das bandas *up* e *down*, como apresenta a figura (2.5) (B). Como consequência da separação das bandas *up* e *down*, os elétrons majoritários *s* não podem se dispersar pelos estados vazios *d*, com isso ocorre o aumento da mobilidade e, consequentemente, uma redução da resistência. Portanto, com aplicação do campo magnético ocorre um aumento do ordenamento dos spins e uma resistência reduzida, observando o efeito de magnetorresistência negativa. A magnetorresistência negativa possui um com-

portamento isotrópico, ou seja, não depende da direção da corrente elétrica em relação a da magnetização, nem a do campo magnético externo nem a dos eixos cristalinos [4].

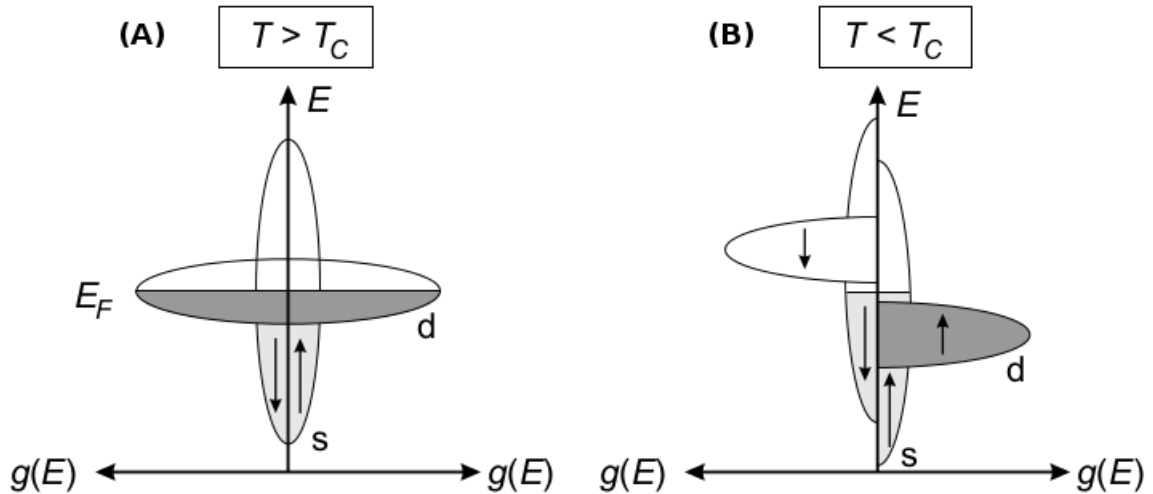


Figura 2.5: Esquema ilustrativo da densidade de estados de spins para materiais não-magnéticos ou ferromagnéticos acima da temperatura de Curie (A) e para materiais ferromagnéticos abaixo da temperatura de Curie (B). Figura adaptada de [10].

2.3.2 Magnetorresistência Gigante – GMR

A magnetorresistência gigante é observada em camadas finas ferromagnéticas separadas por uma não-magnética. Em particular, a magnetorresistência gigante é dependente da orientação relativa da magnetização das camadas ferromagnéticas e da espessura da camada não-magnética. O efeito da magnetorresistência gigante foi observado pela primeira vez em 1988 por M. Baibich [11], em multicamadas magnéticas do tipo $\text{Fe}(30\text{\AA})/\text{Cr}(9\text{\AA})$ [12].

A intensidade da corrente elétrica e a resistência dependem da orientação relativa da magnetização da estrutura de filmes finos, conforme apresentado na figura (2.6). No caso em que tem-se o alinhamento paralelo das magnetizações das camadas ferromagnéticas, a resistência é baixa. Por outro lado, para o caso que o alinhamento antiparalelo das magnetizações, a resistência é alta. Para espessuras da camada não-magnética da ordem de angstroms, as magnetizações das camadas ferromagnéticas têm um alinhamento antiparalelo, exibindo um acoplamento antiferromagnético. Baibich pesquisou e verificou que quando um sistema de multicamadas exibia acoplamento antiferromagnético, a orientação paralela das magnetizações era forçada pela aplicação do campo magnético

externo, conseqüentemente, reduzindo consideravelmente a resistência elétrica, conforme apresentado na figura (2.6).

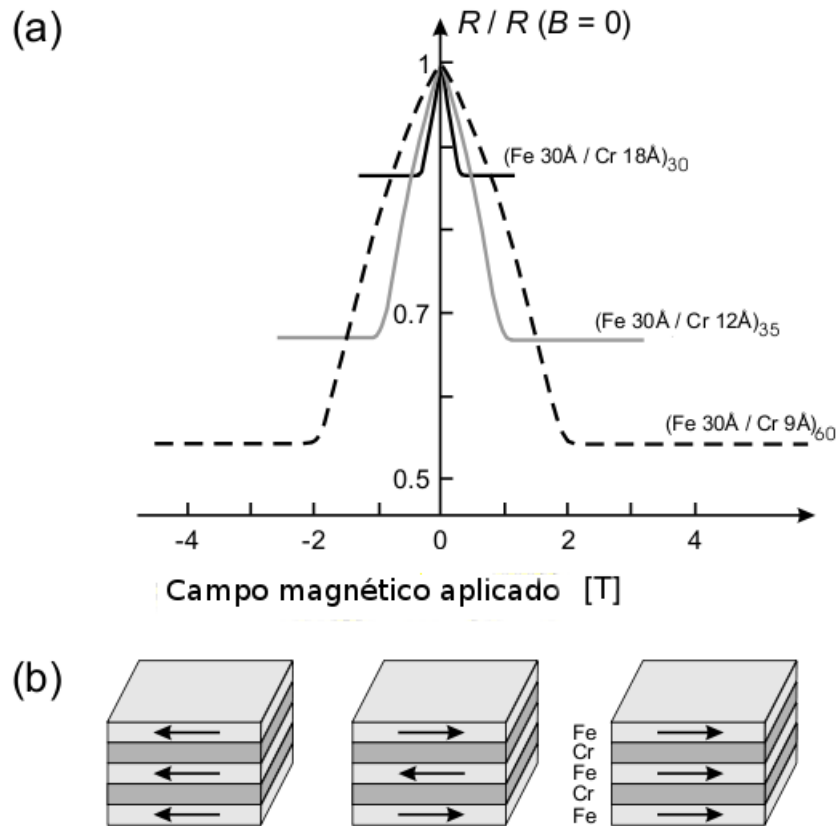


Figura 2.6: (a) Representação da variação da resistência em função do campo aplicado. O número subscrito depois dos parênteses indica o número de repetições das camadas de Fe/Cr. (b) Orientação das magnetizações paralelas e antiparalelas nas camadas ferromagnéticas, na presença e na ausência de campo. Figura adaptada de [10].

O efeito de GMR é análogo ao da AMR pois é consideravelmente grande e tem uma dependência angular entre a magnetização e a direção da corrente elétrica. Estes tipos de magnetorresistência estão diretamente relacionados com a direção entre o campo magnético aplicado e a direção de passagem da corrente elétrica.

A intensidade da GMR é usualmente definida por:

$$GMR = \frac{\rho_{AP} - \rho_P}{\rho_P} \quad (2.3.3)$$

com ρ_P sendo a resistividade do alinhamento paralelo das magnetizações e ρ_{AP} é a resistividade do alinhamento antiparalelo.

2.3.3 Magnetorresistência Colossal – CMR

Em 1950, Jonker e Van Santen verificaram que a perovskita LaMnO_3 é um isolante antiferromagnético [13]. Alguns anos atrás, em 1994 a magnetorresistência colossal foi relatada em um *doped-hole* de perovskitas baseadas em óxido de manganês. Outros compostos, como perovskitas duplas, pirocloros a base de óxido de manganês e hexaborídeos európio, entre outros, apresentaram a mesma propriedade notável. O interesse inicial das aplicações potenciais da magnetorresistência colossal logo foi motivada pela complexidade dos materiais. Suas propriedades foram estudadas durante anos, tanto teórica quanto experimentalmente, mas uma compreensão completa sobre o efeito permanece indefinida [14].

Muitos elementos ferromagnéticos apresentam propriedades intrínsecas de magnetorresistência negativa nas proximidades das transições ferromagnéticas - são mudanças descontínuas na estrutura eletrônica, e conseqüentemente na resistividade e polarização de spin [15]. Isto é porque nas proximidades das transições ferromagnéticas, a mobilidade de elétrons é dispersa devido a flutuações magnéticas. Na presença de um campo magnético, estas flutuações magnéticas são restringidas, diminuindo assim a dispersão e, conseqüentemente, a resistividade elétrica.

A perovskita LaMnO_3 é um isolante antiferromagnético, ela se torna metálica quando substituímos Lantânio (La) por Estrôncio (Sr); em $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{O}_3$, quando x está próximo de 0.3, o sistema apresenta uma transição metal-isolante no resfriamento. Simultaneamente, na mesma temperatura de transição metal-isolante, o sistema torna-se ferromagnético. Na T_C , o sistema torna-se metálico e ferromagnético. Metálico devido a mudança do coeficiente de temperatura da resistividade (TCR) de negativo para positivo, pode ser usada como uma ferramenta poderosa para determinar o tipo de condutância nas amostras [16]. Ferromagnético por causa do aumento acentuado da magnetização.

A figura (2.7) representa o comportamento da magnetorresistência nas proximidades das transições ferromagnéticas e na presença do campo H , enquanto que a figura (2.8) representa a transição isolante-metal e a transição para a fase ferromagnética.

2.3.4 Magnetorresistência Túnel - TMR

Para que ocorra o efeito de magnetorresistência gigante é necessário duas camadas ferromagnéticas ou antiferromagnéticas acopladas separadas por um filme fino me-

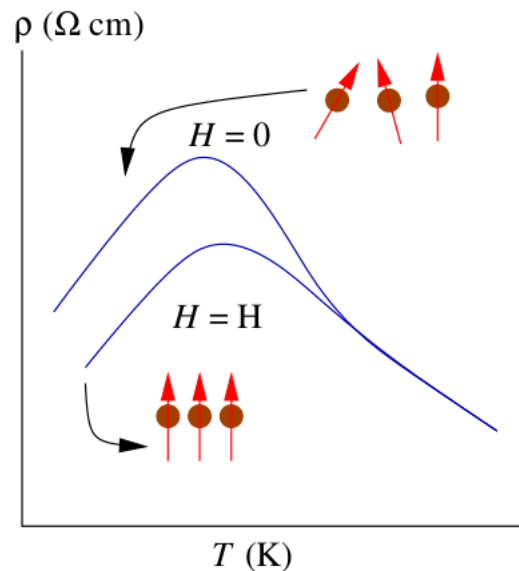


Figura 2.7: Comportamento da magnetorresistência nas proximidades das transições ferromagnéticas e na presença do campo H . Figura retirada de [13].

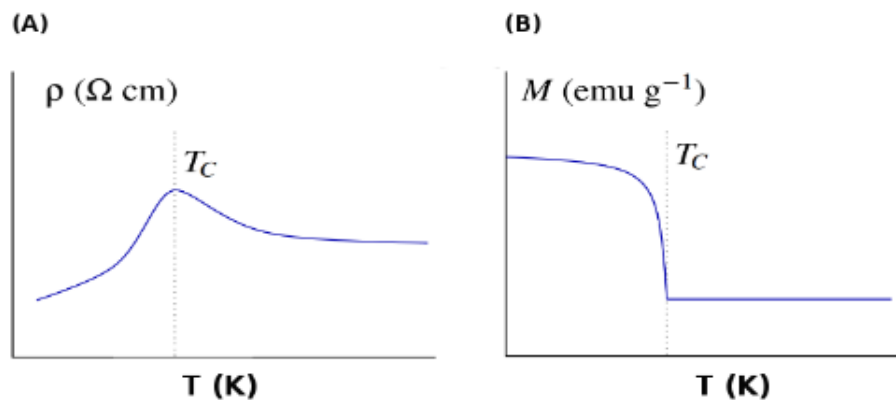


Figura 2.8: (A) Representação da transição isolante-metal. (B) Representação a transição para a fase ferromagnética. Figura adaptada de [13].

tálico e não-magnético. Substituindo o filme metálico e não-magnético por um espaçador isolante entre as camadas ferromagnéticas, como mostra a figura (2.9) A). A discussão pode ser expandida também para nanopartículas ferromagnéticas localizadas dentro de uma matriz isolante, apresentada na figura (2.9) B).

O efeito de TMR ocorre devido à mudança brutal da corrente elétrica em filmes finos ferromagnéticos com separador isolante, quando as magnetizações relativas das camadas finas ferromagnéticas mudam seu alinhamento. O pré-requisito para que ocorra o efeito de TMR é que a espessura do separador isolante seja suficientemente pequena.

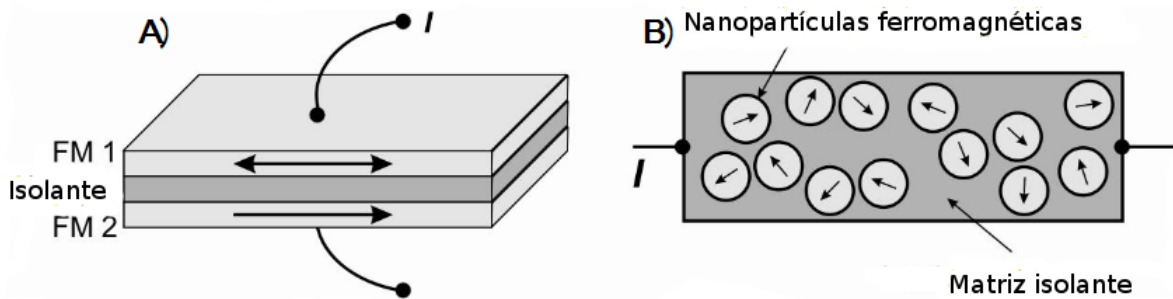


Figura 2.9: O esquema **A)** representa um filme fino ferromagnético separado por uma camada isolante e o **B)** uma matriz isolante com nanopartículas ferromagnéticas. Figura adaptada de [10].

Quando a polarização dos eletrodos ferromagnéticos são paralelas (P), a corrente de tunelamento é grande como é apresentado no amperímetro da figura (2.10) **A)**, ou seja, a resistência é baixa. Para o caso em que temos as polarizações dos eletrodos antiparalela (AP), a corrente de tunelamento é pequena como é mostrado no amperímetro da figura (2.10) **B)**, isso comprova que a resistência é alta.

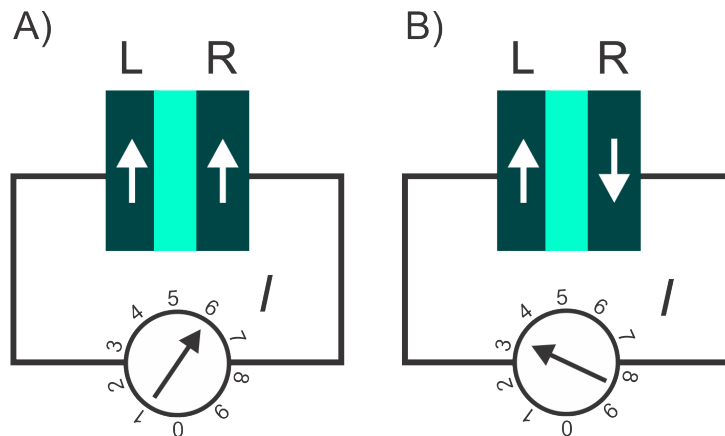


Figura 2.10: Dependência da corrente de tunelamento com a magnetização relativa das finas camadas ferromagnéticas. **A)** ilustração da configuração paralela, **B)** ilustração da configuração antiparalela. Figura retirada e adaptada [17].

TMR pode ser compreendida em termos do modelo de Julliere, que é baseada em duas hipóteses [17]. A primeira é que no processo de tunelamento a orientação do spin é conservada. O tunelamento de spin *up* e *down* são dois processos independentes, de forma que a condutância ocorre nos dois canais independentes do spin. De acordo com essa hipótese, os elétrons de um estado de spin da primeira camada ferromagnética são recebidos pelos estados vazios da mesma orientação pela segunda camada ferromagnética.

Para o caso em que as duas finas camadas ferromagnéticas têm magnetizações paralela, os elétrons dos estados minoritários migram para os minoritários e os majoritários migram para os estados majoritários, como é mostrado na figura (2.11) **A**). No caso em que temos as duas finas camadas ferromagnéticas com magnetizações antiparalela, é invertido, os elétrons dos estados minoritários migram para os estados majoritários e dos estados majoritários migram para os minoritários (2.11) **B**).

