

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA
MESTRADO EM FÍSICA**

**INDUÇÃO DE UM EIXO FÁCIL DE MAGNETIZAÇÃO
UTILIZANDO MÁSCARAS DE SOMBREAMENTO EM
FILMES FINOS DE CoFeB¹**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Veridiana dos Santos Fenalti

**Santa Maria, RS, Brasil
2012**

¹ Trabalho parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

INDUÇÃO DE UM EIXO FÁCIL DE MAGNETIZAÇÃO UTILIZANDO MÁSCARAS DE SOMBREAMENTO EM FILMES FINOS DE CoFeB

Veridiana dos Santos Fenalti

**Defesa da Dissertação apresentada ao Mestrado de Física, do
Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa
Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Física**

Orientador: Prof^o. Dr^o. Lucio Strazzabosco Dorneles

**Santa Maria, RS, Brasil
2012**

**Universidade Federal de Santa Maria
Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa
Mestrado em Física**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**INDUÇÃO DE UM EIXO FÁCIL DE MAGNETIZAÇÃO UTILIZANDO
MÁSCARAS DE SOMBREAMENTO EM FILMES FINOS DE CoFeB**

elaborada por

Veridiana dos Santos Fenalti

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof.º Dr.º Lucio Strazzabosco Dorneles (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof.º Dr.º Fábio Teixeira Dias (UFPEl)

Prof.º Dr.º Eleonir João Calegari (UFSM)

Santa Maria, 30 de janeiro de 2012.

DEDICATÓRIA

A cada linha deste trabalho dedico primeiramente a Deus, o ser supremo que sempre está me carregando em seus braços e fazendo que a cada pedra encontrada em meu caminho, eu a faça de alicerce para crescer nessa jornada terrena.

Aos meus pais, Angelo Tadeu Fenalti e Eva dos Santos Fenalti, guerreiros que sempre me deram o exemplo de força e dedicação, a cada noite mal dormida, via vocês incessantemente preocupados, mesmo sem ter grandes condições de ajudar neste trabalho, vocês sim me ajudaram a acreditar em mim e principalmente agradeço a vocês pela paciência, carinho e amor, não só nesta etapa da minha vida, mas desde o meu nascimento até os atuais dias, o meu MUITO OBRIGADA não é o suficiente para dizer o quanto sou grata a vocês.

Dedico todo meu esforço a minha vó Elvina, que hoje devido a uma forte doença, não pode estar lendo e compreendendo esse trabalho, mas ela é uma das grandes responsáveis, meu amor por você Vó é imenso e incomparável, obrigada por sempre estar do meu lado me apoiando e acreditando em mim.

Por fim dedico este trabalho a meu grande amigo, e irmão, Tiago dos Santos Fenalti *meu mano*, a minha caminhada nos estudos foi e sempre será espelhada no teu exemplo de dedicação e responsabilidade com tudo que fazes na vida, obrigada por sempre que preciso dedicar momentos da tua vida a me ajudar, conversar e sempre estar do meu lado, sem você realmente não sei como seria minha vida, eu te amo e me orgulho em ter você na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que direta ou indiretamente ajudaram-me na construção deste trabalho, seria impossível lembrar o nome de todos, ou até mesmo citar, mas desde já deixo aqui meu sincero agradecimento.

Primeiramente agradeço ao Prof.^o Dr.^o Lucio Strazzabosco Dorneles, pela orientação, pela confiança em meu trabalho, por muitas discussões e companheirismo durante todo o desenrolar desse.

Agradeço aos colegas e demais professores do *LMMM*, pelas dicas, conversas e ajudas prestadas. E também ao Prof.^o Dr.^o Fábio Mallmann Zimmer, pelas suas colaborações como referi deste trabalho ajudando a aprimorar o mesmo.

Em especial agradeço aos meus grandes amigos, Josué e Diogo, pela amizade e carinho sempre dedicado a mim, pelos puxões de orelha quando necessário, pelas belas conversas durante o almoço no R.U., e agradeço não só pela amizade durante o mestrado, mas amizade que se estende desde a época da graduação.

Aos de mais amigos que sempre me incentivaram a continuar batalhando pelos meus ideais, pela paciência e compreensão da minha ausência devido aos estudos, mas mesmo assim eles estavam presentes na minha vida. O valor da amizade não tem explicação, a vocês amigos sintam-se parte desta minha conquista.

A minha família, agradeço constantemente por acreditarem em meu sonho, por me auxiliarem a construir degrau por degrau de minha vitória e apostarem que eu era capaz de conquistar, agradeço por secarem minhas lágrimas e delas fazerem virar um sorriso.

Agradeço a minha comadre que me deu um presente inenarrável, meu afilhado Pietro, que sempre me mantêm cheia de carinho e amor quando o vejo, uma benção em minha vida.

E não só dedico, como agradeço a Deus pela oportunidade oferecida para eu me especializar dentro da minha profissão, e por nunca ter me deixado andar sozinha nesta jornada.

"A ciência sem a religião é manca, a religião sem a ciência é cega." (Albert Einstein)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Física
Universidade Federal de Santa Maria

INDUÇÃO DE UM EIXO FÁCIL DE MAGNETIZAÇÃO UTILIZANDO MÁSCARAS DE SOMBREAMENTO EM FILMES FINOS DE CoFeB

AUTOR: VERIDIANA DOS SANTOS FENALTI

ORIENTADOR: PROF^o. DR^o. LUCIO STRZZABOSCO DORNELES

Data e local da defesa: Santa Maria, 30 de janeiro de 2012.

Filmes finos de CoFeB foram produzidos utilizando a técnica de magnetron sputtering. Foram produzidas seis amostras de filmes finos magnéticos com duas espessuras diferentes, utilizando diferentes configurações para máscaras de sombreamento. Para cada filme foram feitas duas medidas de magnetização, uma paralela ao eixo fácil de magnetização, e outra perpendicular ao eixo. Os filmes produzidos com máscaras de sombreamento não magnéticas apresentam uma configuração magnética deteriorada em comparação aos produzidos com máscaras de material magnético com um corte. Diferentes espessuras dos filmes proporcionam diferentes valores do campo coercivo da amostra, para os filmes mais espessos temos um aumento no campo coercivo. Com esses resultados há uma possibilidade de confecção de junções túnel visando medidas de magneto resistência túnel com filmes de CoFeB como eletrodo.

Palavras-chave: Filmes Finos, Magnetização, Máscaras de Sombreamento.

ABSTRACT

Master Degree's Dissertation
Graduate Program in Physics
Universidade Federal de Santa Maria

INDUCTION OF A SHAFT OF EASY MAGNETIZATION USING CoFeB MASKS IN SHADING THIN FILMS

AUTHOR: VERIDIANA DOS SANTOS FENALTI
ADVISOR: PROF^o. DR^o. LUCIO STRZZABOSCO DORNELES
Date and place of defense: Santa Maria, January 30, 2012.

CoFeB thin films were produced using the technique of magnetron sputtering. Six samples were produced magnetic thin films with two different thicknesses, using different settings for shading masks. For each film were made two measurements of magnetization, a parallel to the easy axis of magnetization, and the other perpendicular to the axis. The films produced with shading masks non-magnetic show a deteriorated magnetic configuration compared to those produced with magnetic material with a cut. Different thicknesses of the films provide different values in the coercive field of the sample. The thicker films have an increase in the coercive field. With these results there is a possibility of making tunnel junctions measures aimed tunnel magneto-resistance with CoFeB films as an electrode.

Keywords: Thin Films, Magnetization, Shading masks.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	8
1. REVISÃO TEÓRICA.....	11
1.1 Histerese.....	11
1.2 Anisotropia.....	13
1.3 Filmes de CoFeB.....	15
2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	17
2.1 As amostras produzidas.....	17
2.2 Sistema de deposição.....	19
2.3 Produção dos Alvos.....	20
2.4 Deposição das amostras.....	21
2.5 Calibração das taxas de deposição.....	25
2.6 Medidas de Magnetização.....	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
3.1 Medidas de magnetização.....	31
4. CONCLUSÕES.....	42
5. PERSPECTIVAS FUTURAS.....	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

INTRODUÇÃO

Atualmente existe um grande interesse em Junções Túnel Magnéticas (MTJ's) apresentando magneto resistência túnel (TMR) [1, 2, 3, 4]. No Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos (LMMM), no qual este trabalho foi desenvolvido, a tempos vem sendo feitas pesquisas em MTJ's [4,5] na tentativa de reproduzir valores de TMR, tentativas essas sem grande sucesso.

Para medidas de TMR nas junções túnel magnéticas é importante que os campos coercivos dos eletrodos sejam diferentes, para a partir da aplicação de um campo magnético externo, seja possível obter uma situação onde a magnetização de um eletrodo aponte em um sentido, e a magnetização do outro eletrodo no sentido oposto, como mostra a figura (1).

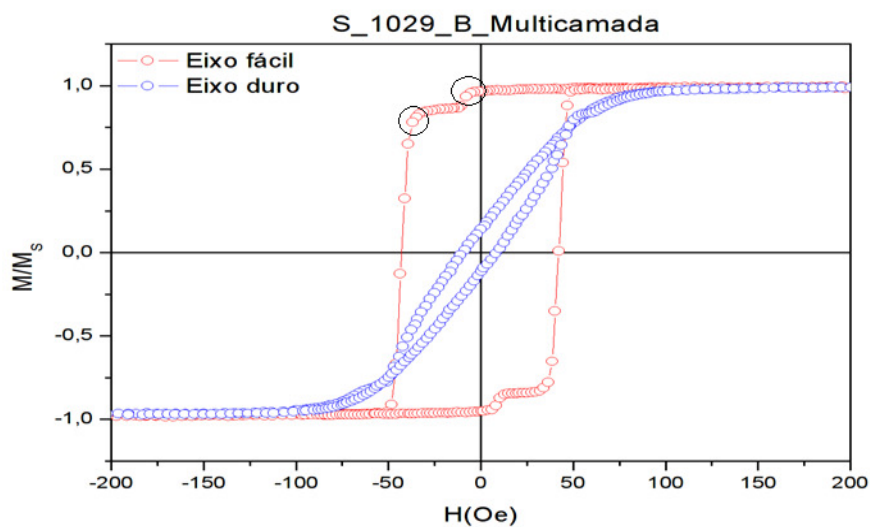


FIGURA 1- Multicamada - CoFeB(850Å)/MgO(15Å)/CoFeB(50Å) (figura extraída da ref. [4])

No Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos (LMMM), são produzidas junções túnel usando máscaras não magnéticas (figura 2), e em alguns dos trabalhos não é possível verificar a inversão da magnetização dos eletrodos como diferentes campos coercivos (figura 3). Como consequência, não é possível medir TMR. Uma explicação possível é o desvio das linhas de campo através das máscaras de sombreamento. Apesar das máscaras utilizadas serem de material não

magnético, quando depositado os eletrodos ferromagnéticos, ocorre a formação de um filme ferromagnético macio nas máscaras [4].