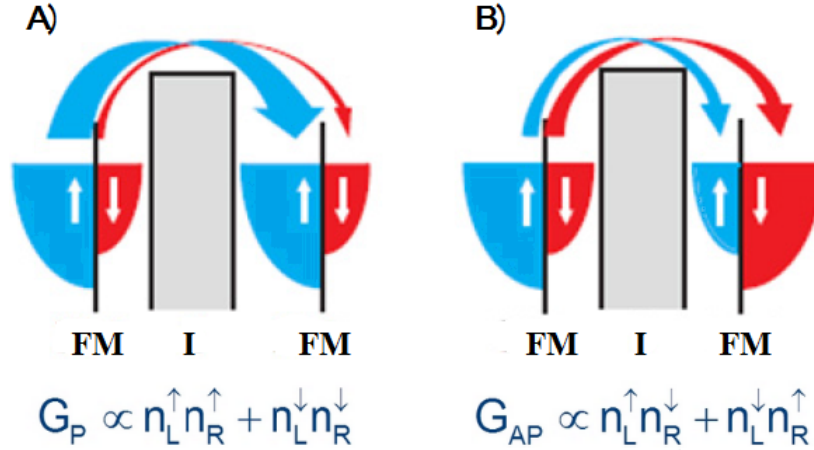


Figura 2.11: Representação do tunelamento dos elétrons de uma camada para a outra. **A**) Migração dos elétrons majoritários para majoritários e dos minoritários para minoritários, **B**) migração dos elétrons majoritários para minoritários e vice-versa. Figura retirada e adaptada de [18].

A segunda hipótese é que a condutância individual da orientação de um spin é proporcional ao produto da densidade de estados eficaz das finas camadas ferromagnéticas. De acordo com essas duas hipóteses, pode-se escrever TMR da seguinte forma:

$$TMR = \frac{G_P - G_{AP}}{G_{AP}} \quad (2.3.4)$$

G_P e G_{AP} são condutâncias das magnetizações paralela e antiparalela. As polarizações das camadas finas ferromagnéticas do lado esquerdo e do lado direito são dadas por [17]:

$$P_L = \frac{n_L^\uparrow - n_L^\downarrow}{n_L^\uparrow + n_L^\downarrow} \quad \text{e} \quad P_R = \frac{n_R^\uparrow - n_R^\downarrow}{n_R^\uparrow + n_R^\downarrow} \quad (2.3.5)$$

Com isso podemos escrever TMR em função de P_L e P_R . Sabemos que,

$$P_L P_R = \left(\frac{n_L^\uparrow - n_L^\downarrow}{n_L^\uparrow + n_L^\downarrow} \right) \cdot \left(\frac{n_R^\uparrow - n_R^\downarrow}{n_R^\uparrow + n_R^\downarrow} \right) = \frac{n_L^\uparrow n_R^\uparrow + n_L^\downarrow n_R^\downarrow - (n_L^\uparrow n_R^\downarrow + n_L^\downarrow n_R^\uparrow)}{n_L^\uparrow n_R^\uparrow + n_L^\downarrow n_R^\downarrow + (n_L^\uparrow n_R^\downarrow + n_L^\downarrow n_R^\uparrow)} = \frac{G_P - G_{AP}}{G_P + G_{AP}} \quad (2.3.6)$$

$$P_L P_R = \frac{G_P - G_{AP}}{G_P + G_{AP}} \implies P_L P_R (G_P + G_{AP}) = G_P - G_{AP} \implies G_{AP} (1 + P_L P_R) = G_P (1 - P_L P_R)$$

Logo temos que,

$$\frac{G_P}{G_{AP}} = \frac{(1 + P_L P_R)}{(1 - P_L P_R)} \quad (2.3.7)$$

Substituindo G_P/G_{AP} em TMR temos que,

$$TMR = \frac{G_P}{G_{AP}} - 1 = \left[\frac{(1 + P_L P_R)}{(1 - P_L P_R)} \right] - 1 = \frac{1 + P_L P_R - (1 - P_L P_R)}{1 - P_L P_R} = \frac{2P_L P_R}{1 - P_L P_R}$$

Portanto, temos que TMR em função das polarizações é dado por [17],

$$TMR = \frac{2P_L P_R}{1 - P_L P_R}. \quad (2.3.8)$$

2.3.5 Magnetorresistência Anisotrópica - AMR

O efeito de magnetorresistência anisotrópica está vinculada a um fenômeno de magnetotransporte relativístico induzido pela corrente elétrica, esse fenômeno ocorre em metais ferromagnéticos na presença de um campo magnético externo.

A origem física desse efeito resulta da combinação do acoplamento spin orbita nos orbitais $3d$ e a simetria quebrada de um estado ferromagnético de sistemas ordenados, causada pela aplicação do campo magnético [10]. Sem o acoplamento spin orbita, ou seja, $\vec{L} \cdot \vec{S} = 0$, o espalhamento $s - d$ dos elétrons majoritários não pode ocorrer. Para o caso em que temos o acoplamento spin orbita, ou seja, $\vec{L} \cdot \vec{S} \neq 0$, é possível a ocorrência de espalhamento com inversão de *spin* (*spin-flip*), ou seja, elétrons s majoritários podem ser espalhados para estados d minoritários, resultando em um aumento da resistência elétrica [10]. Além disso, o momento de um elétron espalhado precisa ser conservado, juntamente com o fato dos orbitais d serem altamente anisotrópicos, o que faz com que a seção de espalhamento seja diferente para uma orientação paralela ou perpendicular entre a direção da magnetização e a da corrente elétrica, conforme mostra a figura (2.11) [4].

A intensidade do efeito de AMR depende do ângulo entre a corrente elétrica e

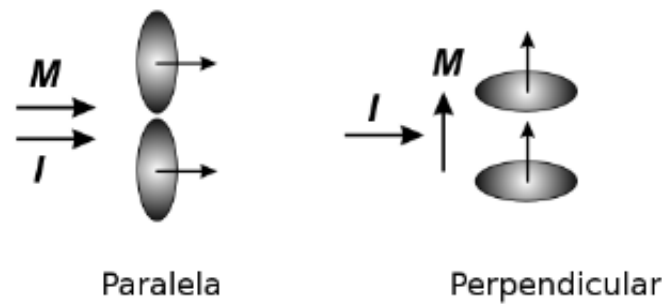


Figura 2.12: Origem da magnetorresistência anisotrópica. Figura adaptada de [10].

o ângulo da magnetização em uma determinada direção. Frequentemente o ângulo da magnetização é o mesmo ângulo do campo magnético aplicado e do eixo de referência. Define-se o ângulo da corrente elétrica como θ_I , o ângulo da magnetização como θ_M e o ângulo do campo aplicado como θ_H , entretanto pode haver influência de anisotropias magnéticas de origem magnetocristalina, magnetoelástica, etc, das amostras estudadas.

A resistência associada ao efeito de AMR é máxima quando a corrente elétrica é paralela a direção de magnetização e mínima quando a corrente elétrica é perpendicular a direção de magnetização. Quando tem-se a $I // M$, define-se $R_{//}$, e quando tem-se $I \perp M$, R_{\perp} . A figura (2.13) apresenta o efeito de AMR pela dependência do campo magnético aplicado em filmes finos ferromagnéticos.

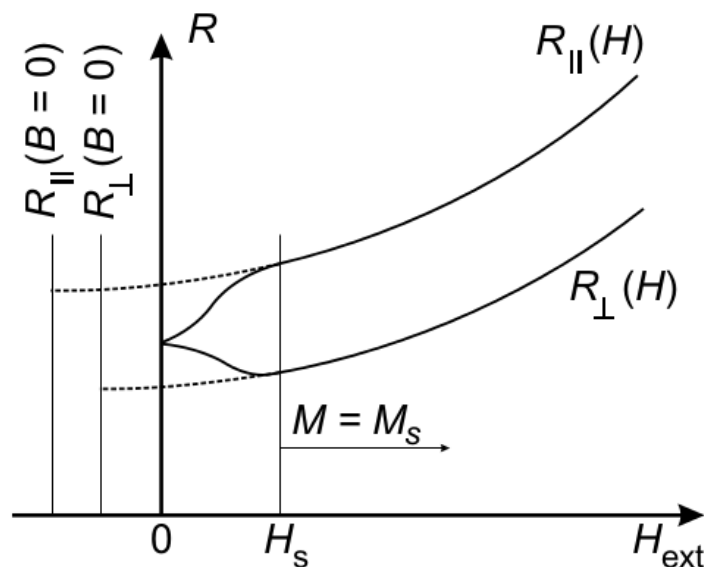


Figura 2.13: Resistência elétrica em função do campo magnético externo, para o caso em que $I // M$ e para o caso em que $I \perp M$. Figura retirada de [10].

Observando o gráfico da figura (2.13), pode-se perceber que quando o campo ex-

terno é zero, não existe diferença entre a $R_{//}$ e a R_{\perp} . Porém, quando aplica-se o campo magnético, ocorre uma diferença imediata nas resistências. No caso em que $R_{//}$, a resistência aumenta mais do que no caso em que R_{\perp} . A diferença nas resistências $R_{//}$ e R_{\perp} tem uma razão máxima quando o campo atinge o valor de H_s , sendo este o valor do campo de saturação.

O campo elétrico E_i dentro de um condutor é expressado através da densidade de corrente J_j ,

$$E_i = \sum_j \rho_{ij} J_j, \quad (2.3.9)$$

no qual ρ_{ij} é os elementos do tensor resistividade. Supondo um ferromagneto policristalino, com a magnetização saturada na direção z , devido a argumentos de simetria pode-se dizer que o condutor isotrópico magnetizado tem um tensor resistividade [19] dado por:

$$\rho_{ij} = \begin{bmatrix} \rho_{\perp}(B) & -\rho_H(B) & 0 \\ \rho_H(B) & \rho_{\perp}(B) & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{//}(B) \end{bmatrix} \quad (2.3.10)$$

A forma escrita do tensor resistividade corresponde a eq.(2.3.11) para o campo elétrico \vec{E} :

$$\vec{E} = \rho_{\perp}(B)\vec{J} + [\rho_{//}(B) - \rho_{\perp}(B)][\vec{\alpha} \cdot \vec{J}]\vec{\alpha} + \rho_H(B)\vec{\alpha} \times \vec{J}, \quad (2.3.11)$$

no qual \vec{J} é o vetor densidade de corrente e $\vec{\alpha}$ é o vetor unitário na direção da magnetização.

O tensor resistividade $\rho_{ij}(B)$ é função da indução magnética \vec{B} , que depende do campo externo \vec{H} e do fator desmagnetizante D da geometria da amostra, dada por

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H} + \vec{M}(1 - D) \quad (2.3.12)$$

Isto é devido ao efeito da força de Lorentz que existe em qualquer condutor, a ação efetiva do campo na trajetória do elétron é de fato \vec{B} , isso parece ser fisicamente razoável e tem sido verificado experimentalmente [19]. Convencionalmente, os elementos ρ_{ij} são separados em duas partes,

$$\rho_{ij}(B) = \rho_{ij} + \rho_{ij}^0(B), \quad (2.3.13)$$

no qual ρ_{ij} são os elementos espontâneos e $\rho_{ij}^0(B)$ são os elementos ordinários. Não é possível medir ρ_{ij} sem uma condição de extrapolação, devido a presença interna do campo de Lorentz. Considerando $\vec{B} = 0$, com essa extrapolação, obtem-se os três elementos espontâneos:

- ◇ $\rho_{//}$ = a resistividade para \vec{J} paralelo a \vec{M} com $\vec{B} = 0$;
- ◇ ρ_{\perp} = a resistividade para \vec{J} perpendicular a \vec{M} com $\vec{B} = 0$;
- ◇ ρ_H = a extraordinária resistividade Hall.

Na realidade os elementos diagonal $\rho_{//}$ e ρ_{\perp} do tensor resistividade são distintos porque dependem da orientação relativa entre \vec{J} e \vec{M} , ou seja, é origem fundamental do efeito de magnetorresistência anisotrópica. Para uma geometria de medida na qual a densidade de corrente está ao longo do eixo x, a resistividade Hall é medida na direção do eixo y e o campo externo e a magnetização estão no eixo z [4], como é apresentado em [19] que é da seguinte forma:

$$\rho_{B=0} = \frac{\rho_{//} + 2\rho_{\perp}}{3} + (\cos^2(\theta_M - \theta_I) - \frac{1}{3})(\rho_{//} - \rho_{\perp}), \quad (2.3.14)$$

portanto, a resistência relativa anisotrópica espontânea é definida como:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_{//} - \rho_{\perp}}{\frac{1}{3}\rho_{//} + \frac{2}{3}\rho_{\perp}} \quad (2.3.15)$$

É válido lembrar que a resistividade para campo nulo depende exatamente da configuração dos domínios magnéticos da amostra, portanto depende “historicamente”

da magnetização, não sendo bem definida a magnetização de uma amostra mesmo para uma temperatura bem definida. A variação da resistividade para campos abaixo que o da saturação depende do processo de magnetização. Ainda, se o campo externo for maior que H_s aumentará também a magnetização da amostra que afetará a resistividade, em virtude da redução da resistividade na desordem dos spins. Para o caso em que a temperatura não for muito próxima à temperatura de Curie do material, é possível considerar que a variação na resistência depende apenas do efeito de magnetorresistência positiva ou negativa [4], conforme mostrado na figura (2.13).

A dependência fenomenológica da resistividade com a orientação relativa (θ_M, θ_I) da magnetização [20] pode ser expressa como:

$$R(\theta) = R_0 + \Delta R_{AMR} \cdot \cos^2(\theta_M - \theta_I) \quad (2.3.16)$$

onde ΔR_{AMR} é a variação na resistência consequente do efeito AMR. De acordo com a equação (2.3.16) e o gráfico da figura (2.14), a resistência exibe uma periodicidade de 180° para um valor constante de campo aplicado.

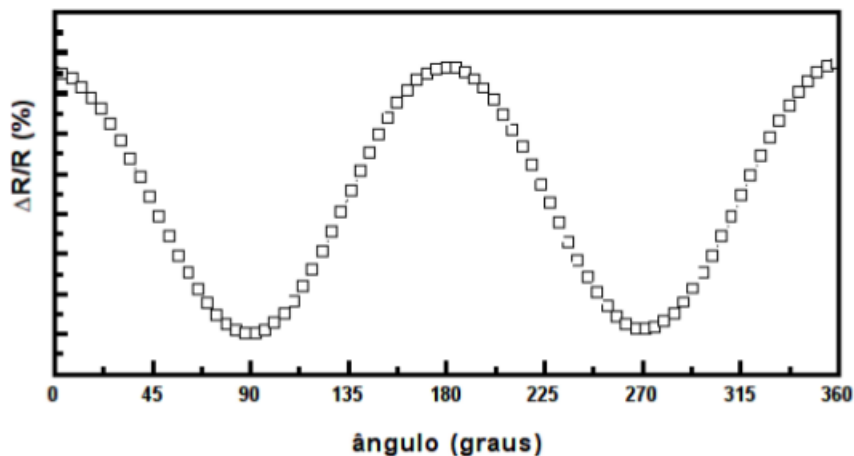


Figura 2.14: Magnetorresistência em função do ângulo entre \vec{M} e \vec{J} para um valor constante do campo magnético externo maior do que H_s . Figura retirada de [4].

Pode-se reescrever a equação (2.3.16) em termos de $R_{//}$ e R_{\perp} :

$$\Delta R_{AMR} = R_{//} - R_{\perp} \quad (2.3.17)$$

$$R_0 = R_{\perp} \quad (2.3.18)$$

com isso podemos reescrever a equação (2.3.16) como:

$$R(\theta) = R_{\perp} + (R_{//} - R_{\perp}) \cdot \cos^2(\theta_M - \theta_I) \quad (2.3.19)$$

CAPITULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Visto que o efeito da MR é dependente das interfaces dos filmes finos, neste trabalho, foram estudadas amostras com configurações nominais: Ta[4nm]/Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/Py[16nm]/O₂/Ta[4nm], Ta[4nm]/O₂/Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/O₂/Py[16nm]/O₂/Ta[4nm], na condição como feitas e submetidas à tratamentos térmicos com temperaturas de 160°C, 360°C e 460°C durante 90 minutos. Em particular, foram realizadas medidas de difração de raios-x (XRD), magnetização ($M \times H$) e MR.

Deve-se destacar que, embora grande parte dos procedimentos experimentais, como a caracterização magnética das amostras e as medidas da MR, tenha sido realizada no Laboratório de Nanoestruturas Magnéticas e Semicondutoras (LNMS) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), a produção das amostras e a caracterização estrutural foi realizada no Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos (LMMM) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

3.1 Amostras

Foram estudadas amostras com configurações nominais: Ta[4nm]/Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/Py[16nm]/O₂/Ta[4nm], Ta[4nm]/O₂/Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/O₂/Py[16nm]/O₂/Ta[4nm], conforme mostra a figura (3.1), na condição como feitas e submetidas à tratamentos térmicos com temperaturas de 160°C, 360°C e 460°C durante 90 minutos. Neste caso, a liga ferromagnética de *Permalloy*, com composição $Ni_{81}Fe_{19}$, foi depositada

tendo interfaces com Ta (Tântalo) e/ou O₂. A figura (3.2) representa uma das amostras de *Permalloy* analisadas. Neste caso, o eixo principal da amostra tem 1,25 cm, enquanto que o eixo perpendicular ao eixo principal tem 0,43 cm.

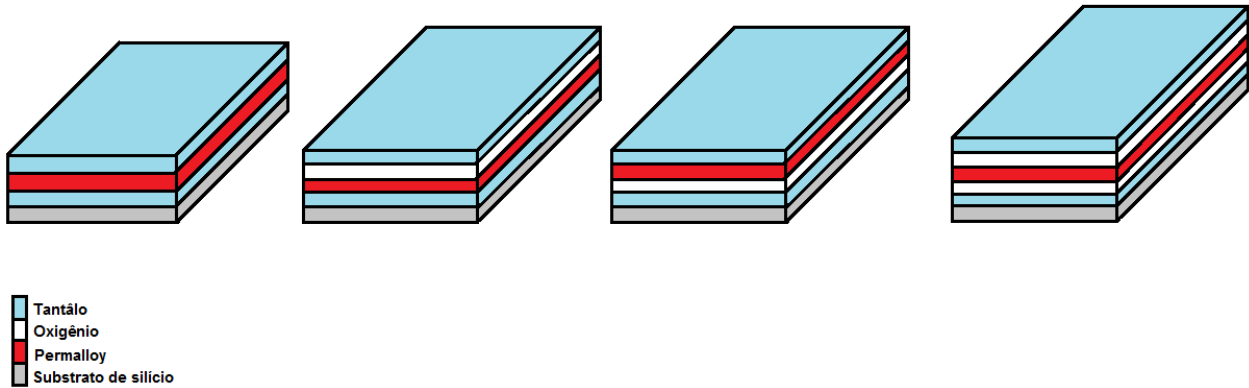


Figura 3.1: Representação de como os filmes foram crescidos.

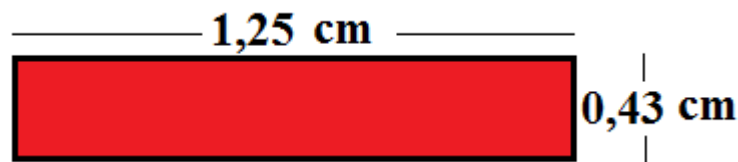


Figura 3.2: Dimensões dos filmes finos.

A tabela (3.1) apresenta todo o conjunto de amostras estudadas, como feitas e submetidas a tratamento térmico com as suas respectivas temperaturas.

Amostras	Temperaturas			
Ta[4nm]/Py[16nm]/Ta[4nm]	Como feita	160°C	360°C	460°C
Ta[4nm]/Py[16nm]/O ₂ /Ta[4nm]	Como feita	160°C	360°C	460°C
Ta[4nm]/O ₂ /Py[16nm]/Ta[4nm]	Como feita	160°C	360°C	460°C
Ta[4nm]/O ₂ /Py[16nm]/O ₂ /Ta[4nm]	Como feita	160°C	360°C	460°C

Tabela 3.1: Amostras estudadas neste trabalho.

As amostras foram produzidas por *Magnetron Sputtering*, sobre substratos de Silício, com os seguintes parâmetros de deposição: as camadas de Tântalo (Ta) foram depositadas, à temperatura ambiente, em uma atmosfera de argônio de 2 *mtorr* de pressão e com fluxo de gás de 32 sccm (centímetros cúbicos por minuto), utilizando-se uma fonte DC com corrente fixa de 100 mA. As camadas de Ni₈₁Fe₁₉ foram depositadas sob mesmas condições, mas com uma fonte RF com potência de 100 W. Algumas amostras passaram por uma

etapa de oxidação. Nesta etapa os filmes finos foram submetidos a uma atmosfera de oxigênio (O_2) com pressão de 100 mtorr durante 10 minutos. O detalhamento do sistema de deposição dessas amostras é encontrado em [4]. Foi depositada uma camada de Tântalo de 4 nm, em seguida o *Permalloy* com uma espessura de 16 nm e por último a camada de tântalo de 4 nm. Elas têm as seguintes configurações: Ta[4nm]/Py[16nm]/Ta[4nm], Ta[4nm]/Py[16nm]/ O_2 /Ta[4nm], Ta[4nm]/ O_2 /Py[16nm]/Ta[4nm] e Ta[4nm]/ O_2 /Py[16nm]/ O_2 /Ta[4nm] como podemos observar na tabela (3.1). Todas essas amostras passaram por um tratamento térmico. As amostras foram submetidas a temperaturas de 160 °C, 360 °C e 460 °C durante 90 minutos.

3.2 Difração de raios-x

3.2.1 Raios-x

A difração de raios-x foi observada pela primeira vez em 1912. Por volta de 1917, foram realizadas experiências de difração que mostraram que todos os metais e sólidos inorgânicos são simplesmente composto de átomos [21]. A difração de raios-x ainda hoje é uma técnica bastante utilizada, pois existe um amplo banco de dados com a maioria das fases cristalinas dos materiais analisados.

A distância entre os planos atômicos, nos cristais, é da ordem de um ($10^{-10}m$). A radiação eletromagnética, com comprimento de onda da ordem das distâncias interatômicas, deve ter no mínimo, o que corresponde a uma energia da ordem de

$$\hbar\omega = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \frac{m^2 Kg}{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{10^{-10}m} \approx 12,4 \cdot 10^3 eV \quad (3.2.1)$$

os raios-x têm essa ordem de energia.

A estrutura dos cristais pode ser estudada através da difração de fótons, nêutrons e elétrons [22]. A difração depende da distância entre os planos atômicos e do comprimento de onda incidido no cristal. W. L. Bragg apresentou uma explicação simplificada para este fenômeno. Considerando um cristal formado por planos paralelos de átomos separados por uma distância d . Suponha que as ondas incidentes sejam refletidas especularmente e parcialmente, e que, os raios refletidos por planos vizinhos interfiram construtivamente [4, 23], como observado na figura (3.3). A reflexão é especular quando o ângulo

de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Supondo que o espalhamento é elástico caso em que a energia da onda incidente é igual a da refletida [22].

A diferença do caminho ótico entre os raios refletidos por planos vizinhos é exatamente $2d\sin(\theta)$, sendo θ o ângulo de incidência. Esses raios interferem construtivamente quando a diferença do caminho ótico é igual a um número inteiro n de comprimento de onda λ , ou seja,

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (3.2.2)$$

esta é a lei de Bragg, garante que ocorra a interferência construtiva.

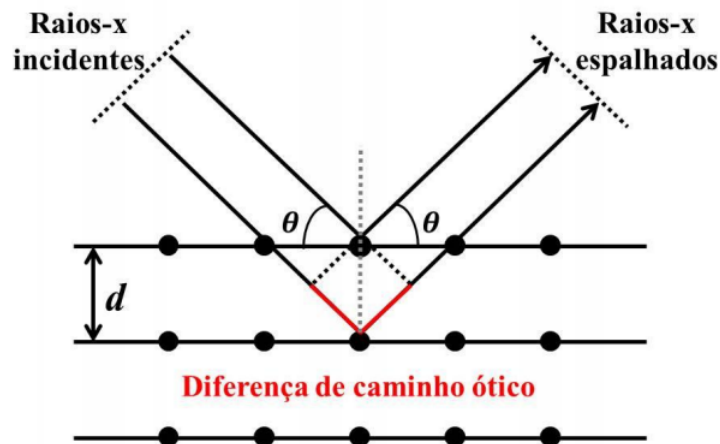


Figura 3.3: Espalhamento dos raios-x nas camadas interatômicas de um cristal. Figura retirada de [24].

As medidas de difração de raios-x foram efetuadas pelo grupo do LMMM da UFSM utilizando um difratômetro Bruker AXS, modelo D8 Advance, na geometria $\theta - 2\theta$, usando radiação $\text{Cu-K}\alpha$, comprimento de onda $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$. Uma descrição detalhada sobre a técnica pode ser encontrada em [21].

Em particular, a caracterização estrutural executada neste trabalho é focada em dois aspectos: (a) espessura e (b) caráter estrutural.

Medidas de XRD a baixos (2° a 7°) e altos ângulos (10° a 110°) foram realizadas com o objetivo de, respectivamente, obter a taxa de deposição para cada alvo, e assim determinar a espessura de cada amostra, e para verificar o caráter estrutural dos filmes, amorfo ou cristalino. No último caso, a identificação das fases foi realizada através da comparação dos espectros de XRD medidos com os padrões de difração do International

Centre for Diffraction Data (ICDD).

3.3 Caracterização magnética

Uma das mais importantes caracterizações necessárias para entender as propriedades magnéticas da amostra é a caracterização magnética. Podemos obter informações da contribuição magnética da amostra, utilizando um magnetômetro de amostra vibrante (VSM).

O VSM foi desenvolvido por Simon Foner em 1955 [25]. O VSM é baseado na lei de Faraday da indução eletromagnética. De acordo com a lei de Faraday, a variação do fluxo magnético induz uma força eletromotriz nas bobinas de detecção, cujo valor é proporcional à magnetização da amostra, que pode ser variada alterando o campo magnético DC produzido pelas bobinas de Helmholtz [26]. Em um VSM, uma amostra magnetizada, por um campo uniforme, está sujeita a uma vibração mecânica com amplitude constante em relação às bobinas captadoras, mantidas estacionárias [25]. Ele é muito utilizado nos laboratórios por apresentar bons resultados, funcionamento simples e ter um custo reduzido.

A figura (3.4) ilustra um diagrama de blocos de um VSM, igual ao do Laboratório de Nanoestruturas Magnéticas e Semicondutoras da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O diagrama é constituído de duas bobinas de Helmholtz, uma fonte DC, sistema vibratório, amplificador, dispositivo eletrônico de recuperação de sinal (lock-in), um computador para fazer a aquisição de dados e uma cúpula revestida internamente por um isolante acústico para diminuir a interferência de ruídos nos resultados.

Para obter os ciclos de histerese ou curvas de magnetização, coloca-se a amostra na extremidade da haste de vidro, que é fixada ao sistema mecânico vibratório que trabalha a uma frequência de vibração $f = 13, 206 \text{ Hz}$ e uma amplitude constante na direção do campo magnético aplicado, centralizada entre as bobinas, pois nesta região existe pouca deformação do campo, então, podemos aproximar para um campo magnético uniforme.

A sensibilidade do VSM está diretamente relacionada a uniformidade e a estabilidade do campo aplicado, sendo assim qualquer mudança no campo aplicado ou vibrações externas nas bobinas, ocasionam uma interferência na uniformidade do campo, colocando em risco à acurácia do equipamento.

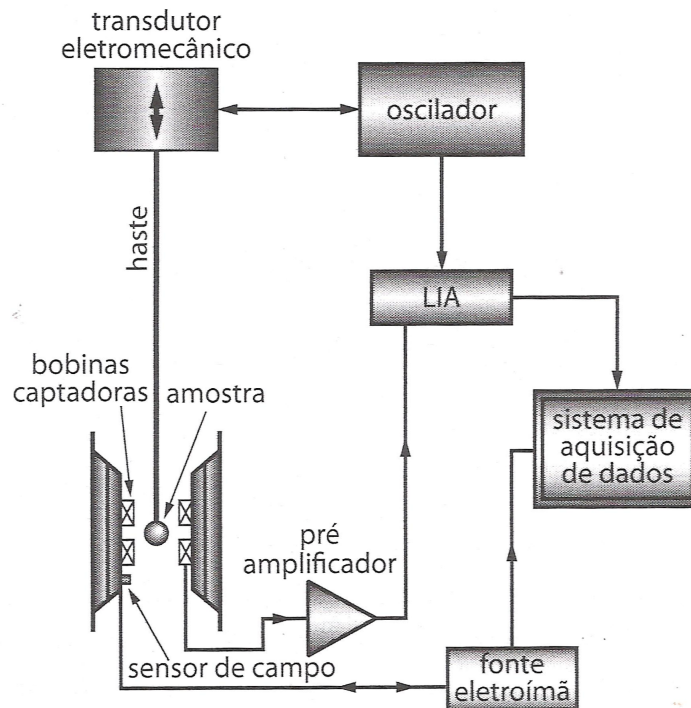


Figura 3.4: Digrama de blocos de um magnetômetro de amostra vibrante. Figura retirada de [25].

Algumas dessas medidas geraram um ruído considerável nos resultados, devido a pouca quantidade de material magnético depositado sobre o substrato. As curvas de magnetização foram obtidas a uma temperatura ambiente, aplicando campos de -200 a $+200$ Oe , nas direções paralela e perpendicular ao comprimento da amostra para identificar o eixo duro e o de fácil magnetização. Para amenizar a variação brutal do campo magnético que possa influenciar nos resultados, utilizamos um passo curto, o ciclo demorava aproximadamente 2 horas e 30 minutos para se completar. Conseguimos obter bons resultados no VSM do LNMS da UFRN, apesar das amostras serem muito finas com relação a outras já analisadas no mesmo aparelho.

3.4 Magnetorresistência

A magnetorresistência DC do LNMS da UFRN foi desenvolvida pelo próprio grupo. O funcionamento desse equipamento baseia-se na técnica de quatro pontas. Ele contém quatro eletrodos igualmente espaçados que são pressionados sobre a superfície do filme, esse método tem a vantagem de eliminar as resistências de contato dos eletrodos

com a superfície do filme [12]. Os dois eletrodos externo são utilizados para a passagem da corrente no filme e os internos são responsáveis por medir a diferença de potencial, ver figura (3.5).

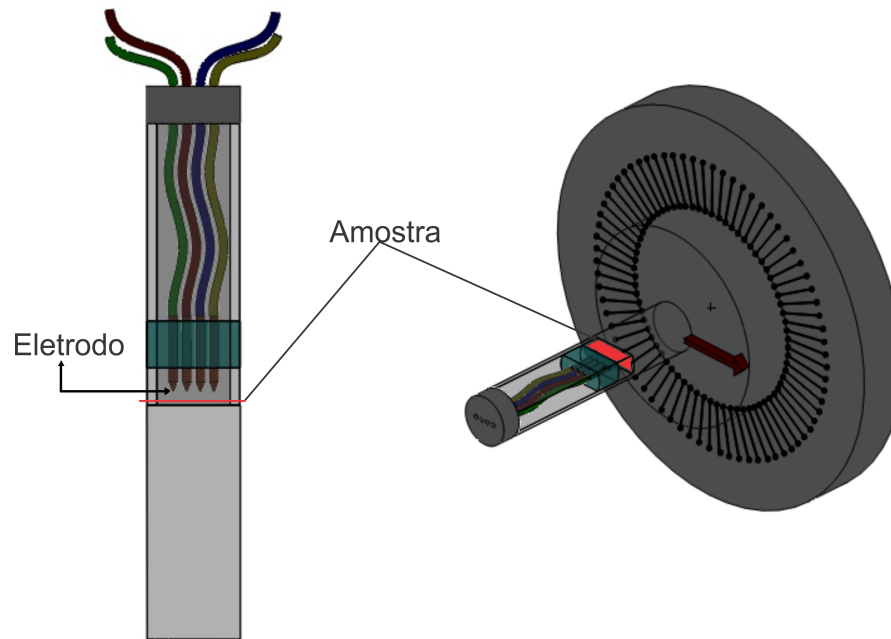


Figura 3.5: Ilustração do porta amostra da magnetorresistência.

O filme é preso no suporte de acrílico com graxa de vácuo ou fita dupla face abaixo dos eletrodos, depois aproxima-se os eletrodos, quando as quatro pontas encostam na superfície do filme prende-se o suporte com dois parafusos. Na figura (3.6) apresenta o tipo de parafuso que é utilizado como eletrodo para não danificar a superfície da amostra, quando pressionamos os eletrodos na superfície do filme eles são comprimidos.



Figura 3.6: Detalhes do parafuso utilizado como eletrodo. Figura retirada de [12].

O goniômetro permite a variação precisa, entre o ângulo do campo magnético externo e a densidade de corrente aplicada na amostra. As medidas foram realizadas a uma temperatura ambiente e o campo magnético entre -50 e 50 Oe. A corrente elétrica foi fixada num intervalo de $0,2$ a $0,3$ mA.

Para aplicar a corrente utiliza-se uma fonte de corrente Keithley modelo 6221 DC e AC. A diferença de potencial é medida por um nanovoltímetro da Keithley modelo 2182A. O porta amostra é colocado com a amostra entre os polos do eletroímã, como podemos observar na figura (3.7), a corrente que atravessa a amostra é contínua, mede-se a magnetorresistência na amostra para a corrente nos dois sentidos, para um determinado campo magnético, depois calcula-se a média. O campo magnético é controlado por uma fonte bipolar da Kepco cujo valor máximo de corrente é de 8 A.