FIGURA 2 - Máscara de sombreamento não magnética utilizada nos experimentos do LMMM.

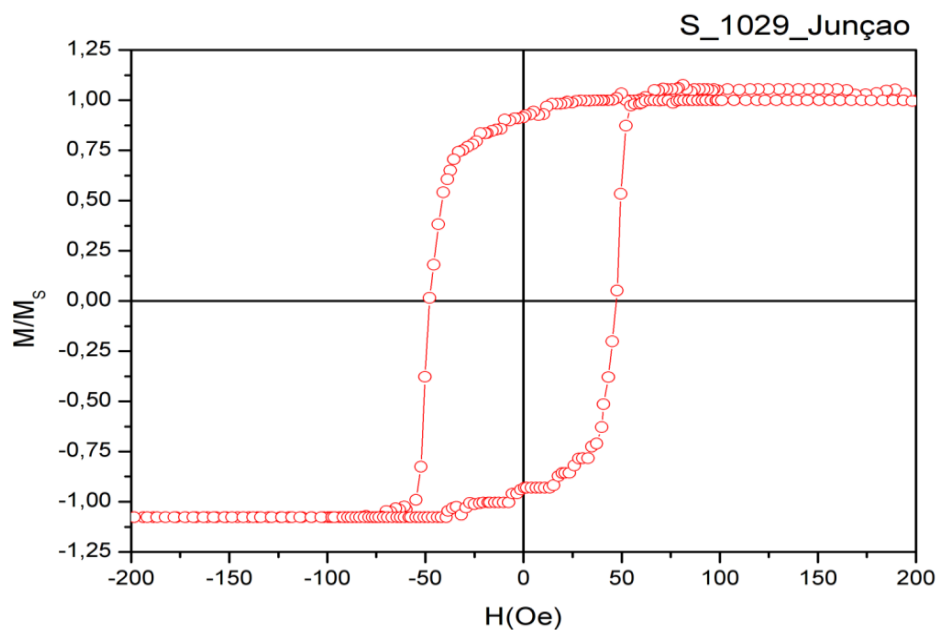


FIGURA 3 - Junção de Ta(50Å)/CoFeB(850Å)/TM/MgO(15Å)/TM/CoFeB(50Å)/Ta(Å)] (figura extraída da ref.[4])

Uma possível solução para produzir camadas que contenham campos coercivos diferentes mesmo usando máscaras de sombreamento é testar filmes, de CoFeB, com máscaras de sombreamento de diferentes configurações e diferentes espessuras, para dessa forma analisar como se comporta o campo coercivo em cada uma das amostras, com diferentes configurações das máscaras. Em particular este é um dos objetivos principais do presente trabalho. Para tal, produzimos várias

amostras obtidas pela técnica de *magnetron sputtering*, (explicada detalhadamente nas seções seguintes) e posteriormente, analisamos estas utilizando o Magnetômetro de Gradiente de Campo Alternado (AGFM –Alternating Gradient Field Magnetometer).

O trabalho o qual segue está estruturado da seguinte maneira. No primeiro capítulo apresentamos o desenvolvimento teórico envolvido no efeito de tunelamento para junções túnel magnéticas e a relação do campo coercivo com a espessura do filme. No segundo os procedimentos experimentais como deposição de amostras, preparação de alvos, medidas de magnetização, espessura, entre outros são discutidos. No terceiro capítulo temos os resultados obtidos a partir de medidas de magnetização e as discussões dos resultados. No quarto as conclusões e perspectivas para prosseguimento do trabalho são apresentados.

1 REVISÃO TEÓRICA

1.1 Histerese

Certos materiais possuem magnetização mesmo sem campo magnético aplicado, e são chamados de materiais ferromagnéticos. O ferromagnetismo tem origem nos momentos magnéticos atômicos dos ferromagnetos que tendem a alinhar-se naturalmente numa mesma direção, assim, fornecendo uma magnetização espontânea. Acima de uma determinada temperatura (temperatura de Curie) este alinhamento é destruído e conseqüentemente desaparece o ferromagnetismo e o material se torna paramagnético. Em outras palavras, para temperaturas acima da temperatura de Curie não é observado magnetização espontânea. Porém o material pode apresentar magnetização não nula com a aplicação de um campo magnético externo H .

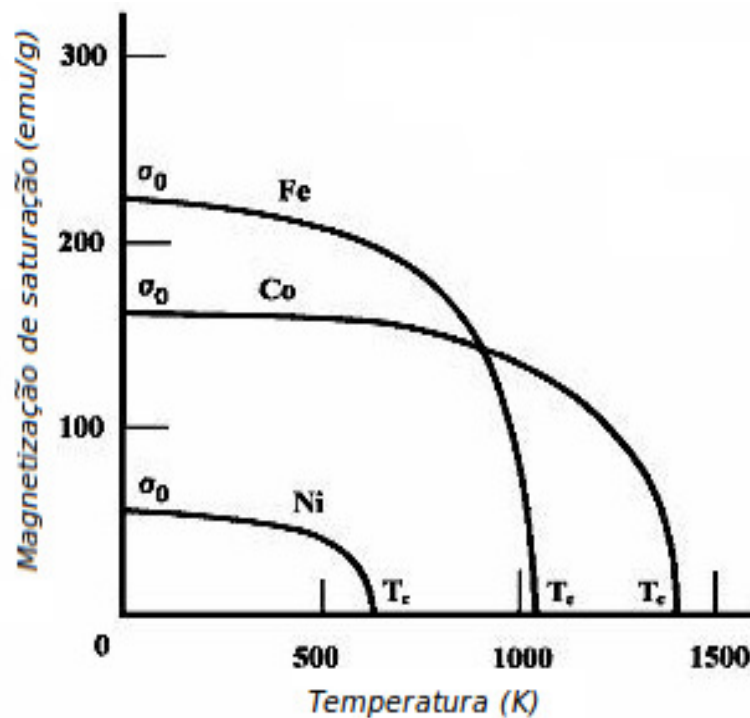


FIGURA 4 - Temperatura de Curie para o Fe, Co e o Ni. (figura extraída da ref.[2])

Dentre os ferromagnetos podemos destacar o ferro, o níquel, o cobalto e o gadolínio, e algumas ligas destes materiais com cobre, cromo, alumínio e manganês.

Define-se permeabilidade magnética como o cociente do módulo da indução magnética (B) pela intensidade do campo magnético aplicado (H), ou seja:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad 1.1.1$$

Esta permeabilidade depende do campo magnético externo. Para campos suficientes grandes ela atinge valor máximo e o material é dito saturado. A curva BxH é chamada de curva de histerese magnética tendo uma forma característica e é própria de cada material. Como um exemplo, mostramos uma curva de histerese na figura 5, que pode ser usada para revelar algumas características do material ferromagnético como a magnetização de saturação (Ms), a magnetização remanente (Mr), o campo coercivo (Hc), e sua susceptibilidade (χ) (figura 5).

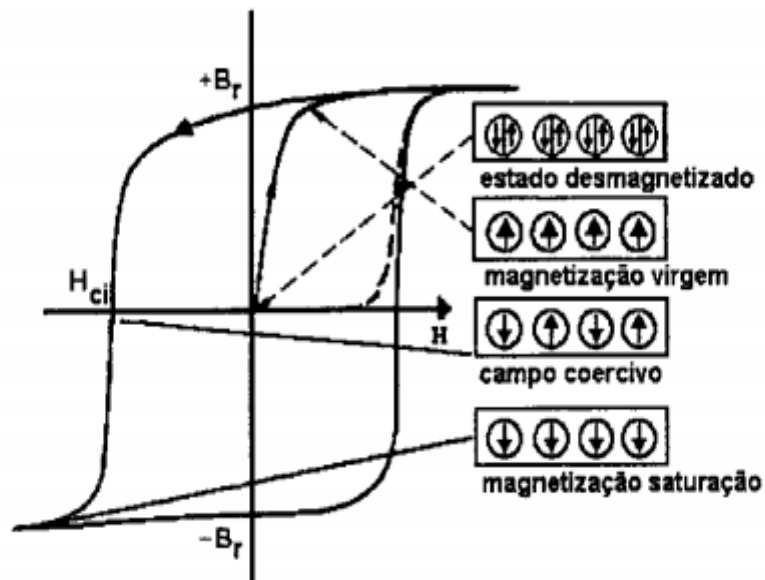


FIGURA 5 - Representação da configuração dos momentos magnéticos, nos domínios magnéticos em cada ponto da curva de histerese ferromagnética (BxH). B_r – magnetização remanente, H – campo magnético aplicado, H_c – campo coercivo. (figura extraída da referência [6]).

O campo coercivo é uma variável importante, pois determina a grandeza do campo magnético a ser aplicado para reorientar os momentos magnéticos da

amostra. Este conceito é importante no estudo de filmes magnéticos e serve não somente para reorientar os momentos magnéticos do filme, mas sua intensidade também serve para observarmos a espessura dos filmes produzidos. Segundo encontrado nas literaturas [6,7,8] o campo coercivo também auxilia na análise das espessuras dos filmes produzidos, é esperado que quanto mais espesso o filme for, menor será a intensidade do campo coercivo representado na curva de histerese.

1.2 Anisotropia

Um das propriedades mais importantes dos materiais magnéticos é a anisotropia. Tanto do ponto de vista fundamental quanto de aplicações tecnológicas, por isso tem sido extensamente estudada nos últimos 80 anos. Os materiais ferromagnéticos assumem um importante papel dentro do magnetismo, estes se caracterizam, principalmente, por possuírem uma ordem de longo-alcance dos momentos magnéticos mesmo na ausência de campos externos, dessa forma, podem apresentar uma magnetização intrínseca à temperatura ambiente. O fator que pode impedir a ocorrência dessa magnetização é justamente a temperatura. A dependência da magnetização de saturação com a temperatura pode ser vista na figura 4 para diferentes materiais.

Um material é dito ferromagnético (FM) quando apresenta uma orientação paralela dos momentos magnéticos de átomos adjacentes abaixo de uma certa temperatura crítica, chamada de temperatura de Curie (T_c) mesmo na ausência de campo magnético externo. Com o intuito de ilustrar a ordem dos arranjos ferromagnéticos (FM) e antiferromagnéticos (AM) apresentamos a figura 6.