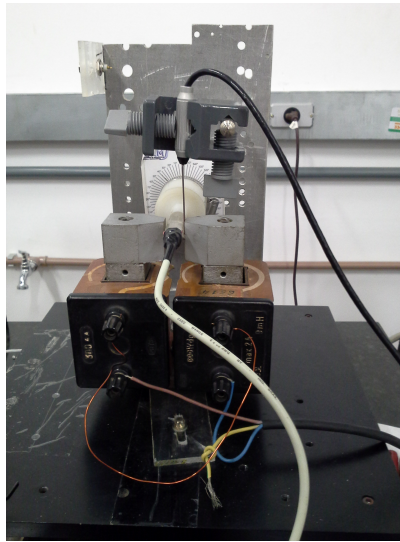


Figura 3.7: Foto do eletroímã com o porta amostra da magnetorresistência

Todos os equipamentos são conectados através de interfaces GPIB, observar a figura (3.8) que apresenta o diagrama de blocos e uma imagem digital do equipamento da magnetorresistência do LNMS.

Ao medir-se resistência elétrica utilizando-se contatos pontuais deve-se tomar cuidado com a interpretação dos resultados experimentais, pois dependendo da distribuição espacial de corrente as medidas podem depender de parâmetros geométricos da montagem, tais como a separação entre os eletrodos (s) [12]. Existem dois casos a ser considerados:

- ◇ A espessura E do filme muito maior que s , ou seja, $E \gg s$.
- ◇ A espessura E do filme muito menor que s , ou seja, $E \ll s$.

Para o caso em que $E \gg s$, a distribuição de corrente elétrica na amostra é esférica, a área ocupada pela corrente dentro da amostra é, $A = \frac{1}{2}4\pi r^2$, no qual r é o raio

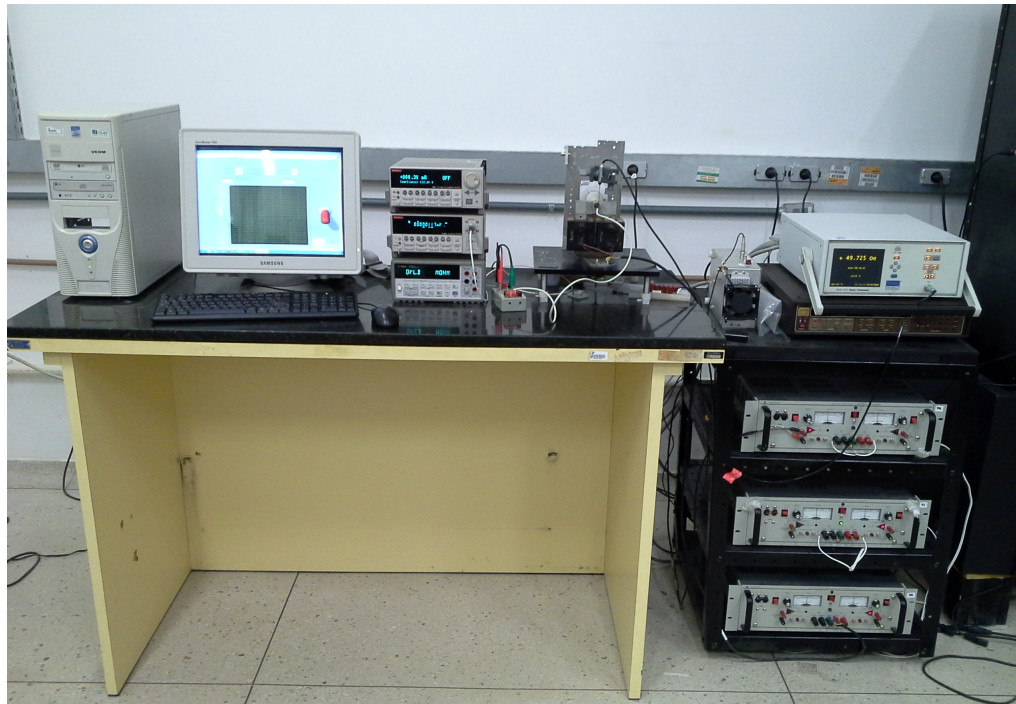
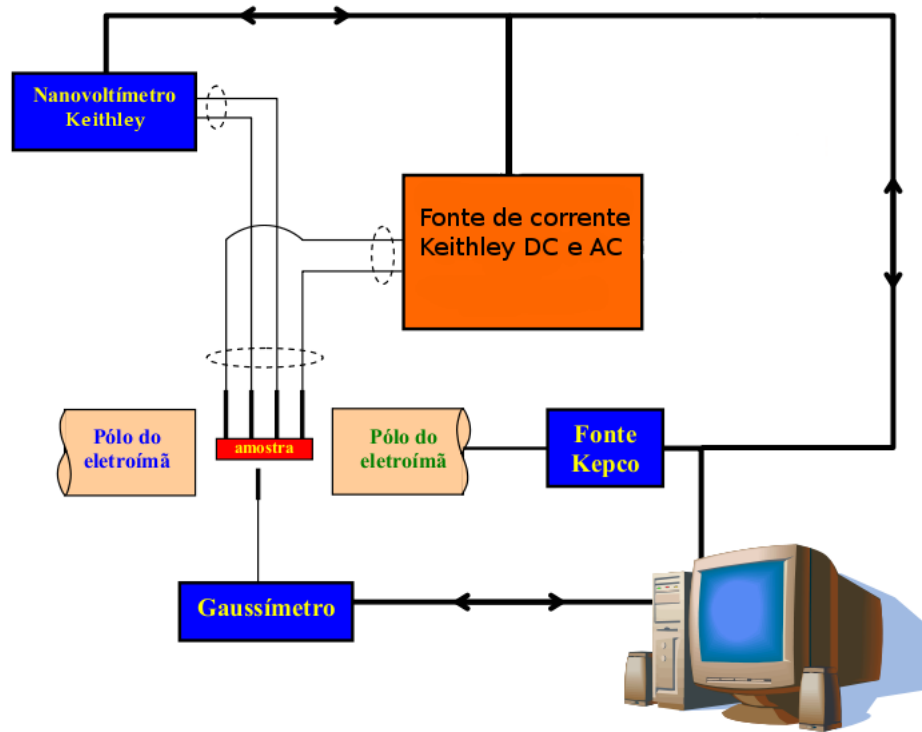


Figura 3.8: Diagrama de blocos do sistema de magnetorresistência. Figura adaptada de [12]. Foto do aparato experimental da magnetorresistência do LNMS da UFRN.

da superfície semi-esférica como apresenta a figura (3.9). A resistência infinitesimal na direção de x é dada por $dR_x = \rho \frac{dx}{A}$, para calcular a diferença de potencial basta integrar

na direção do eixo x :

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right] \quad (3.4.1)$$

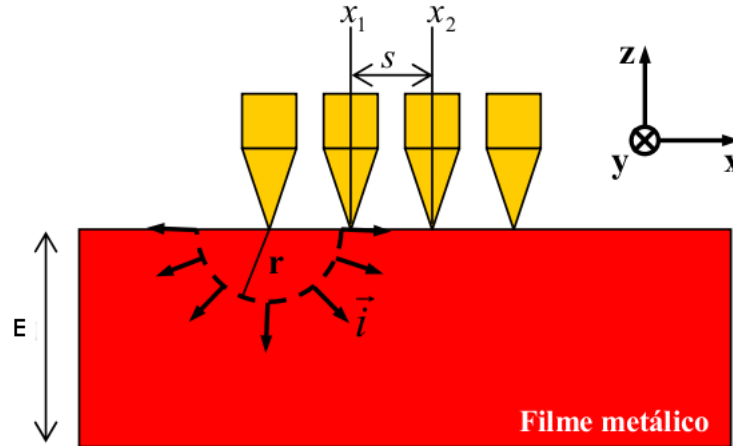


Figura 3.9: Ilustração da distribuição de corrente no filme. Figura retirada de [12].

Os espaçamentos entre os eletrodos consecutivos são iguais, então, $x_2 = 2x_1$ e $x_2 - x_1 = s$. Resolvendo o sistema (3.4.2) temos que,

$$\begin{cases} x_2 = 2x_1 \\ x_2 - x_1 = s \end{cases} \implies x_1 = s \quad (3.4.2)$$

então, podemos reescrever R da seguinte forma:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right] = \frac{\rho}{4\pi s} \quad (3.4.3)$$

A resistência elétrica entre os eletrodos é medida a definição de resistência $R = \frac{V}{I}$, na qual V é a diferença de potencial medida entre os eletrodos internos e I a corrente aplicada pelos eletrodos externos. Substituindo-se $R = \frac{V}{I}$ na equação (3.4.3) temos que a resistividade elétrica é dada por,

$$\rho = 4\pi s \frac{V}{I} \quad (3.4.4)$$

não é interessante que a resistividade elétrica apresente uma dependência de s .

Para o caso em que $E \ll s$, tem-se que a distribuição espacial de corrente na amostra é cilíndrica, a área ocupada pela corrente no filme é dada por : $A = 2\pi r E$, no qual r é o raio da superfície cilíndrica como podemos observar na figura (3.10). Utilizando o mesmo raciocínio do caso anterior, vamos calcular a integral na direção do eixo x :

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi x E} = \frac{\rho}{2\pi E} \ln\left(\frac{x_2}{x_1}\right). \quad (3.4.5)$$

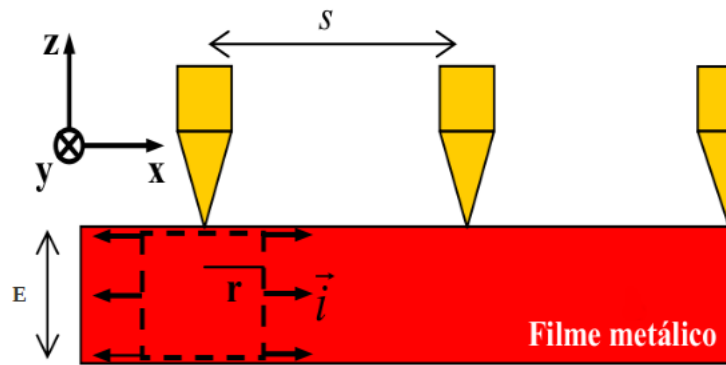


Figura 3.10: Ilustração da distribuição de corrente no filme, para $E \ll s$. Figura retirada de [12].

Sabendo que $x_2 = 2x_1$, a resistência é dada por,

$$R = \frac{\rho}{2\pi E} \ln(2), \quad (3.4.6)$$

substituindo $R = \frac{V}{I}$ na equação (3.4.6) temos que,

$$\rho = \frac{2\pi E V}{\ln(2) I}, \quad (3.4.7)$$

analisando a equação (3.4.7) a resistividade elétrica não depende do espaçamento entre os eletrodos.

CAPITULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é dedicado, exclusivamente, para a apresentação dos principais resultados obtidos ao longo do trabalho. Em particular, foram realizados experimentos para verificar o caráter estrutural e magnético das amostras, bem como para investigar o comportamento da magnetorresistência.

4.1 Caracterização estrutural

Tanto a produção das amostras quanto a caracterização das mesmas foi realizada pelo grupo do LMMM da UFSM.

Na figura (4.1), são apresentados os padrões de difração de raios-x a altos ângulos para todas as amostras produzidas. Algumas das amostras estão na forma como-feitas, enquanto outras passaram por tratamento térmico com temperaturas de 160 °C, 360 °C e 460 °C. Neste sentido, a intenção de realizar as medidas de raios-x é verificar o caráter estrutural das amostras, bem como identificar alguma evolução na estrutura das amostras quando submetidas a tratamentos térmicos.

Através da análise dos padrões de raios-x, é possível observar uma clara indicação do estado cristalino dos filmes. Em particular, este é assinado pelos picos do *Permalloy* (111), identificado em $2\theta \sim 44.2^\circ$.

Todas amostras exibem o pico bem definido. Em particular, é possível verificar

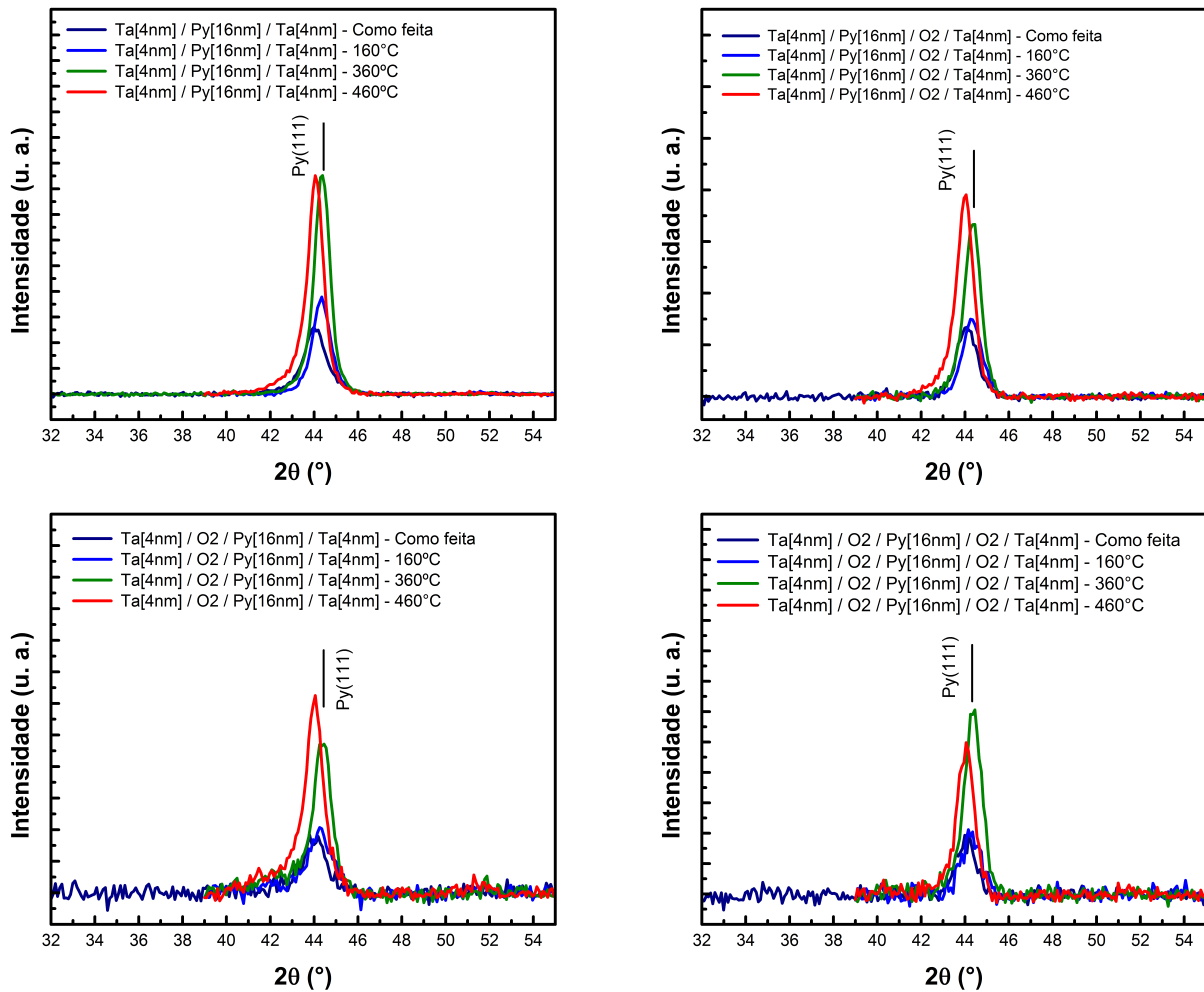


Figura 4.1: Padrões de difração de raios-x das amostras investigadas.

um claro aumento da intensidade do pico à medida que a temperatura do tratamento é aumentada, fato relacionado a um aumento da cristalinidade dos filmes.

Por outro lado, pequenas variações na posição dos picos também são observadas, fato que possivelmente pode ser associado a uma variação da tensão armazenada no filme durante a deposição e o tratamento térmico. Como fazemos a seguir, as curvas de magnetização e magnetorresistência, para tratamentos de 160 °C, há uma relaxação das tensões residuais armazenadas durante a deposição. Assim, amostras submetidas a tratamentos de 160 e 360 °C apresentam um menor nível de tensão armazenada. Entretanto, para tratamentos térmicos de 460 °C, há um aumento da tensão armazenada no filme, devido à alta temperatura que a amostra é submetida. O efeito da tensão armazenada no filme

pode ser claramente identificada através das curvas de magnetização e magnetorresistência, apresentadas nas próximas seções.

4.2 Propriedades magnéticas

As curvas de magnetização e de magnetorresistência foram adquiridas no LNMS da UFRN. Utilizando um VSM para curvas de magnetização e um equipamento de MR para as curvas de magnetorresistência, as medidas foram obtidas à temperatura ambiente. Foram obtidas medidas de magnetização com o campo magnético paralelo ao eixo principal e perpendicular ao eixo principal da amostra. O intuito de realizar medida de $M \times H$ em diferentes ângulos é determinar o eixo duro e o de fácil magnetização das amostras. Por outro lado, as medidas de MR foram obtidas, além de para as direções já citadas, para um eixo a mais, a 45° do eixo principal.

4.2.1 Ciclo histerético dos filmes de *Permalloy* sem tratamento térmico

Na figura (4.2), são apresentadas as curvas de histerese dos filmes de *Permalloy* como-feitos. As medidas de magnetização das amostras foram obtidas ao longo do eixo principal das amostras (0°) e perpendicular a esta direção (90°).

Neste caso, a dependência angular das curvas de magnetização indica um comportamento magnético típico de uma amostra com anisotropia magnética uniaxial e no plano do filme, com o eixo de fácil magnetização orientado ao longo de $\theta = 90^\circ$, ou seja, perpendicularmente ao eixo principal da amostra.

É importante lembrar que, com o objetivo de induzir uma anisotropia magnética e definir um eixo de fácil magnetização, um campo magnético constante e uniforme foi aplicado ao substrato dentro da câmara de “sputtering” durante o processo de deposição. Em outras palavras, o eixo de fácil magnetização observado, de fato, está na mesma direção do campo magnético aplicado durante a deposição.

Apenas a amostra de Ta/Py/O₂/Ta, embora apresente anisotropia magnética, tem um comportamento levemente distinto. Neste caso, a curva de magnetização obtida ao longo do eixo principal da amostra não apresenta um comportamento típico de eixo duro, quando na presença de uma anisotropia uniaxial bem definida. Este fato será refletido nas curvas de magnetorresistência.

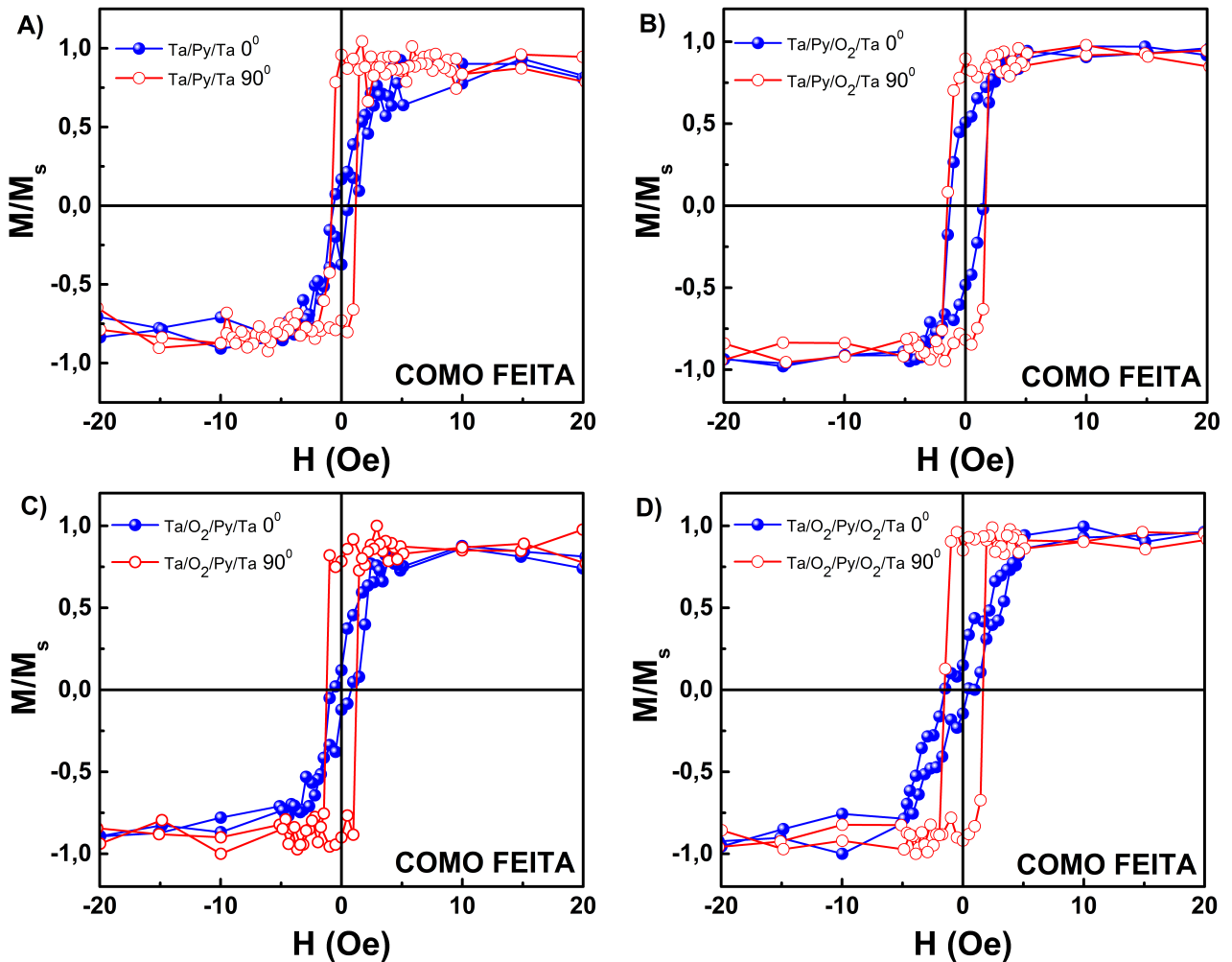


Figura 4.2: Curva de magnetização das amostras Ta/Py/Ta, Ta/Py/O₂/Ta, Ta/O₂/Py/Ta e Ta/O₂/Py/O₂/Ta, todas sem tratamento térmico. Para todas as amostras são realizadas medidas ao longo do eixo principal das amostras (0°) e perpendicular a esta direção (90°).

Apesar da camada ferromagnética ter a mesma composição em todas as amostras, claramente, é possível verificar que quando as camadas de O₂ são inseridas, há um aumento no campo coercivo das curvas obtidas ao longo do $\theta = 90^\circ$, ou seja, ao longo do eixo fácil. Em particular, para a amostra de Ta/Py/Ta, o campo coercivo é de $\sim 1,18$ Oe, enquanto que para as demais amostras, o campo coercivo é de $\sim 1,67$ Oe.

4.2.2 Ciclo histerético dos filmes de *Permalloy* para diferentes temperaturas

Nessa seção, será apresentada uma análise sobre os ciclos histeréticos das amostras de Ta/Py/Ta, Ta/Py/O₂/Ta, Ta/O₂/Py/Ta e Ta/O₂/Py/O₂/Ta, da forma como-feita e submetidas a tratamentos térmicos a temperaturas de 160 °C, 360 °C e 460 °C. Similarmemente, para todas as amostras são realizadas medidas ao longo do eixo principal das amostras (0°) e perpendicular a esta direção (90°).

As figuras (4.3), (4.4), (4.5) e (4.6) apresentam o comportamento magnético obtidos para as amostras Ta/Py/Ta, Ta/Py/O₂/Ta, Ta/O₂/Py/Ta e Ta/O₂/Py/O₂/Ta, respectivamente.

Em geral, para todos os conjuntos de amostras, é possível verificar o aumento do campo coercivo à medida que a temperatura empregada no tratamento térmico é aumentada. Em particular, o aumento é mais acentuado quando varia-se a temperatura de 360 °C para 460 °C, fato que pode ser relacionado, assim como na análise dos padrões de raios-x, ao aumento da tensão armazenada no filme, devido à alta temperatura que a amostra é submetida.

Além disto, o caráter anisotrópico e a direção do eixo de fácil magnetização praticamente não são modificados pelos tratamentos térmicos, com poucas exceções. No caso dos conjuntos Ta/Py/Ta e Ta/Py/O₂/Ta, a anisotropia uniaxial no plano é obscurecida pelo aumento da tensão residual acumulada no filme, fato não observado para os demais conjuntos. A razão pelo qual apenas dois conjuntos apresentam esta redução na anisotropia ainda é motivo de investigação, entretanto pode estar relacionada à ausência da camada de O₂ na parte inferior da amostra, ou seja, abaixo da camada ferromagnética, que permite, com maior facilidade, a difusão na interface Ta/Py.

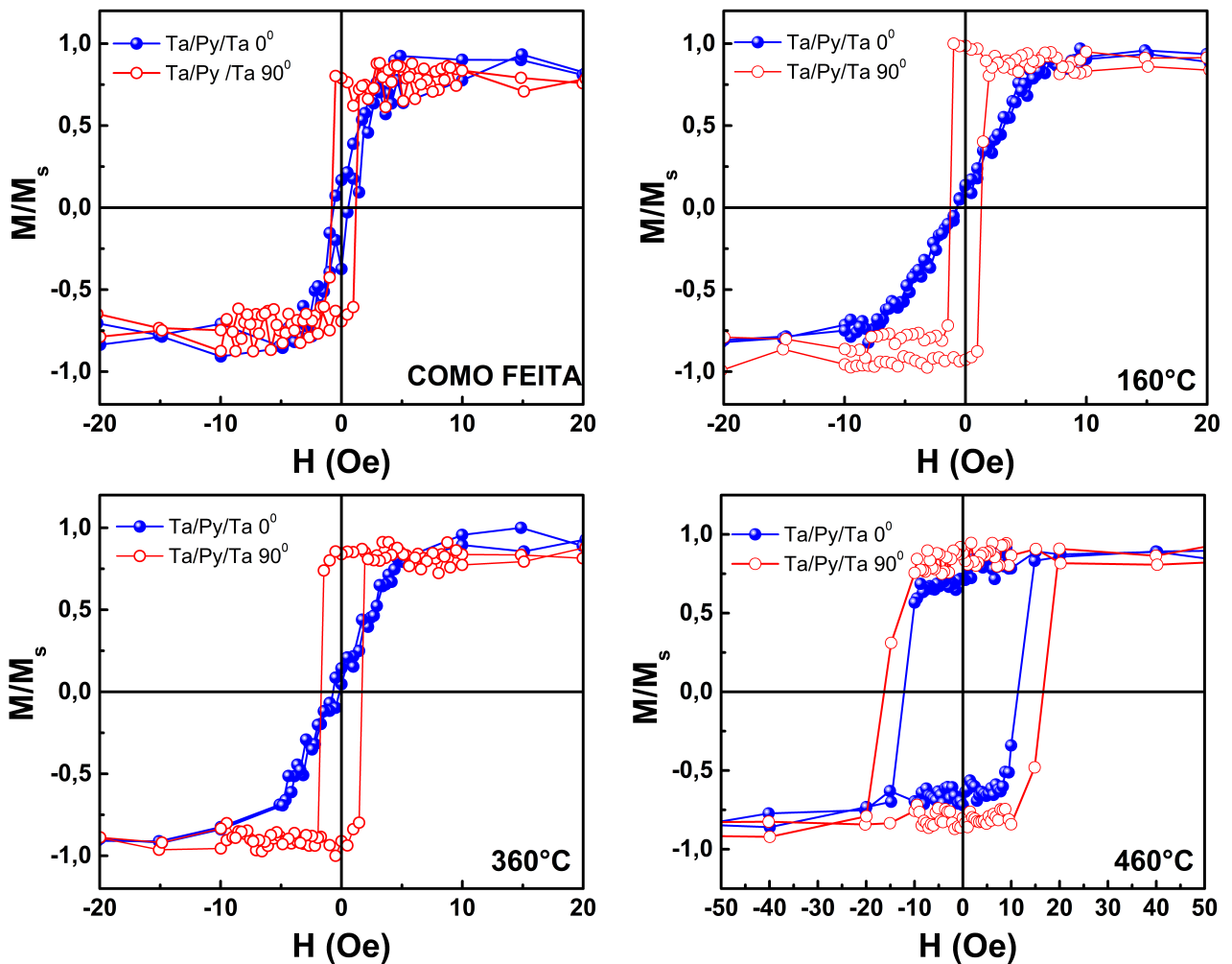


Figura 4.3: Histerese da amostra de Ta/Py/Ta, como feita e tratadas a 160 °C, 360°C e 460 °C, para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$.

4.3 Magnetorresistência

As medidas de MR foram realizadas com a corrente elétrica aplicada sempre ao longo do eixo principal das amostras, ou seja, ao longo do eixo duro de magnetização. Além disto, foram obtidas aquisições para $H // I$, para $H \perp I$ e H a 45° de I , no experimento de magnetorresistência.

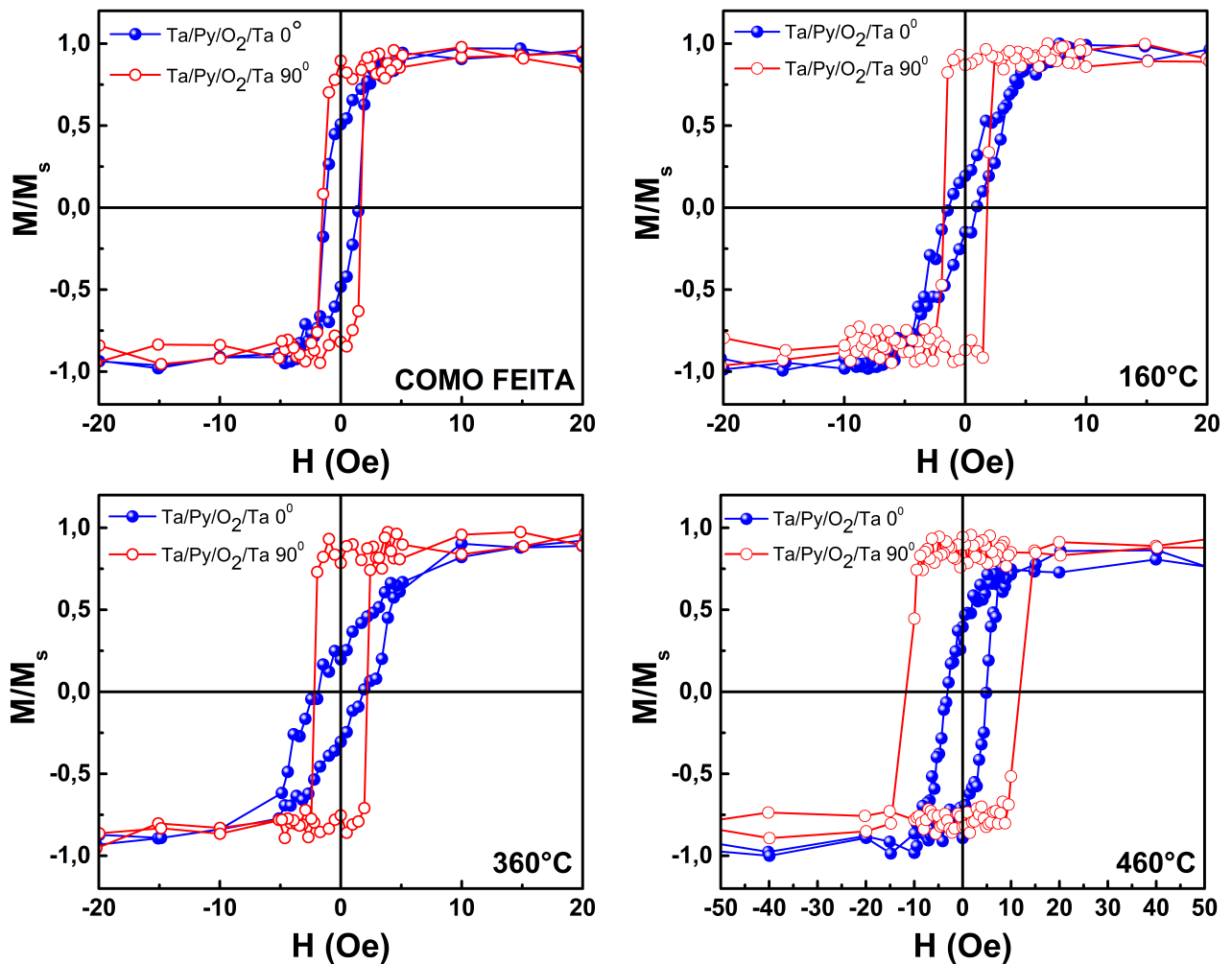


Figura 4.4: Histerese da amostra de Ta/Py/O₂/Ta, como feita e tratadas a 160 °C, 360 °C e 460 °C, para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$.

4.3.1 Curvas de magnetorresistência em função da direção de aplicação do campo magnético

É importante chamar a atenção que, para todas as amostras, as curvas de magnetorresistência que apresentaram as maiores variações de resistência elétrica foram as obtidas com o campo magnético aplicado ao longo do eixo difícil de magnetização. Em particular, devido à reduzida espessura das amostras e à grande sensibilidade do sistema em relação a influências externas, as medidas realizadas com o campo magnético aplicado ao longo do eixo de fácil magnetização, em geral, apresentaram-se muito ruidosas e, para muitas amostras, não foram sequer obtidas.