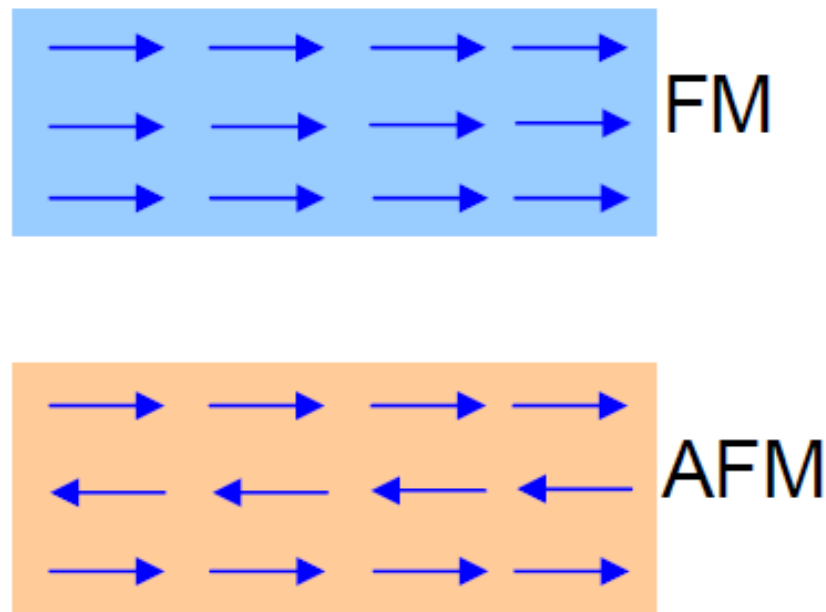


FIGURA 6 - Representação ilustrativa dos arranjos Ferromagnéticos (FM) e Antiferromagnéticos (AM) (figura extraída da ref. [7])

Define-se a temperatura de Curie (T_c) como sendo a temperatura na qual a magnetização de saturação cai a zero, ela é característica de cada material. A partir dessa temperatura, então o material passa a ter um comportamento paramagnético.

As variações nas propriedades magnéticas dependentes da direção de medida com relação a algum eixo pré-estabelecido dá-se o nome de anisotropia magnética. Essas variações são decorrentes da magnetização espontânea tender a se alinhar preferencialmente em certas direções favoráveis energeticamente. Essas direções são ditas direções de fácil magnetização. Assim, a anisotropia magnética envolve a dependência da energia interna com a direção espontânea da magnetização. Essa energia associada à anisotropia é chamada, mais especificamente, de energia de anisotropia [7].

As principais anisotropias magnéticas são: anisotropia cristalina ou magnetocristalina, anisotropia de forma, anisotropia por “stress” ou magnetoelástica, anisotropia de troca ou “Exchange anisotropy” e anisotropia de superfície, que para filmes finos podem aparecer como anisotropia de superfície magnetocristalina, dipolar e magnetoelástica.

Anisotropias podem ainda serem induzidas por tratamento térmico (“annealing”) na presença de campo magnético, por deformação plástica ou ainda por irradiação com partículas de alta energia com campo magnético aplicado.

1.3 Filmes de CoFeB

As ligas de CoFeB, entre tantas ligas magnéticas conhecidas, parecem ser uma das candidatas mais promissoras para sensoriamento e camadas de referência em Junções Túnel (MTJ) por serem capazes de fornecerem altos valores de magnetorresistência (TMR) a temperatura ambiente [7].

A MTJ é uma multicamada que consiste em várias camadas magnéticas e não magnéticas, sendo a espessura típica das camadas na ordem de nanômetros.

As propriedades magnéticas dos filmes de CoFeB são fortemente influenciados pela espessura interfacial, e conseqüentemente afetam o desempenho das MTJ's. No uso de eletrodos a base de CoFeB com Al-Óxido tem sido observados 70% de TMR, e mais de 200% para MTJ's com CoFeB/MgO [8, 11,12,13, 14].

Mais recentemente há um aumento também no interesse para entender a dinâmica magnética em CoFeB devido ao rápido desenvolvimento na transferência de spin torques, fenômenos encontrados nas MTJ's.

Há várias pesquisas que ratificam o uso da liga metálica como eletrodo para camadas de referência em MTJ's [7,8,15].

Outro aplicação para a liga metálica composta por CoFeB são os discos rígidos. A necessidade de armazenamento de cada vez maiores volumes de dados em computadores e outros equipamentos eletrônicos tem sido de grande incentivo ao desenvolvimento de novos materiais para dispositivos de memória, especialmente aqueles baseados na leitura/gravação em um disco rígido.

O disco rígido é composto essencialmente por uma fina camada de metal ferromagnético de alta coercividade depositada sobre material polimérico. As informações são armazenadas na forma de padrões de magnetização gravados na fina camada metálica. Essa fina camada metálica pode ser constituída por diferentes ligas metálicas, sendo que uma das ligas mais utilizadas nesses discos é exatamente a liga de CoFeB.

Na figura 7 podemos observar um "Read head for ultrahight density HDDs" com barreira túnel de MgO, utilizando como eletrodo para a junção a liga metálica de CoFeB [18]. Uma imagem transversal mostra a estrutura da MTJ a base

de MgO. Já comercializado desde 2007 pela "National institute of advanced industrial science and technology (AIST)"

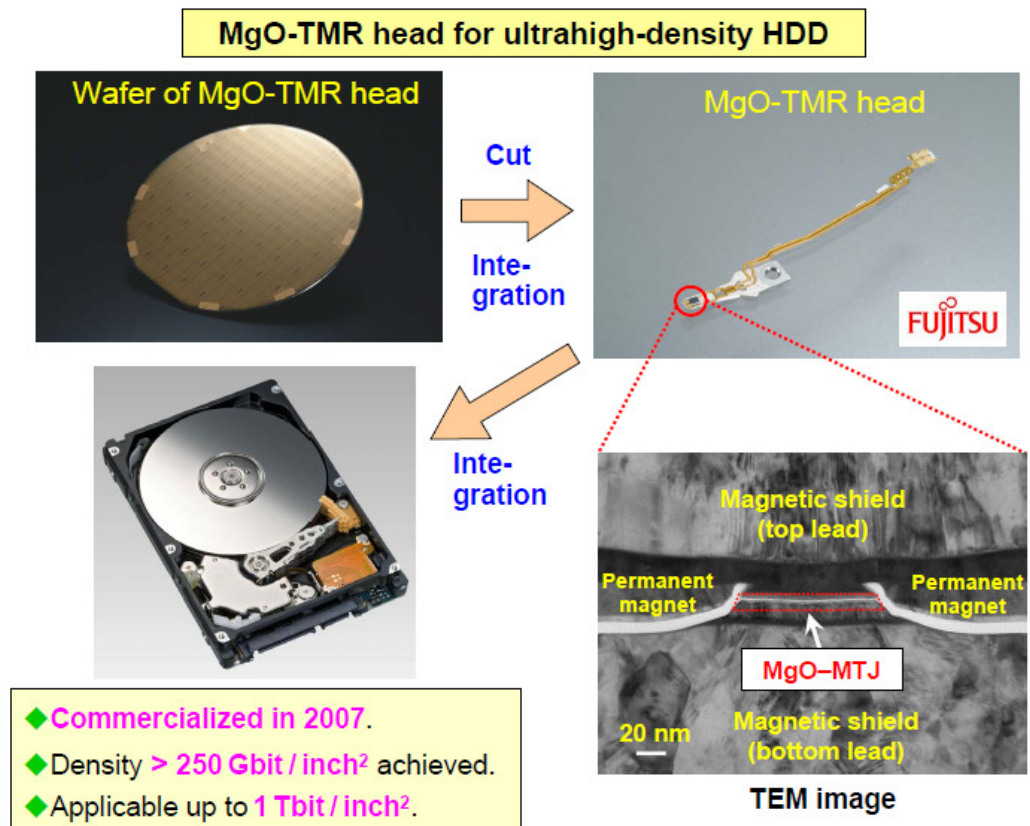


FIGURA 7 – Figura ilustrativa de um Read head for ultrahight density HDDs"com barreira túnel de MgO (figura extraída da ref. [16])

Recentemente foram utilizados filmes de CoFeB como eletrodos de MTJ's, no LMMM[4], nos quais não foi observada a indução de um eixo fácil de magnetização, o que termina por impedir a observação de magnetorresistência túnel.

2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 As amostras escolhidas

Em trabalhos anteriores no LMMM [4, 5], na produção de MTJ's com a TMR, nas curvas de histerese das MTJ's não se conseguiu verificar a inversão da magnetização dos eletrodos com diferentes campos coercivos, e dessa forma, deteriorando o valor da TMR nessas amostras. Uma possível explicação para tal ocorrência é o desvio das linhas de campo usado para indução do eixo de fácil magnetização, através das máscaras de sombreamento. Apesar das máscaras utilizadas serem de material não magnético, quando depositado os eletrodos ferromagnéticos, ocorre a formação de um filme ferromagnético macio nas máscaras.

Analisando uma possível solução para tal, propomos a confecção de filmes finos usando máscaras magnéticas cortadas na vertical, criando uma região similar ao vão de um eletroímã. O intuito desse corte é forçar que as linhas de campo passem pela amostra durante o tempo de deposição dos filmes.

Para nível de comparação foram também produzidos filmes com máscaras não magnéticas inteiras, e filmes sem máscaras de sombreamento.

Foram crescidos dois conjuntos de amostras na forma de filmes da liga metálica de $\text{Co}_{(40\%)}\text{Fe}_{(40\%)}\text{B}_{(20\%)}$, sendo que cada um dos conjuntos contem três filmes finos com diferentes configurações.

O primeiro conjunto contem três filmes de espessura de 500Å, e o segundo conjunto contem três filmes de espessura de 300Å. Essas espessuras foram escolhidas por serem as normalmente usadas na confecção de MTJ nos trabalhos anteriores do LMMM. Buscando avaliar os diferentes efeitos na magnetização das amostras de filmes de CoFeB foram usadas máscaras de sombreamento de diferentes configurações. Em ambos os conjuntos três amostras foram depositadas sobre substratos de vidro, cada um dos filmes confeccionados com as diferentes configurações de máscaras. Na primeira amostra foi fixada uma máscara inteira não magnética (figura 8 a), na segunda amostra foi fixada uma máscara magnética cortada (figura 8 b) e na terceira amostra não fixamos nenhuma máscara de

sombreamento. O segundo conjunto foi crescido exatamente com as mesmas configurações do primeiro conjunto, mas com espessura de 500 Å.

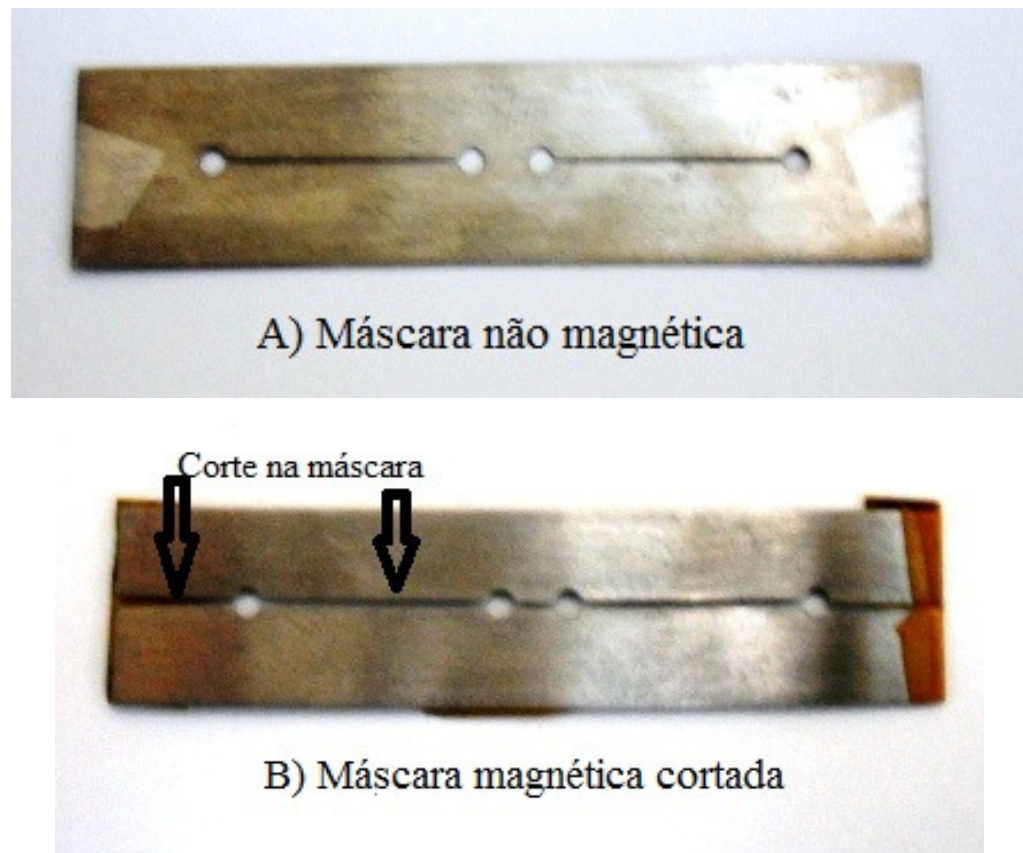


FIGURA 8 – Foto das máscaras de sombreamento utilizadas nas confecções dos filmes, a) máscara de sombreamento não magnética inteira e em b) máscara de sombreamento magnética cortada.

A tabela 1 mostra os conjuntos das amostras produzidas neste trabalho.

1164 A	CoFeB com máscara magnética cortada, de espessura de 500 Å
1164 B	CoFeB com máscara não magnética inteira, de espessura de 500 Å
1164 C	CoFeB sem máscara de sombreamento, de espessura de 500 Å
1165 A	CoFeB com máscara magnética cortada, de espessura de 300 Å
1165 B	CoFeB com máscara não magnética inteira, de espessura de 300 Å
1165 C	CoFeB sem máscara magnética inteira, de espessura de 300 Å

Tabela 1- Conjunto das amostras de CoFeB

Os filmes com espessura de 500 Å constituem o conjunto I e os filmes com espessura de 300 Å constituem o conjunto II.

2.2 Sistema de Deposição

O sistema de deposição por desbastamento iônico (magnetron sputtering) do LMMM é constituído de uma câmara, montada sobre um sistema de vácuo que possui duas bombas BALZERS, uma rotativa e outra difusora, capazes de atingir uma pressão de base de aproximadamente 8×10^{-8} mbar. Nela existem quatro canhões, alimentados por fontes de potência (AC e DC), que permitem a deposição tanto de materiais condutores (DC), como de materiais isolantes (AC). O porta-substrato proporciona a deposição de até 4 amostras em uma mesma rodada, este está ligado a um motor de passo, que permite uma deposição em movimento, melhorando a uniformidade dos filmes ao longo dos substratos. O fluxo de gás é controlado através de dois controladores 1179AMKS a pressão é medida por um manômetro capacitivo de alta resolução, Baratron MKS, que trabalha na faixa de 0 à 100mTorr. A figura 9 mostra um esquema do sistema de deposição de filmes finos do LMMM, e a figura 10 mostra uma foto de como o sputtering encontra-se instalado no mesmo.

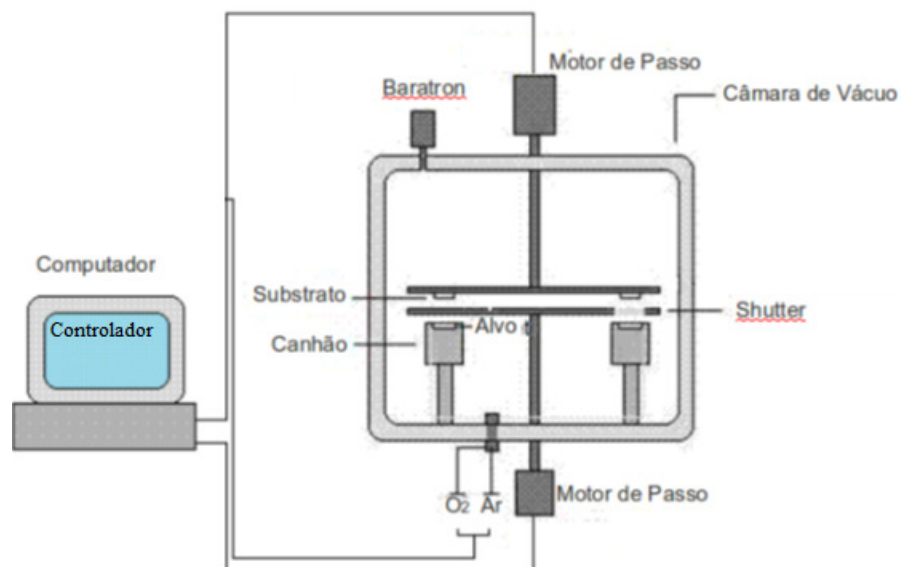


FIGURA 9 - Esquema representativo do sistema de deposição de filmes finos do LMMM.



FIGURA 10 - Magnetron sputtering do LMMM. A torre da esquerda abriga os controladores de vácuo, fluxo de gás e fontes, enquanto a torre da direita é a câmara de vácuo onde as amostras são depositadas.

2.3 Produção dos Alvos

Para deposição dos filmes foram utilizados alvos sinterizados a frio de $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$, onde o grau de pureza dos pós estão na faixa de 99% e 99,99%, e tamanho de grão de 25mesh, e alvo comercial de 99,95% a 99,99%.

O processo de fabricação do alvo de $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$, consiste das seguintes etapas:

- Determinação da quantidade de massa de cada elemento químico utilizado para a fabricação do alvo, através de cálculo estequiométrico, onde determinamos a porcentagem de cada elemento químico na composição do alvo $\text{Co} = 49,03\%$, $\text{Fe} = 46,47\%$, $\text{B} = 4,5\%$. Para um alvo de 20g, que foi a massa total utilizada, temos para cada elemento as seguintes massas, $\text{Co} = 9,806\text{g}$, $\text{Fe} = 9,294\text{g}$ e $\text{B} = 0,9\text{g}$. As

massas foram medidas através de uma balança de precisão e após misturados, à mão, utilizando um graal e um pistilo, durante 30 min;

- Após, a mistura de pós, é colocada em uma forma de cobre (Cu). A prensagem é realizada entre dois cilindros de inox, que dão formato ao alvo e impedem a perda de material. A mistura de pó foi prensada à 50Ton durante 2 horas 30 min. Na figura 11 , apresentamos o equipamento utilizado na prensagem dos alvos.



FIGURA 11 - "Bushing", cilindros de inox e forma de Cu.

O alvo produzido constitui-se basicamente de um disco de 50,8mm de diâmetro, para adaptação nos canhões existentes no sistema de deposição do LMMM, e espessura aproximadamente 1mm, com a composição nominal da liga. A figura 12 mostra uma foto do alvo confeccionado.

2.4 Deposição das Amostras

Antes da deposição dos filmes bombeamos o ar da câmara até a pressão de 8×10^{-3} mbar. A partir do estabelecimento dessa pressão de base, admitimos Ar 99,99% puro na câmara, durante as deposições das amostras foram usados valores de fluxo de 20 centímetro cúbico por min à zero graus celsius e 1 Atm (sccm) de Ar para as deposições não reativa, sendo a pressão de deposição mantida constante em 5,2mTorr para todas as fases de deposições das amostras.



FIGURA 12 - Alvo de $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$.

Atingida as condições de deposição, as fontes de potencia (DC RF), que alimentam os canhões, são ligadas. Antes das deposições as superfícies dos alvos são limpas, através do procedimento de pré-sputtering, durante aproximadamente 15min para o alvo magnético de CoFeB.

Os parâmetros de deposição dos filmes estão detalhados na tabela 2.

	Pressão de Base (10^{-8} mbarr)	Pressão de Deposição de Ar (mTorr)	Fluxo de Ar (sccm)	Potência RF (W)	Velocidade de deposição (p/s)	Espessura (Å)
1164 A	4	2	32	90	17	500
1164 B	4	2	32	90	17	500
1164 C	4	2	32	90	17	500
1165 A	4	2	32	90	29	300
1165 B	4	2	32	90	29	300
1165 C	4	2	32	90	29	300

TABELA 2 - Parâmetros de deposição dos filmes finos de CoFeB

A espessura dos filmes é controlada pelo tempo de exposição do substrato ao plasma. Mantendo-se as condições de fluxo de gás, pressão, distância alvo-substrato e potência (DC RF), a taxa de deposição será a mesma para futuras deposições. Para melhorar a uniformidade dos filmes ao longo do substrato, a deposição foi realizada com o substrato em movimento e velocidade constante, de forma que cada porção do substrato seja exposta ao plasma durante um determinado período. Como só existe a possibilidade do movimento de rotação dos substratos sobre os canhões, há uma falta de uniformidade na direção perpendicular à do movimento. Sendo assim, assume-se que a amostra é uniforme nesta direção, numa região de 12,7mm distante do centro do substrato, quando este é mantido a 50mm do alvo.

Durante a deposição, os substratos são submetidos a um campo magnético externo de aproximadamente 2kOe, para indução de uma anisotropia magnética a fim de definir um eixo de fácil magnetização, sendo este campo, gerado por um sistema de imãs permanentes desenvolvido na tese de doutorado de Felipe Bohn [17] e ilustrado na figura 13.