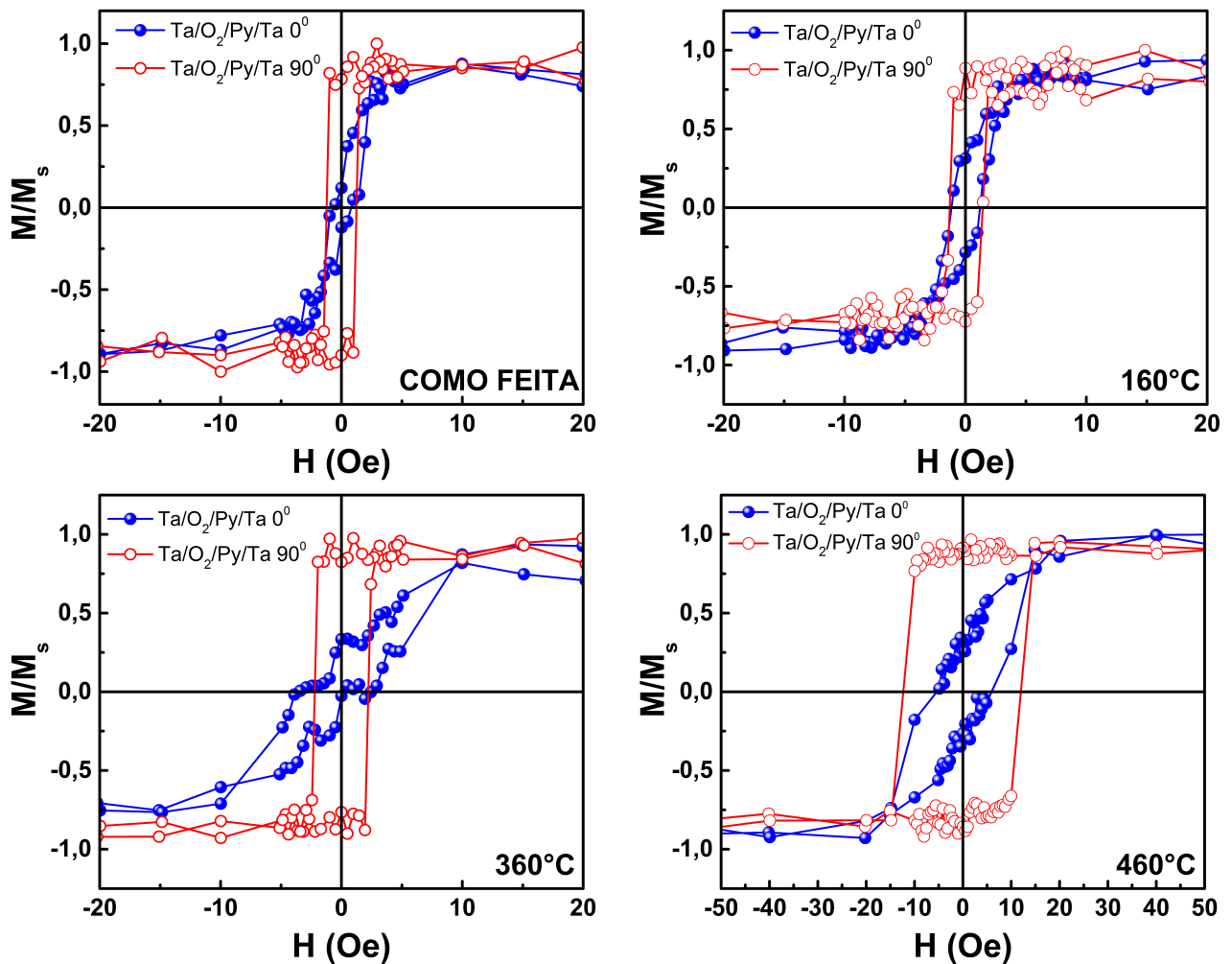


Figura 4.5: Histerese da amostra de Ta/O₂/Py/Ta, como feita e tratadas a 160 °C, 360 °C e 460 °C, para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$.

Na figura (4.7), é apresentado um exemplo das medidas experimentais obtidas para os três diferentes ângulos entre a corrente elétrica aplicada à amostra e a direção do campo magnético aplicado, $\theta = 0^\circ$, 45° e 90° . Neste caso, foram consideradas as medidas obtidas para a amostra Ta/Py/Ta como-feita, entretanto, as características gerais das curvas também são verificadas para as demais amostras.

Em particular, para a curva obtida ao longo de $\theta = 0^\circ$, ou seja, quando o campo magnético externo é aplicado ao longo do eixo de difícil magnetização da amostra e a corrente elétrica flui paralelamente ao campo magnético, a resistência elétrica apresenta um máximo para valores próximos de zero, tendo seu valor reduzido à medida que a

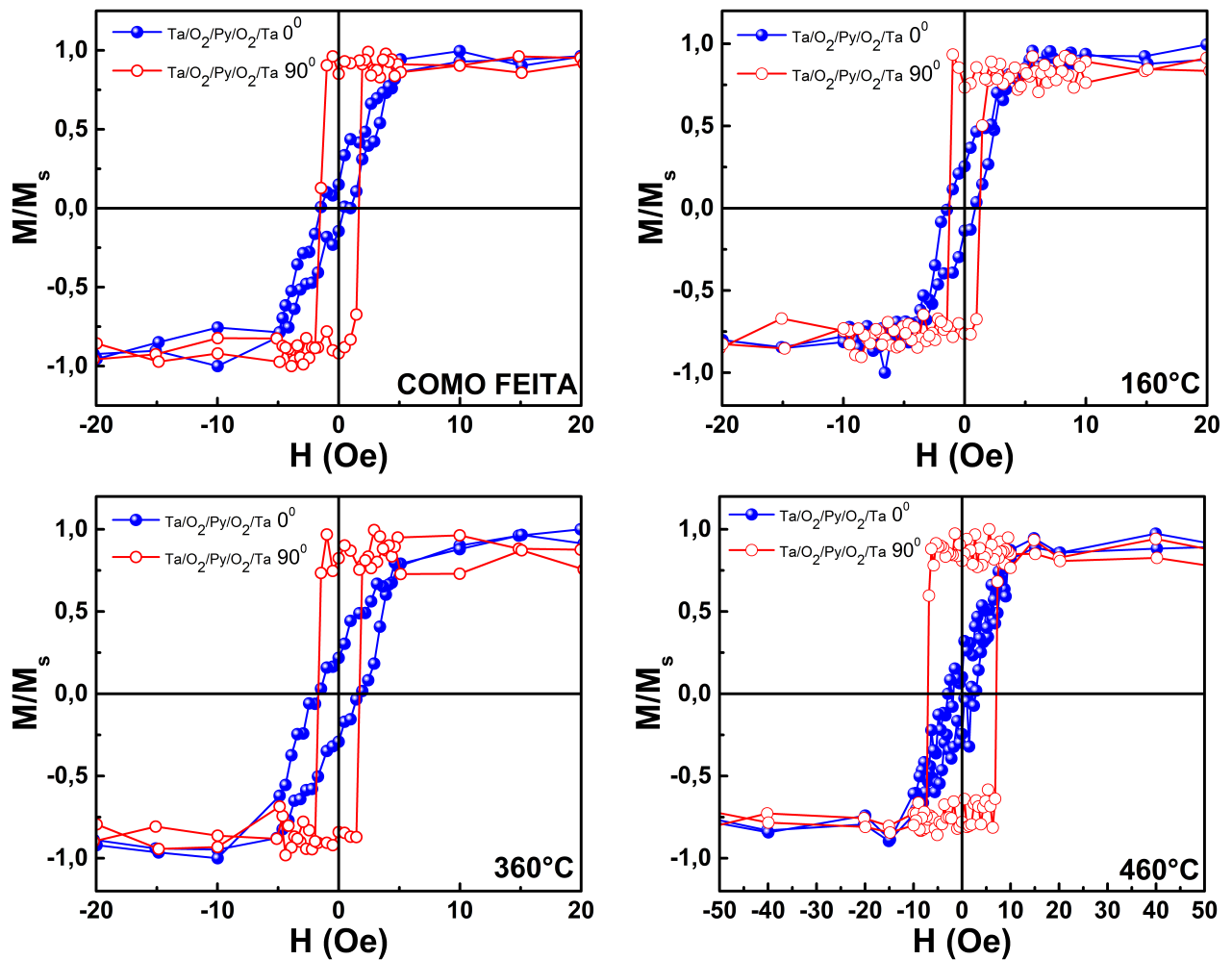


Figura 4.6: Histerese da amostra de Ta/O₂/Py/O₂/Ta, como feita e tratadas a 160 °C, 360 °C e 460 °C, para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$.

amostra é magnetizada até o seu estado saturado.

Por outro lado, para a curva obtida para $\theta = 45^\circ$, apresenta dois máximos, um em $-2,5$ Oe e outro em $2,5$ Oe, e um mínimo nas proximidades do campo nulo.

Por fim, para a curva medida para $\theta = 90^\circ$, observa-se que, no estado saturado, a amostra apresenta resistência elétrica maior do que seu valor para campos próximos de zero, ou seja, quando o campo magnético externo é aplicado ao longo do eixo de fácil magnetização da amostra e a corrente elétrica flui perpendicular a esta direção, observa-se um pico invertido.

É interessante notar que a curva obtida ao longo de $\theta = 0^\circ$ apresenta um pico mais

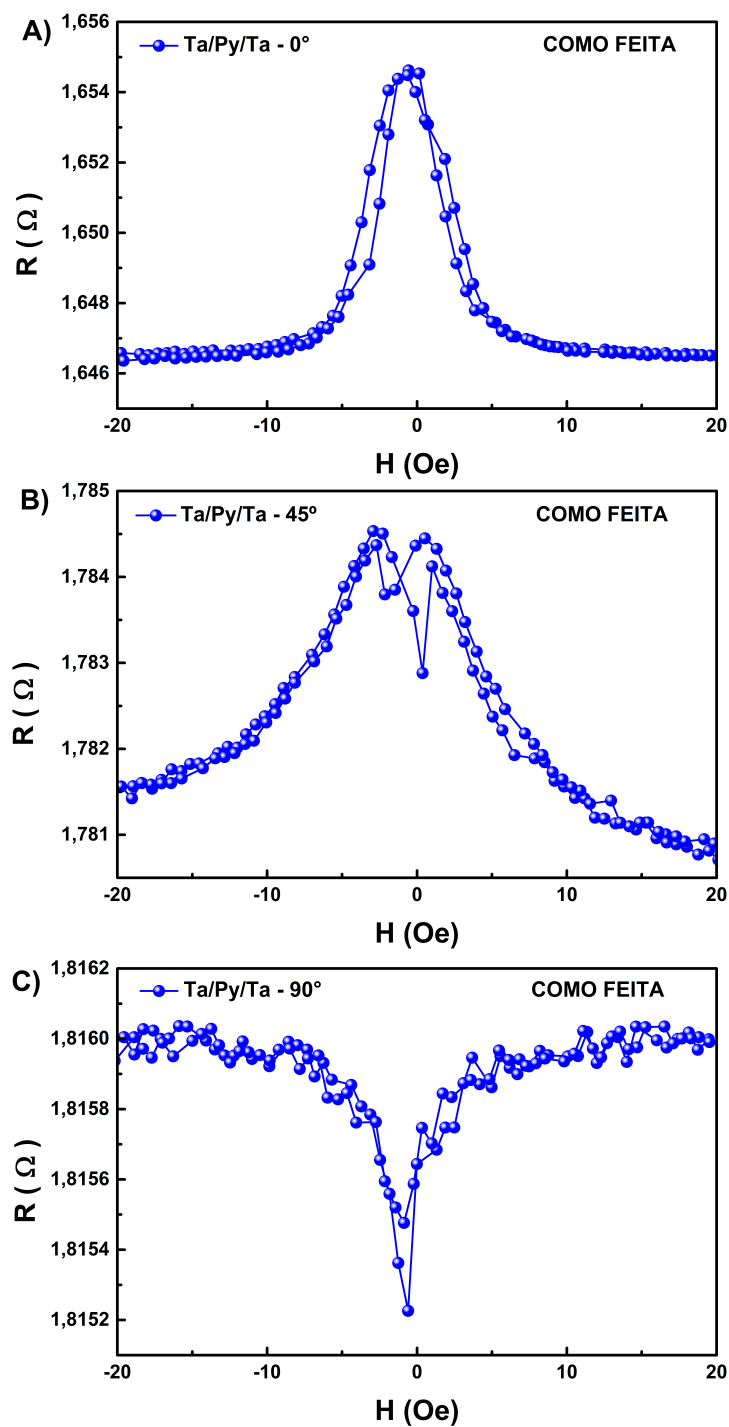


Figura 4.7: Curvas de magnetorresistência para a amostra Ta/Py/Ta como-feita, obtidas para três diferentes ângulos entre a corrente elétrica aplicada à amostra e a direção do campo magnético aplicado A) $\theta = 0^\circ$, B) 45° e C) 90° .

largo, quando comparado com a medida ao longo de $\theta = 90^\circ$, fato que pode ser diretamente relacionado às curvas de magnetização obtidas ao longo das mesmas direções.

4.3.2 Relação entre a curva de histerese e a de magnetorresistência

Como previamente citado, a forma da curva de magnetorresistência está diretamente associada à forma da curva de magnetização. Neste sentido, como exemplos, as figuras (4.8) e (4.9) apresentam a curva de magnetização e a de magnetorresistência para Ta/Py/Ta como-feita, quando medidas com o campo magnético aplicado perpendicular ao eixo principal da amostra e ao longo deste eixo, respectivamente.

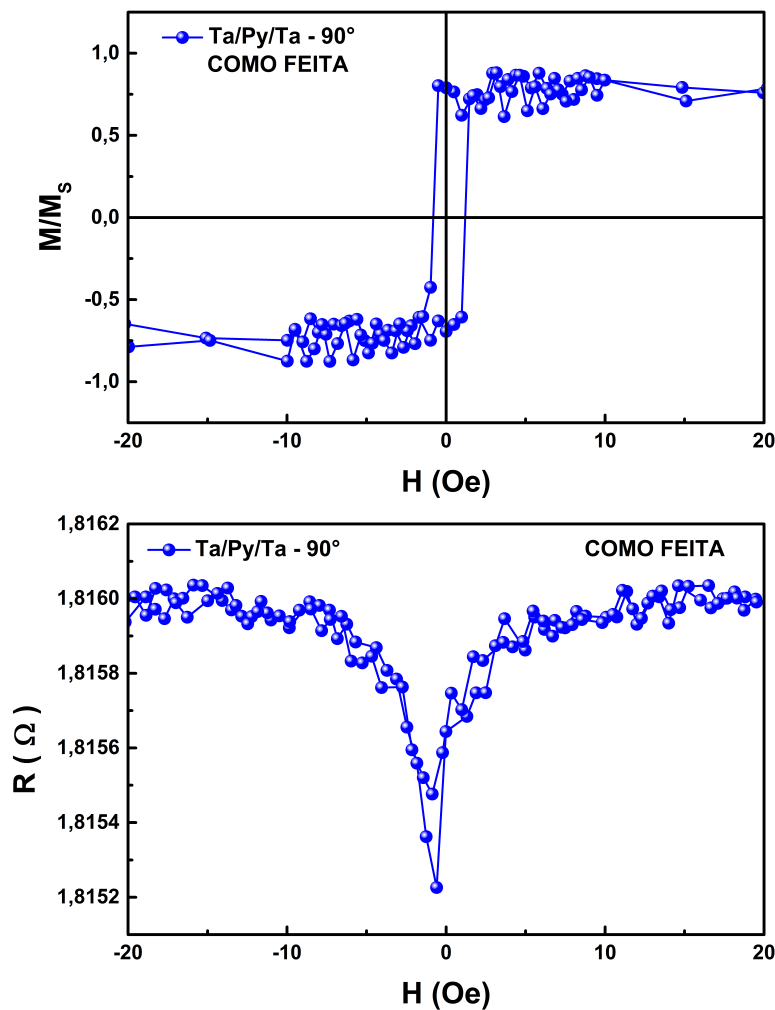


Figura 4.8: Curvas de magnetização e de magnetorresistência da amostra Ta/Py/Ta como-feita, obtidas com o campo magnético aplicado perpendicularmente ao eixo principal da amostra.