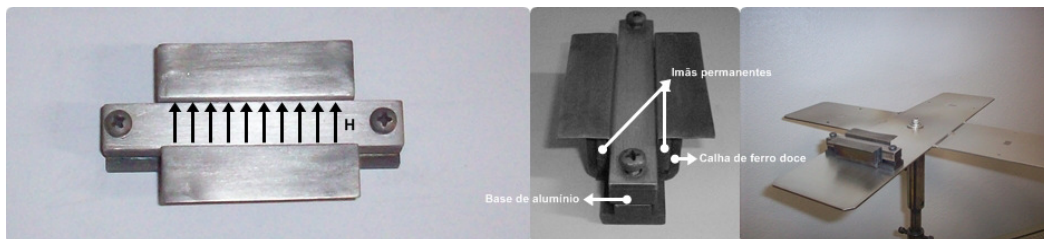


FIGURA 13 -: Foto do sistema de aplicação de campo durante a deposição

O sistema de campo magnético externo, mencionado anteriormente, que caracteriza o sistema como magnetron sputtering encontra-se nos próprios canhões, logo abaixo do alvo.

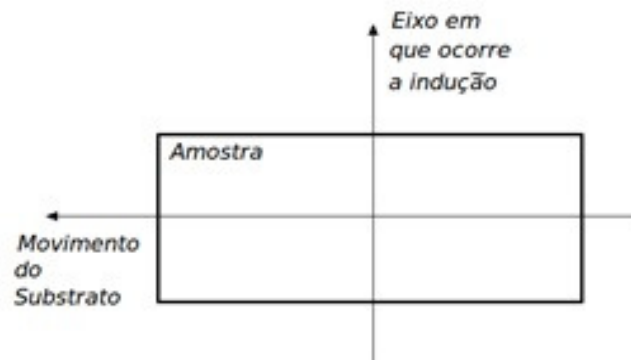


FIGURA 14- Direção de anisotropia induzida pela técnica utilizada.

A figura 14 mostra o sistema de aplicação de campo magnético externo, a direção em que o campo é aplicado e como é posicionado ao sistema de indução anisotrópica no porta substrato.

A partir da utilização do sistema de ímãs (figura 13), foi possível verificar um eixo preferencial de magnetização, conforme podemos ver no gráfico da figura 15.

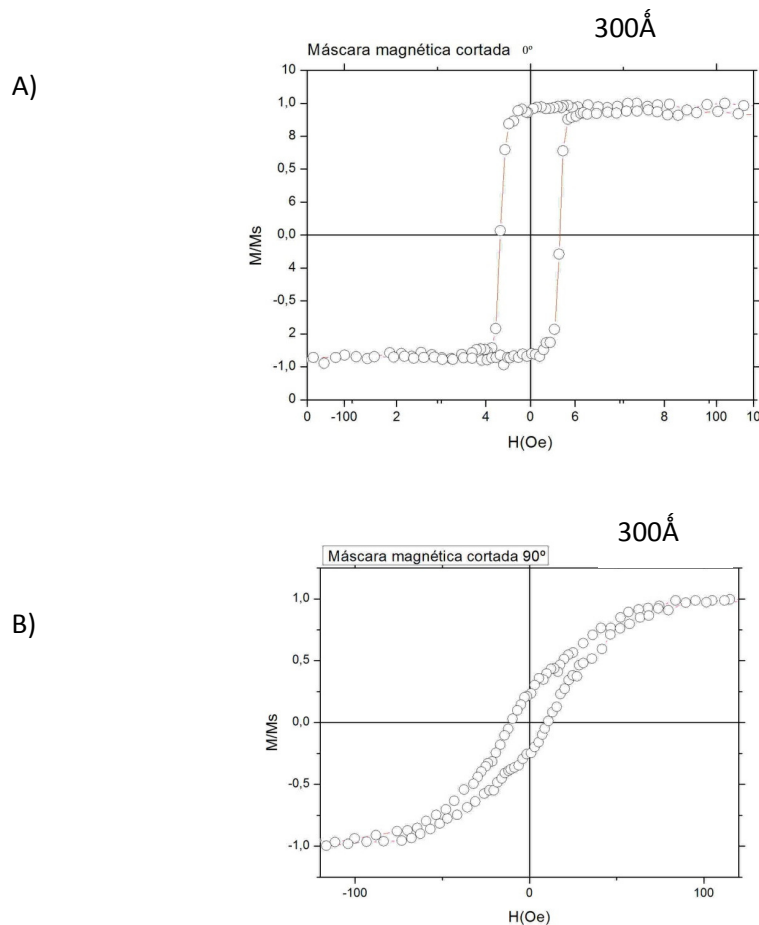


FIGURA 15 – A) Medidas de magnetização (AGFM) em filmes finos de CoFeB, na direção paralela aos plano de magnetização (0°) e B) perpendicular (90°).

2.5 Calibração das Taxas de Deposição

O controle da espessura é obtido pelo tempo de exposição do substrato ao plasma, sendo a determinação correta da taxa de deposição para cada alvo à principal garantia de reprodutividade das amostras. Para a determinação da taxa de deposição foram crescidos filmes com uma única camada sobre substratos de vidro e espessuras diferentes, sendo estas espessuras uma o dobro da outra, determinadas através da análise de XRD a ângulos rasantes, utilizando o Difratorômetro Bruker AXS – modelo D8 Advance.

A figura 16, mostra uma de medida de um filme fino de CoFeB sobre substrato de vidro, onde podemos observar as franjas de Kiessing, relativas a interferência construtiva das ondas refletidas nas superfícies ar-filme e filme-substrato.

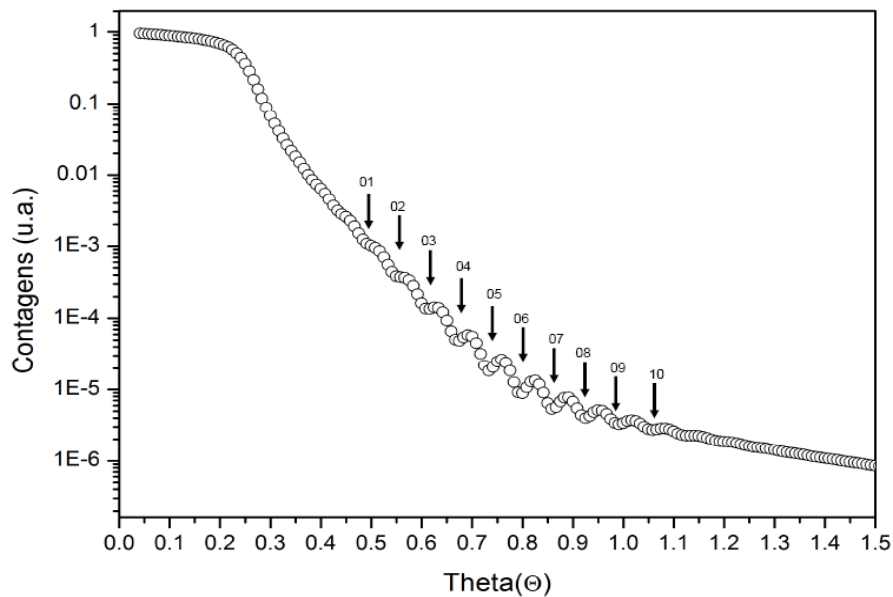


FIGURA 16- Espectros de difração de raio-x a ângulos rasantes de um filme de CoFeB sobre substrato de vidro. (figura extraída da ref. [4])

A partir da indexação das franjas é possível construir um gráfico do vetor espalhamento q em função do índice n . O vetor espalhamento é definido por:

$$q = \frac{4\pi \sin\theta}{\lambda}$$

2.5.1

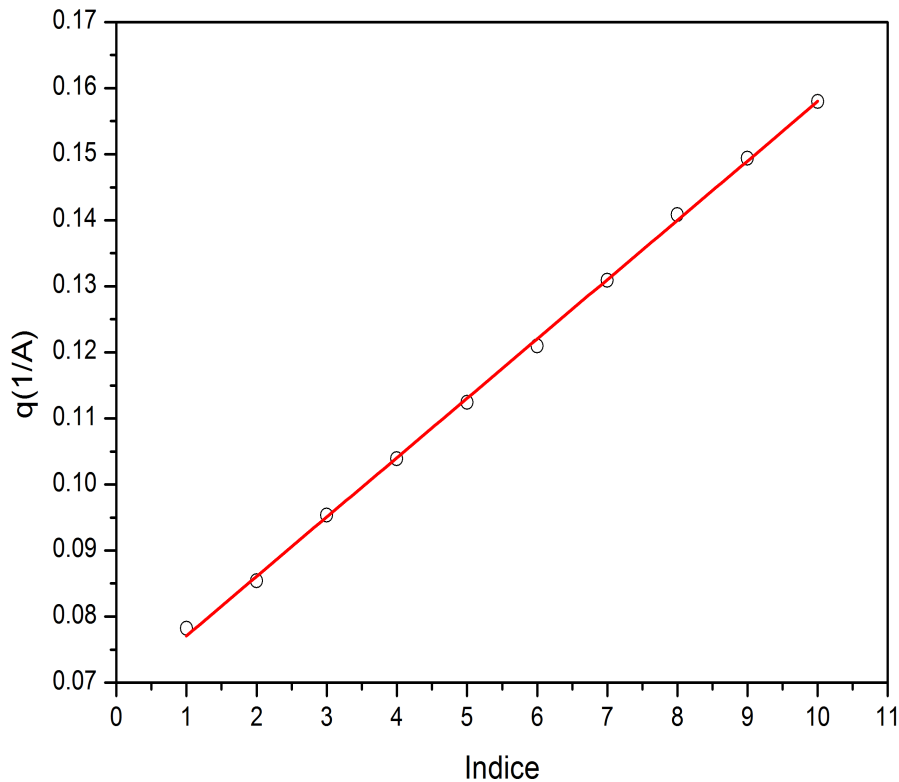
onde θ é o ângulo e λ o comprimento de onda dos raios-x, no nosso caso o do cobre Cu. A figura 17, mostra o gráfico de q vs n . A inclinação da reta é obtida através de um ajuste linear, que corresponde aproximadamente a 2π dividido pela espessura do filme em unidades de comprimento de onda de raio-X, logo

$$t = \frac{2\pi}{b} \quad 2.5.2$$

onde t e b correspondem à espessura do filme e à inclinação da reta, respectivamente.

Este procedimento é realizado para cada alvo utilizado. Além disso, a calibração da taxa é realizada para cada série de deposição devido ao desgaste dos alvos, o que acarreta na mudança da taxa de deposição para os mesmos parâmetros.

Como dito anteriormente, o controle da espessura é obtido pelo tempo de exposição do substrato ao plasma, mantendo-se os valores de fluxo de gás, pressão, distância alvo-substrato e corrente (DC) ou potência (RF) a taxa de deposição será constante. Para garantir a uniformidade dos filmes, o substrato é mantido em movimento com velocidade constante durante a deposição, de forma que cada porção dele seja exposta a todas as regiões do plasma e por um mesmo tempo.



FIGU

RA 17 - Vetor de espalhamento, $q = \frac{4\pi n \sin\theta}{\lambda}$, vs índice n , sendo a linha sólida correspondente ao ajuste linear (figura extraída da ref.[4]).

Uma vez determinada a taxa de deposição, σ , para crescer um filme com uma espessura t , é necessário manter o substrato exposto ao plasma por um determinado tempo Δt , como o shutter espoem uma região de 3050 passos ao plasma, precisamos mover o substrato com uma velocidade (V) sobre os canhões, dada por:

$$v = 3050 \frac{\sigma}{t}$$

2.5.3

2.6 Medidas de magnetização

As medidas de magnetização foram realizadas no LMMM, através do Magnetômetro de Gradiente de Campo Alternado, o AGFM, nas amostras da tabela 2. A primeira versão desse equipamento foi idealizada por Flanders em 1988 [18]. Nesse equipamento uma amostra magnetizada é colocada em uma região onde há

um gradiente de campo magnético alternado, ficando assim sujeita a ação de uma força na direção do campo dada por $F_x(t) = M \cdot \nabla B_x(t)$, onde M é a magnetização da amostra e ∇B_x o gradiente de indução magnética.

Como pode ser visto na figura 18a, a amostra é colocada, por meio de uma haste rígida e não magnética, entre os pólos de um eletroímã, responsável pela geração do campo estático (H_0). Paralelo a esse campo existe um gradiente de campo magnético que é gerado por um outro conjunto de bobinas alimentadas por uma função senoidal. Desta forma, as bobinas geram um gradiente de campo magnético alternado (H_{AC}) sobre a amostra, que passa a oscilar sob a influência da força F_x , descrita anteriormente. A amplitude dessa oscilação é proporcional à magnetização. O sinal é detectado através de um sensor piezoelétrico colocado na outra extremidade da haste. Um material piezoelétrico tem a propriedade de transformar uma deformação mecânica em um sinal elétrico proporcional. A medida da tensão do piezoelétrico - proporcional à magnetização - é feita com o auxílio de um amplificador tipo lock-in. A frequência usada para a realização desse tipo de medida é próxima a de ressonância mecânica da haste, visto que, assim tem-se uma maior amplitude do seu movimento resultando em um sinal de maior intensidade.

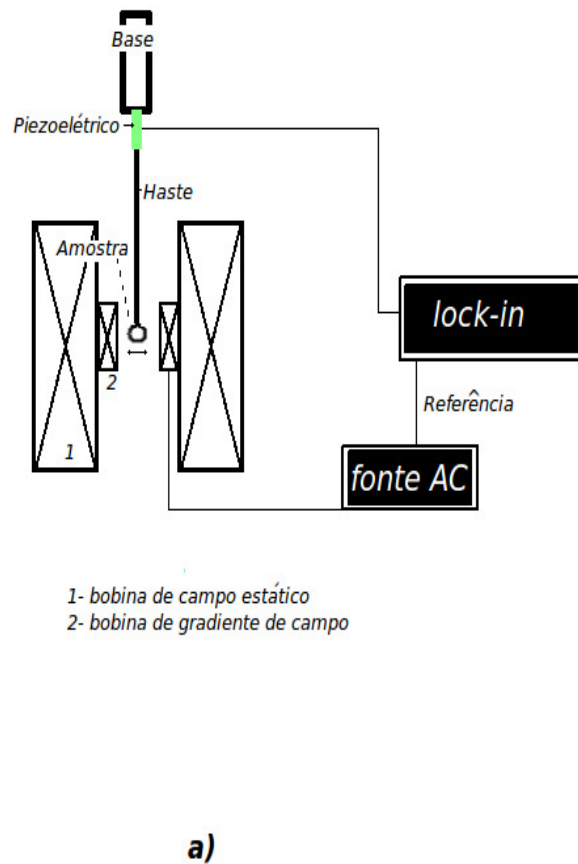


FIGURA 18 - a) esquema de funcionamento do AGFM, b) foto do AGFM usado no LMMM.(figura extraída da ref.[12])

Alguns detalhes importantes sobre as medidas:

- Primeiro diz respeito à frequência de operação. A princípio qualquer frequência seria adequada. Porém, como sabemos, na frequência de ressonância, de qualquer sistema mecânico, a amplitude é máxima. Logo, podemos concluir que para obtermos o sinal de maior intensidade, a frequência mais adequada é a de ressonância. Para encontrarmos a ressonância basta fazermos uma varredura do sinal em relação a frequência.

- Um outro aspecto importante é geometria das bobinas geradoras de campo magnético alternado, com o objetivo de maximizar o sinal da amostra. Para qual a geometria utilizada nas duas bobinas é o enrolamento em série e em oposição (uma bobina enrolada no sentido horário e a outro no sentido anti-horário), de modo que o gradiente entre elas seja o máximo.

- Uma das precauções que devemos ter, é em relação a vibrações mecânicas do sistema experimental, que podem vir a inviabilizar as medidas, aumentando o ruído, pois como deve ter ficado claro na descrição do método, um pequeno ruído mecânico altera de maneira significativa a amplitude de oscilação da amostra.

Sendo este sistema destinado a medidas de magnetização em amostras com fraca magnetização, como no caso de filmes finos.

A tabela 3 mostra as frequências de ressonância encontradas para as amostras utilizadas.

AMOSTRA	Ângulo (°)	Frequência de ressonância (Hz)	Amplitude (AC) (V)
1164 A	0	27,21	5
1164 A	90	27,21	5
1164 B	0	27,83	5
1164 B	90	27,83	5
1164 C	0	27,91	5
1164 C	90	27,94	5
1165 A	0	29,37	5
1165 A	90	28,44	5
1165 B	0	28,05	3
1165 B	90	28,33	3
1165 C	0	27,12	3
1165 C	90	27,12	3

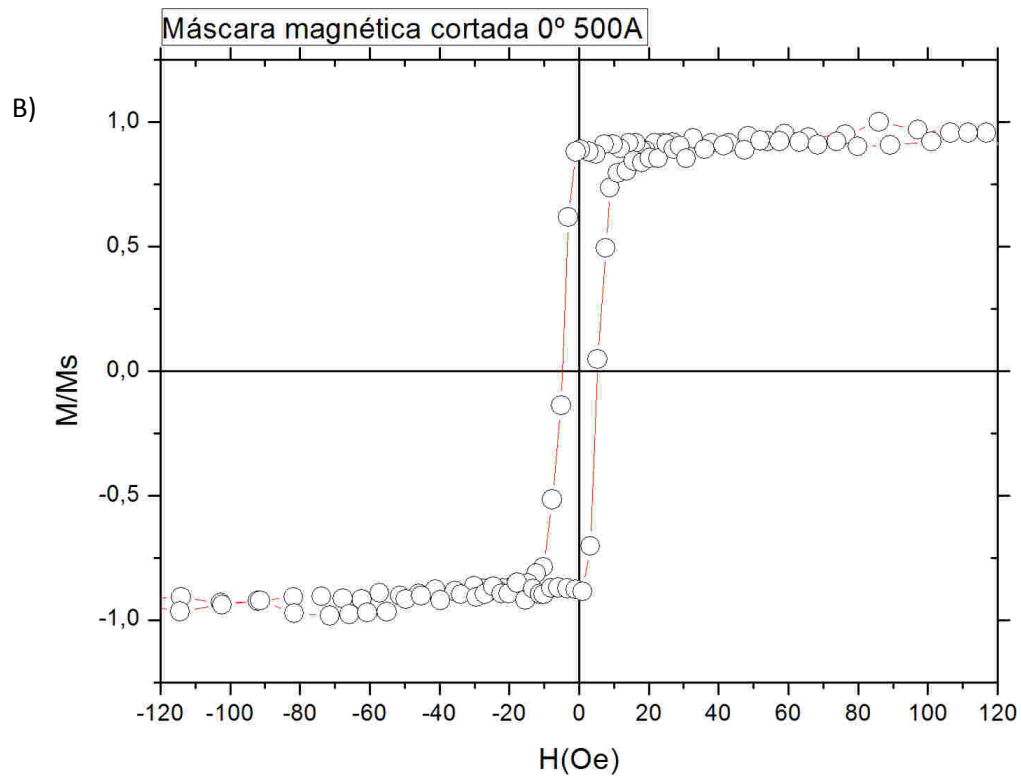
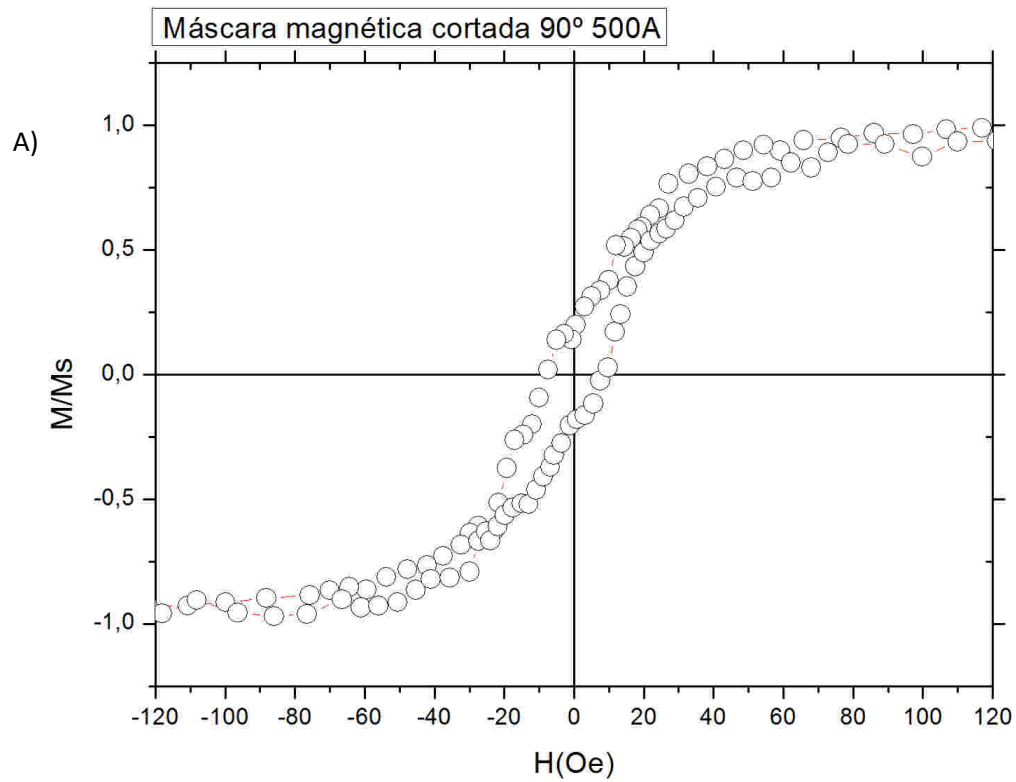
TABELA 3 -Dados referentes as medidas de magnetização.