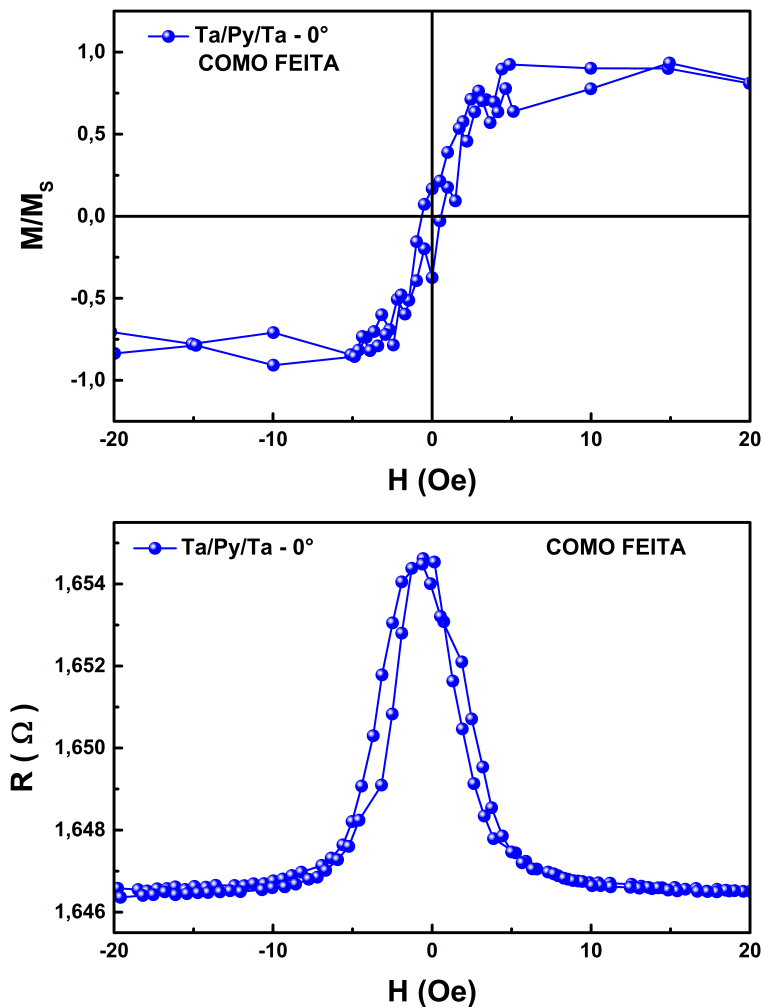


Figura 4.9: Curvas de magnetização e de magnetorresistência da amostra Ta/Py/Ta como-feita, obtidas com o campo magnético aplicado ao longo do eixo principal da amostra.

No caso da figura (4.8), o campo magnético é aplicado ao longo do eixo de fácil magnetização da amostra e, neste caso, a curva de magnetização apresenta um formato quadrado, característico de amostras uniaxiais. Como esperado, observa-se que o valor do campo magnético no qual ocorre a saturação da curva de magnetorresistência é muito próximo do valor do campo de saturação magnética verificado na curva de magnetização, em aproximadamente 5 Oe. Visto que esta amostra apresenta um comportamento magnético macio, ou seja, com campos coercivo de saturação baixos, a largura do pico invertido é pequena.

A posição dos picos na curva de magnetorresistência, em princípio, seria observada em valores de campo próximos ao campo coercivo. Entretanto, esta característica

não foi verificada possivelmente por imprecisão no controle e leitura do campo magnético externo durante a aquisição da curva de MR.

Considerando a figura (4.9), o campo magnético é aplicado ao longo do eixo de difícil magnetização da amostra. Neste caso, devido à anisotropia uniaxial no plano do filme, a curva de magnetização tem a forma de praticamente uma linha reta inclinada, apresentando um campo coercivo muito próximo de zero. Observando os gráficos da figura (4.9), nota-se que o campo magnético necessário para saturação da curva de magnetorresistência é aproximadamente igual ao campo de saturação da curva de magnetização, enquanto que a posição dos picos está muito próxima de zero, como esperado.

4.3.3 Influência das camadas de O₂ sobre o comportamento magnetorresistivo

Nesta seção, discute-se a influência sobre o comportamento magnetorresistivo da presença das camadas de O₂ nas amostras produzidas. Visto que o comportamento da magnetorresistência é dependente das interfaces da amostra, a qualidade das interfaces pode afetar os valores de resistência observados.

Embora tenha-se apresentado a definição tradicional da intensidade da MR através da equação (2.3.1), página 7, neste estudo, será utilizada a seguinte definição:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(H) - R(H_s)}{R(H_s)} \quad (4.3.1)$$

onde $R(H)$ é a resistência elétrica em um dado valor de campo magnético e $R(H_s)$ é a resistência elétrica para o campo magnético externo máximo aplicado durante a medida. Esta definição é vastamente utilizada e encontrada na literatura, tal como nas referências [27, 28].

A figura (4.10) mostra as curvas de MR e intensidade de MR medidas com o campo magnético aplicado paralelamente ao eixo principal da amostra, obtidas para os filmes de Ta/Py/Ta, Ta/Py/O₂/Ta, Ta/O₂/Py/Ta e Ta/O₂/Py/O₂/Ta, na forma como foram depositados, ou seja, sem serem submetidos a tratamento térmico.

Como estas medidas foram realizadas com o campo magnético aplicado ao longo do eixo de difícil magnetização, é verificado que, para três das quatro amostras, há um máximo global em valores de campo próximos de zero, ou seja, o pico nas curvas de

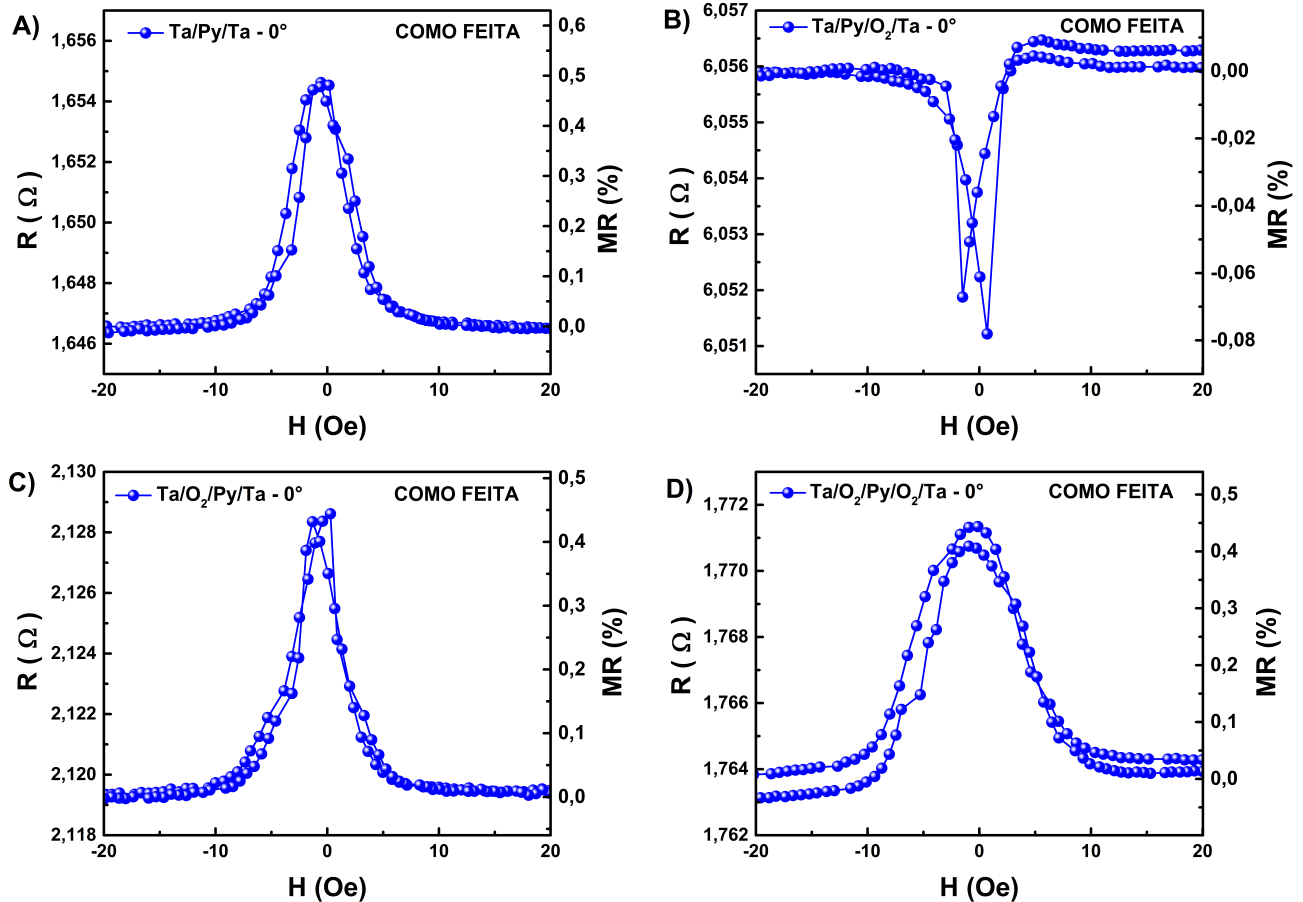


Figura 4.10: Curvas de MR e intensidade de MR, medidas com o campo magnético aplicado paralelamente ao eixo principal da amostra, obtidas para os filmes de Ta/Py/Ta, Ta/Py/O₂/Ta, Ta/O₂/Py/Ta e Ta/O₂/Py/O₂/Ta, na forma como foram depositados.

magnetorresistência não é invertido.

A amostra Ta/Py/O₂/Ta apresentou um mínimo ou pico invertido e este fato está relacionado à menor anisotropia magnética induzida nesta amostra, quando comparada com as demais amostras, ou, em outras palavras, existe uma dispersão de anisotropia.

Em A), para a amostra de Ta/Py/Ta, é observado que o módulo da resistência apresenta um máximo de 1,655 Ω e, para campos com intensidade de ~ 10 Oe, a amostra já atinge sua saturação. A variação máxima da MR é de 0,49%.

Em B), Ta/Py/O₂/Ta, é observado que o ponto de saturação dessa amostra é de 6,056 Ω, a largura média do pico é de 3,19 Oe e a posição do pico é de -0,43 Oe, nessa amostra observamos que existe um valor mínimo absoluto, este valor representa o módulo

máximo da magnetorresistência. O valor máximo de magnetorresistência obtida nessa amostra é de $-0,08\%$.

Em C), amostra Ta/O₂/Py/Ta, o comportamento magnetorresistivo apresenta a resistência máxima no ponto de $2,129 \Omega$, a largura média do pico é de $5,59 \text{ Oe}$ e a posição do pico máximo é de $0,29 \text{ Oe}$. O maior valor de magnetorresistência para essa amostra é de $0,45\%$.

Por fim, em D), amostra Ta/O₂/Py/O₂/Ta, a resistência máxima dessa curva é de $1,771 \Omega$, a largura média do pico é de $10,41 \text{ Oe}$ e posição do pico é de $-0,48 \text{ Oe}$. A magnetorresistência máxima é de $0,44\%$.

Sendo assim, através da análise dos valores de intensidade da MR, não é possível identificar qualquer influência clara da presença das camadas de O₂ sobre o comportamento magnetorresistivo para estas amostras. Embora as amostras apresentem distintas curvas de magnetização e magnetorresistência, estas diferenças não podem ser devotadas apenas à inserção das camadas de O₂, de modo que estudos futuros ainda devem ser realizados para investigar este efeito.

4.3.4 Influência da temperatura dos tratamentos térmicos sobre o comportamento magnetorresistivo

Nesta seção, discute-se a influência da temperatura dos tratamentos térmicos sobre o comportamento magnetorresistivo no conjunto de amostras de Ta/Py/Ta. A mesma análise não é feita para os demais conjuntos de amostras pois, como previamente citado, devido à reduzida espessura das amostras e à grande sensibilidade do sistema em relação a influências externas, não foi possível a obtenção das curvas de magnetorresistência para todas as amostras.

A figura (4.11) mostra curvas de MR e intensidade de MR para as amostras de Ta/Py/Ta como-feita e tratadas a $160 \text{ }^\circ\text{C}$, $360 \text{ }^\circ\text{C}$ e a $460 \text{ }^\circ\text{C}$, quando o campo magnético externo é aplicado paralelamente ao eixo principal da amostra, ou seja, eixo de difícil magnetização.

Todas medidas foram realizadas com o campo magnético aplicado ao longo do eixo de difícil magnetização e apresentam máximos positivos. Em particular, elas refletem claramente a evolução do campo coercivo e campo de saturação das medidas de magnetização apresentadas na figura (4.3).

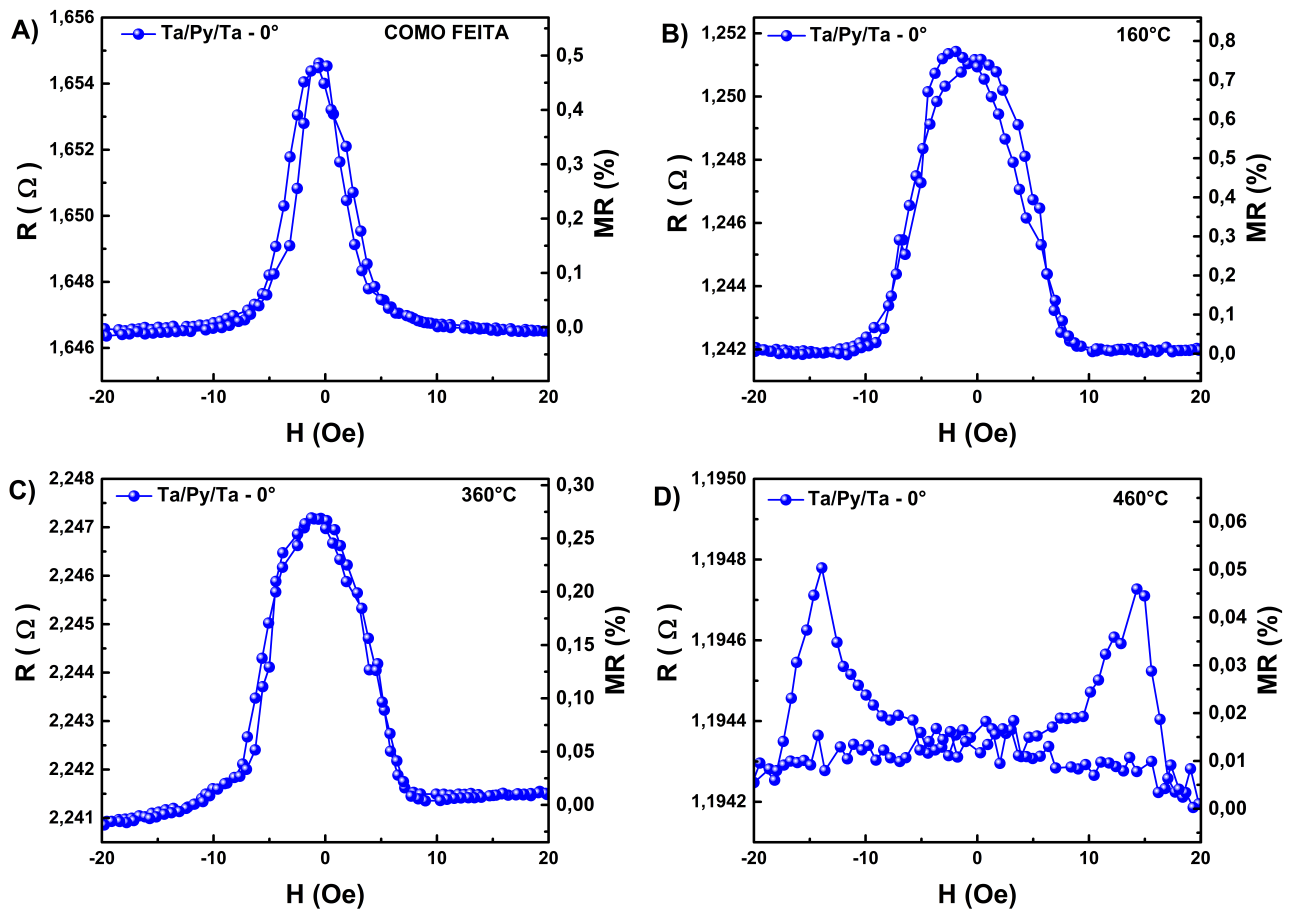


Figura 4.11: Curvas de MR e intensidade de MR, medidas com o campo magnético aplicado paralelamente ao eixo principal da amostra, obtidas para os filmes de Ta/Py/Ta para diferentes temperaturas, sem tratamento térmico e tratadas a 160 °C, 360 °C e 460 °C.

Em A), para a amostra de Ta/Py/Ta como-feita, o valor máximo de resistência é 1,655 Ω , a largura média do pico é de 5,73 Oe e a posição do pico é de $-0,56$ Oe. Além disto, a variação máxima da MR é de 0,49%.

Em B), para a amostra de Ta/Py/Ta submetida a um tratamento térmico a temperatura de 160 °C, observou-se o valor máximo da resistência igual a 1,251 Ω , a largura média do pico é de 10,17 Oe e a posição do pico é de $-0,47$ Oe. A variação máxima da MR nessa curva é de 0,80%.

Na parte C), amostra de Ta/Py/Ta submetida a um tratamento térmico a temperatura de 360 °C, tem-se a resistência máxima de 2,247 Ω , a largura média do pico é de 9,05 Oe e a abscissa do ponto máximo é de $-1,23$ Oe. A variação da MR é de 0,26%.

Em D), para a amostra de Ta/Py/Ta submetida a um tratamento térmico a temperatura de 460 °C, os picos da curva de MR apresentaram grande separação, localizados perfeitamente em valores de campo iguais ao do campo coercivo. De acordo [29] e [30], quando é realizado um processo de tratamento térmico na amostra de Ta/Py/Ta, ocorre uma redução na magnetorresistência. Neste caso, o valor máximo da resistência obtido é de 1,1948 Ω e o valor de MR é de 0,05%.