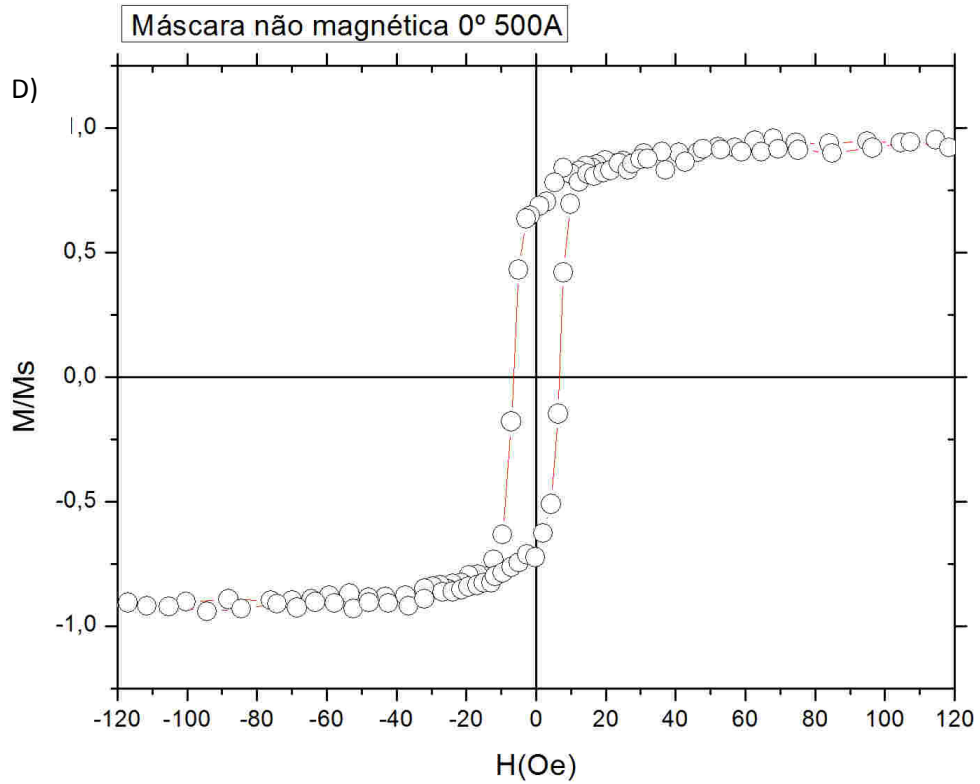
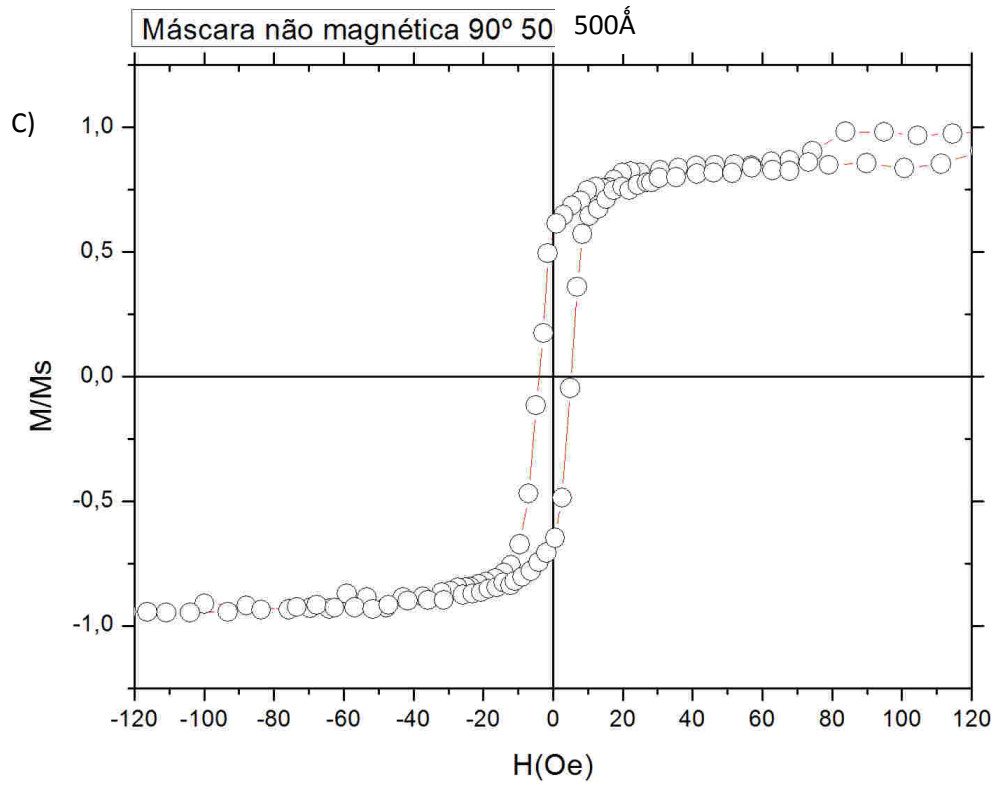
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

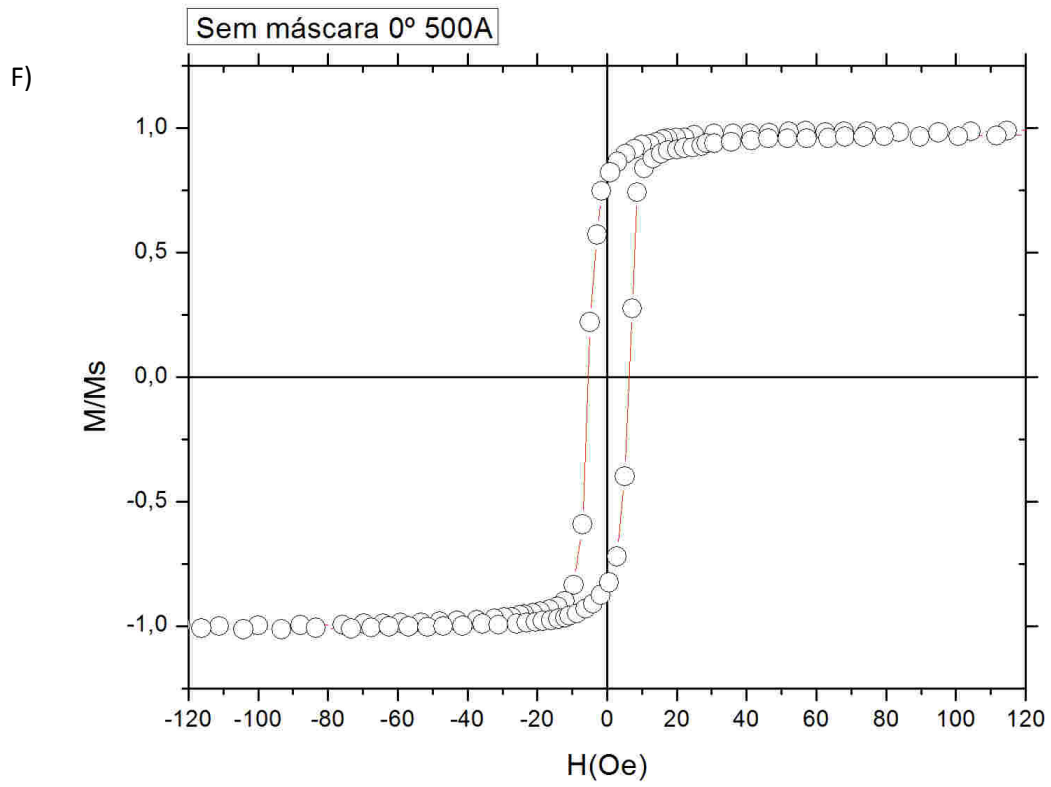
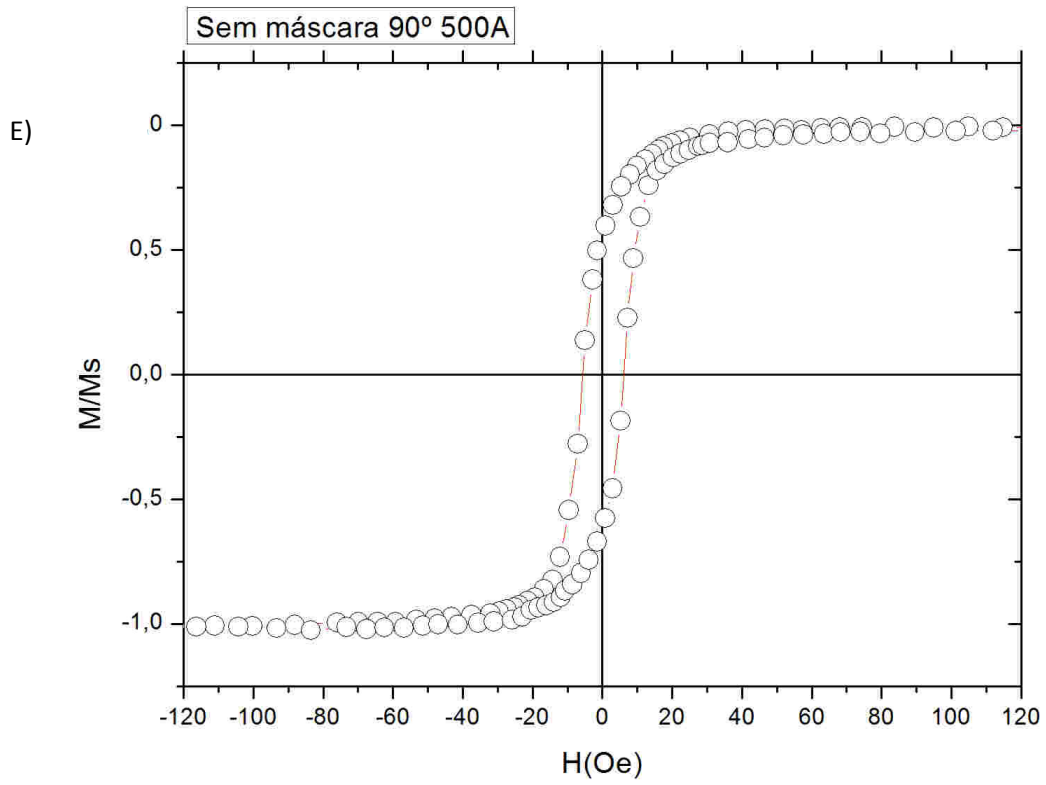
3.1 Medidas de Magnetização