Considerando todos os resultados apresentados para este conjunto, é verificado que há um aumento na intensidade da MR quando a amostra é submetida a um tratamento térmico de 160 °C, fato possivelmente relacionado à relaxação das tensões residuais acumuladas durante a deposição. Por outro lado, considerando tratamentos térmicos com temperaturas superiores, a intensidade da MR acaba apresentando uma redução. No caso extremo de 460 °C, a drástica redução da intensidade da MR está relacionada ao acúmulo de tensão interna no filme devido à elevada temperatura, associado à redução da anisotropia magnética.

4.3.5 Análise experimental da AMR

A figura (4.12) apresenta o comportamento da magnetorresistência, em função do ângulo entre a corrente elétrica aplicada à amostra e a direção do campo magnético aplicado, para a amostra de Ta/Py/Ta tratada termicamente a 160 °C.

Assim, variando-se a posição angular do goniômetro, porta amostra representado na figura (3.5), página 27, de 15° em 15°, é possível verificar que há uma variação da resistência elétrica da amostra, relacionada à orientação entre o campo magnético aplicado e a corrente elétrica fluindo através da amostra. A mudança na resistência é causada pelo efeito de magnetorresistência anisotrópica, é baseada na combinação magnetostática, configuração dos domínios magnéticos, e da eletrostática, distribuição de corrente elétrica [31]. No início da medida de AMR, o campo magnético externo está paralelo à corrente elétrica que atravessava o filme, resultando em um valor máximo de resistência.

Neste caso, é possível verificar que a amostra apresenta maior valor de resistência elétrica quando $H//I$ e valores mínimos de resistência quando $H \perp I$, como esperado e usualmente encontrado na literatura.

Como ponto importante a ser citado neste trabalho, tem-se que, embora as medidas de AMR tenham se mostrado conforme encontrado na literatura, as medidas de MR

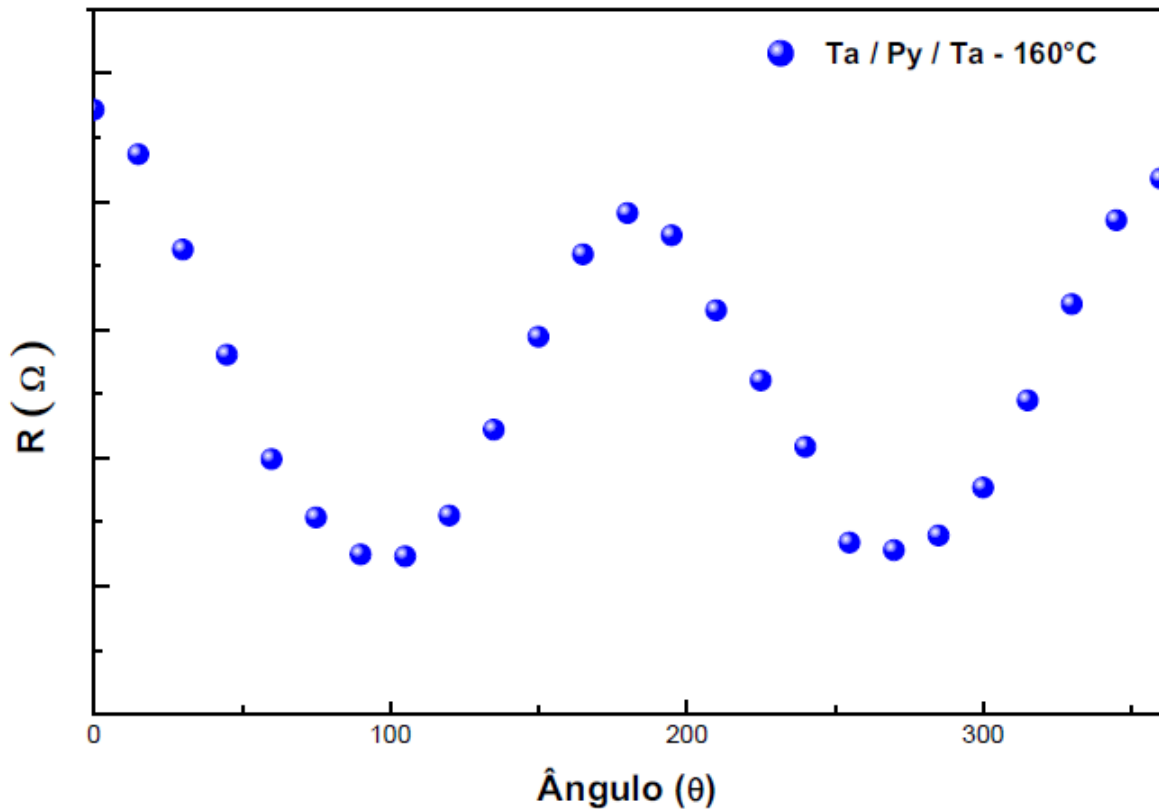


Figura 4.12: Comportamento da magnetorresistência em função do ângulo entre a corrente elétrica aplicada à amostra e a direção do campo magnético aplicado, para a amostra de Ta/Py/Ta tratada termicamente a 160 °C.

apresentaram um comportamento peculiar. Para todas as curvas de resistência em função do campo magnético (figuras (4.7), (4.8), (4.9), (4.10), (4.11)), quando o campo magnético foi aplicado paralelo à direção da corrente elétrica, ou seja, ao longo do eixo principal da amostra e do eixo de difícil de magnetização, foi observado um pico de resistência, enquanto que o esperado seria um mínimo de resistência elétrica para campos próximos de zero. Por outro lado, quando o campo magnético foi aplicado perpendicular à direção da corrente elétrica, ou seja, perpendicular ao eixo principal da amostra e paralelo ao eixo de fácil magnetização, foi observado um pico invertido de resistência, enquanto que o esperado seria um máximo de resistência elétrica para campos próximos do campo coercivo. Este fato ainda não está esclarecido e é motivo de investigação. Os resultados das curvas de MR estão em contradição com as referências [28, 32].

CAPITULO 5

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, foram estudadas as propriedades estruturais e magnéticas e a magnetorresistência anisotrópica de filmes finos de $Ni_{81}Fe_{19}$, na forma de como-feita e tratadas termicamente com temperaturas de 160 °C, 360 °C e 460 °C, com ou sem a inserção de camadas de O_2 . A ideia inicial deste trabalho foi estudar a influência da estrutura das amostras e tratamentos térmicos sobre as propriedades magnetorresistivas do conjunto de amostras. Entretanto, devido à reduzida espessura das amostras e à grande sensibilidade do aparato experimental em relação à influências externas, não foi possível a obtenção das curvas de magnetorresistência para todas as amostras.

Através da caracterização estrutural, foi verificado que todas as amostras produzidas possuem caráter estrutural cristalino, independentemente da presença de camadas de O_2 e da realização de tratamentos térmicos.

Através da caracterização magnética, verificou-se que as amostras produzidas apresentam comportamento magnético uniaxial, com eixo de fácil magnetização orientado ao longo da direção do campo magnético aplicado durante a deposição. Este comportamento magnético também é verificado nas amostras submetidas a tratamento térmico, embora a coercividade tenha sido aumentada, devido ao armazenamento de tensões internas durante o tratamento.

As curvas de histerese permitiram a identificação do eixo de fácil e difícil magnetização das amostras. A partir desta identificação, foram realizadas medidas de magnetorresistência. Em particular, devido ao formato das amostras fornecidas, somente foram

obtidas curvas de MR com a corrente elétrica aplicada ao longo do eixo principal da amostra, verificado como sendo o eixo de difícil magnetização.

Com as curvas de magnetização obtidas, foi possível relacionar o comportamento da MR com as variações da magnetização em função do campo. Em particular, foi possível observar que as curvas de MR apresentam campos de saturação e posição dos picos em valores de campo próximos à saturação das curvas de magnetização e campo coercivo, respectivamente.

Considerando todas as amostras estudadas, a amostra de Ta/Py/Ta submetida a um tratamento térmico de 160°C apresentou o maior valor de MR%, de aproximadamente 0,8%. Entretanto, não foi possível identificar uma clara influência das camadas de O₂ e da temperatura dos tratamentos térmicos sobre o comportamento magnetorresistivo. Apenas foi observado que magnetorresistência é drasticamente reduzida quando as amostras são submetidas a tratamentos com temperaturas acima de 360 °C.

Considerando a magnetorresistência anisotrópica, foi comprovado o efeito de AMR está de acordo com a equação (2.3.16), página 19. Neste caso, foi possível verificar que a amostra apresenta maior valor de resistência elétrica quando $H // I$ e valores mínimos de resistência quando $H \perp I$, como esperado e usualmente encontrado na literatura.

Como ponto importante a ser destacado neste trabalho, tem-se que, embora as medidas de AMR tenham se mostrado conforme encontrado na literatura, as medidas de MR apresentaram um comportamento peculiar. Para todas as curvas de resistência em função do campo magnético (figuras (4.7), (4.8), (4.9), (4.10), (4.11)), quando o campo magnético foi aplicado paralelo à direção da corrente elétrica, ou seja, ao longo do eixo principal da amostra e eixo de difícil de magnetização, foi observado um pico de resistência, enquanto que o esperado seria um mínimo de resistência elétrica para campos próximos de zero. Por outro lado, quando o campo magnético foi aplicado perpendicular à direção da corrente elétrica, ou seja, perpendicular ao eixo principal da amostra e paralelo ao eixo de fácil magnetização, foi observado um pico invertido de resistência, enquanto que o esperado seria um máximo de resistência elétrica para campos próximos do campo coercivo. Este fato ainda é não está esclarecido e é motivo de investigação.

Sendo assim, a continuidade deste trabalho se dará, em um primeiro momento, através da investigação das curvas de magnetorresistência em função da direção de aplicação do campo magnético em relação à direção da corrente elétrica, com o intuito de

compreender o comportamento dos picos observados.

Além disto, visa-se produzir um novo conjunto de amostras, com diferentes parâmetros de deposição, estrutura de amostras e composições, a fim de investigar suas influências sobre o comportamento magnetorresistivo.

REFERÊNCIAS

- [1] BATISTELA, N. J.; CARLSON, R.; SADOWSKI, N.; LEITE, J. V. **Caracterização Magnética de Lâminas de Aço Silício e Avaliação das Perdas no Ferro sob Vários Regimes de Indução**. Sba Controle & Automação, vol. 13, n. 2, p. 1-9, 2002.
- [2] SOUZA, T. F. **Multicamadas ferromagnéticas nanométricas periódicas e quasiperiódicas**. 2010. 116p. Tese (Doutorado em Física) - Departamento de Física Teórica e Experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2010.
- [3] KRZYK, S.; SCHMIDSFELD, A.; KLAUI, M.; RUDIGER, U. **Magnetotransport Effects of Ultrathin Ni₈₀Fe₂₀ Films Probed *in situ***. New Journal of Physics, vol. 12, p. 1-15, 2010.
- [4] MORI, T. J. A. **Crescimento de filmes finos de Ni₈₁Fe₁₉ para aplicações envolvendo magnetorresistência anisotrópica**. 2011. 118p. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2011.
- [5] Disponível em: <www.ebah.com.br/content/ABAAABKdwAF/materiais-magneticos>. Acesso em: 07 de janeiro de 2013.
- [6] Disponível em: <www.mspc.eng.br/elemag/eletrm0260.shtml>. Acesso em: 07 de janeiro de 2013.
- [7] MACHADO, Kleber D. **Teoria do eletromagnetismo**. 3ª ed. Ponta Grossa: UEPG, 2005. Volume II.

- [8] PEDROSA FILHO, M. H. O. **Materiais Magnéticos**. Disponível em: <ma-noel.pesqueira.ifpe.edu.br/cefet/anterior/2007.1/magnetismo/MatMag.htm>. Acesso em: 07 de março de 2013.
- [9] <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Magnetorresistencia>>. Acesso em: 21 de novembro de 2012.
- [10] GETZLAFF, M. **Fundamentals of magnetism**. Germany: Springer, 2008. 387p.
- [11] BAIBICH, M. N.; BROTO, J. M.; FERT, A.; NGUYEN VAN DAU, F.; PETROFF, F. **Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices**. Physical Review Letters, vol. 61, n. 21, p. 2472 - 2475, 1988.
- [12] OLIVEIRA, A. B. **Magnetorresistência em filmes e multicamadas magnéticas**. 2005. 144p. Tese (Doutorado em Física) - Departamento de Física, Universidade Federal do Pernambuco, Recife. 2005.
- [13] SESHADRI, R. **Colossal magnetoresistance**. Notas de aula, UCSB.
- [14] CALDERÓN, P. M. J. **Magnetic and electric properties of systems with colossal magnetoresistance**. 2001. 210p. Tese (Doutorado em Física) - Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad Autónoma de Madrid, Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC), Madrid. 2001.
- [15] FERREIRA, GERSON J. **Ferromagnetismo no regime Hall quântico inteiro via teoria funcional de densidade**. 2011. 139p. Tese (Doutorado em Ciências: Física) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2011.
- [16] CASAGRANDE, D. J. **Propriedades de magneto-transporte gigante em sistemas granulares**. 2002. 116p. Tese (Doutorado em Física) - Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2002.
- [17] <http://physics.unl.edu/tsymbol/reference/spin-dependent_tunneling/tunneling_magnetoresistance.shtml>. Acesso em: 30 de janeiro de 2013.
- [18] FERNANDES, I. L. **Polarização magnética das correntes de tunelamento**. 2011. 89p. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 29 de abril de 2011.

- [19] CAMPBELL, I. A.; FERT, A. **Transport Properties of Ferromagnets**. Editora E. P. Wohlfarth. Chapter 9.
- [20] CHECKELSKY, J. **Anisotropic Magnetoresistance of $F_x\text{Co}_{1-x}\text{S}_2$** . 2004. 62p. Tese (Doutorado em Física) - Harvey Mudd College. 2004.
- [21] CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction To Magnetic Materials**. 2ª Edição. Piscataway: IEEE Press, 2009. 544p.
- [22] KITTEL, C. **Introdução à Física do Estado Sólido**. Tradução Ronaldo Sérgio de Biasi. 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 578p.
- [23] ASHCROFT, Neil W.; David Mermin, N. **Física do Estado Sólido**. Tradução Maria Lucia Godinho de Oliveira. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 870p.
- [24] SCHNEIDER, J. A. **A Influência de uma Camada Magneticamente Macia em Filmes Finos que Apresentam Exchange Bias**. 2012. 33p. Trabalho de conclusão (Bacharel em Física) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto alegre. 2012.
- [25] TAKEUCHI, A. Y. **Técnicas de Medidas Magnéticas**. São Paulo: Editora Livraria da Física: Rio de Janeiro: CBPF - Centro Brasileiro de Pesquisa Físicas, 2010. (Coleção tópicos em física).
- [26] BURGEI, W.; PECHAN, M. J.; JAEGER, H. **A Simple Vibrating Sample Magnetometer for Use in a Materials Physics Course**. American Journal of Physics, vol. 71, n. 8, p. 825-828, august 2003.
- [27] PARKIN, S. S. P.; BHADRA, R.; ROCHE, K. P. **Oscillatory magnetic exchange coupling through thin copper layers**. Physical Review Letters, vol. 66, n. 16, p. 2152 - 2155, 1991.
- [28] Nie, H. B.; Xu, S. Y.; Li, J.; Ong, C. K. **Magnetic anisotropy and magnetoresistance of sputtered $[(\text{FeTaN})/(\text{TaN})]_n$ multilayers**. Journal of applied physics, vol. 91, n. 10, p. 7532 - 7534, 2002.
- [29] Chong-Jun Zhao; Yang Liu; Jing-Yan Zhang; Li Sun; Lei Ding; Peng Zhang; Bao-Yi Wang; Xing-Zhong Cao; Guang-hua Yu. **Mechanism of magnetoresistance ratio enhancement in MgO/NiFe/MgO heterostructure by rapid thermal annealing**. Applied Physics Letters, vol. 101, p. 072404-1 - 072404-5, 2012.

- [30] Lei Ding; Jiao Teng; Qian Zhan; Chun Feng; Ming-hua Li; Gang Han; Li-jin Wang; Guang-hua Yu; Shu-yun Wang. **Enhancement of the magnetic field sensitivity in Al_2O_3 encapsulated NiFe films with anisotropic magnetoresistance.** Applied Physics Letters, vol. 94, p.162506-1 - 162506-3, 2009.
- [31] BUNTINIX, D.; VOLODIN, A.;VAN HAESENDONCK, C. **Influence of local anisotropic magnetoresistance on the total magnetoresistance of mesoscopic NiFe rings.** Physical Review B, vol. 70, p. 224405-1 - 224405-5, 2004.
- [32] LORENZ, T.; KAUFLER, A.; LUO, Y.; MOSKE, M.; SAMWER, K. **Dependence of magnetic anisotropy and magnetoresistance of $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ on annealing.**