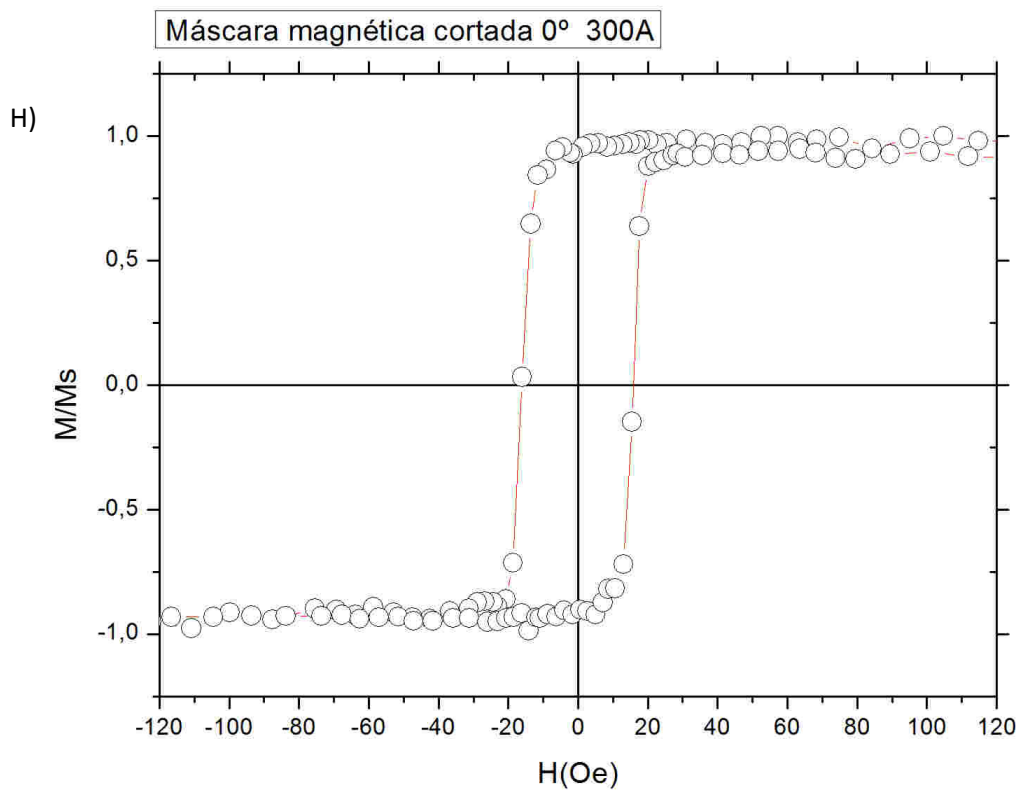
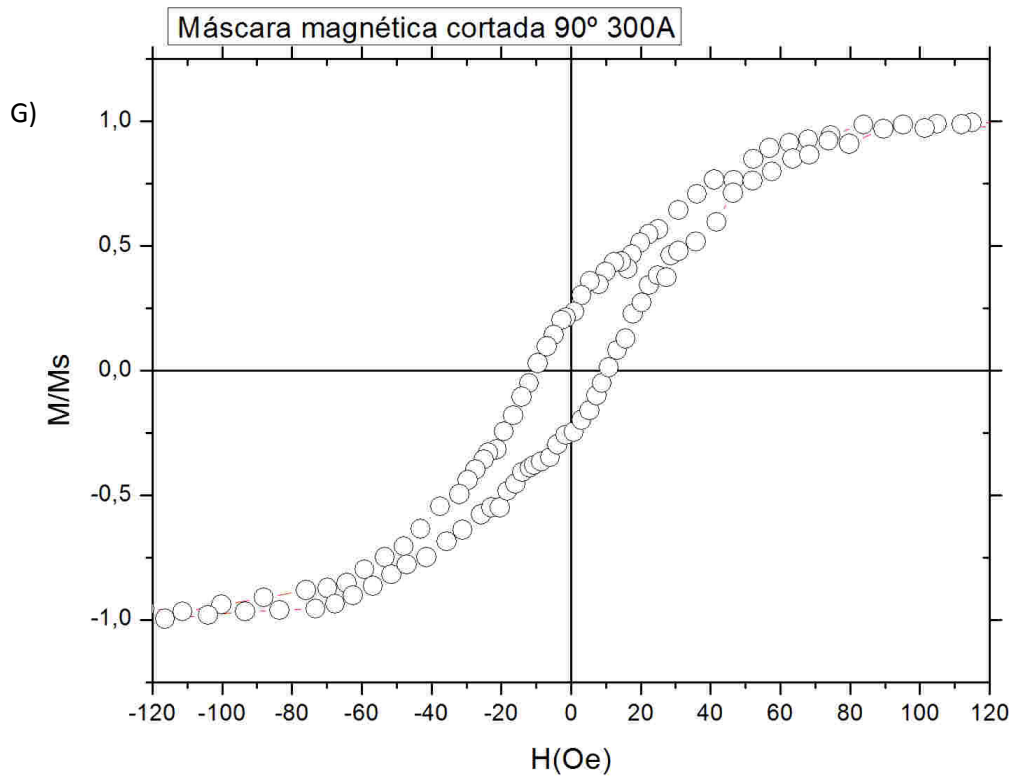
As curvas de magnetização foram extraídas dos dois conjuntos das amostras, totalizando doze curvas de magnetização, em cada filme foi feita uma medida paralela ao eixo fácil, e outra perpendicular ao eixo fácil.

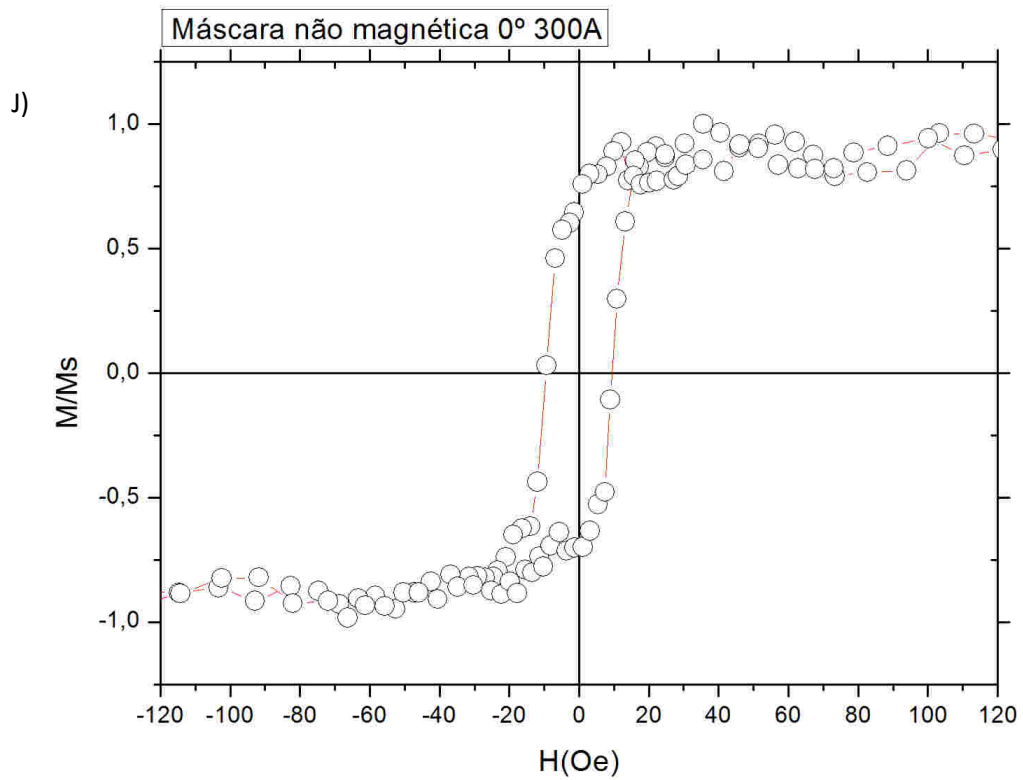
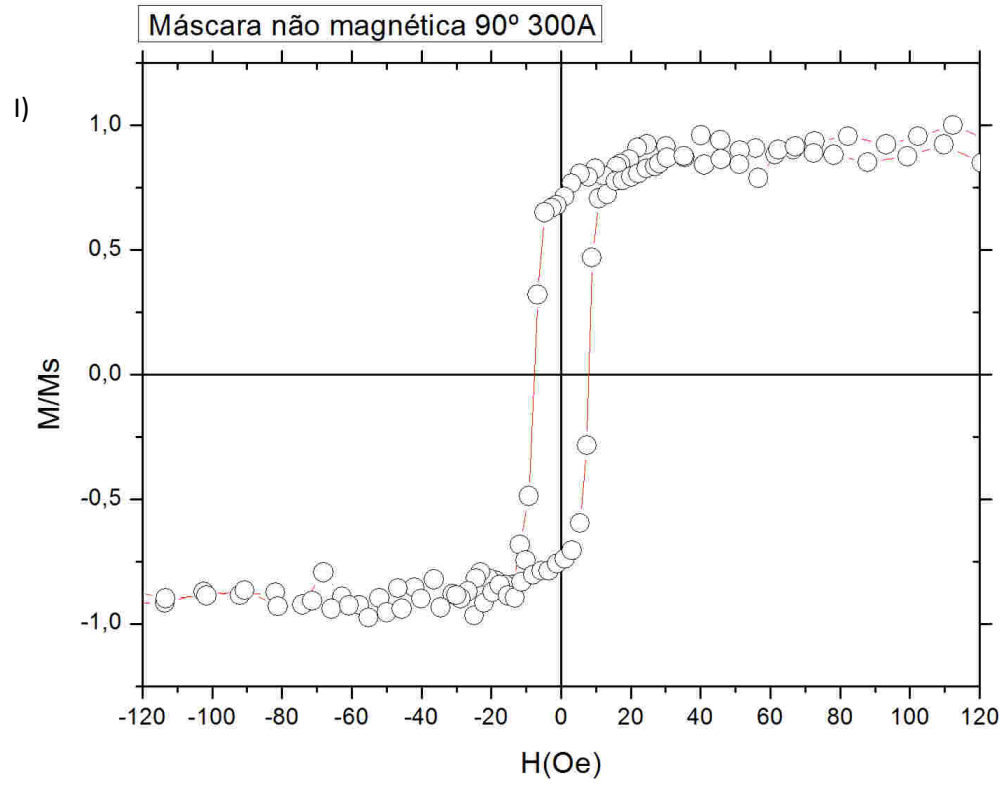
Nas próximas páginas serão apresentadas as curvas de magnetização referentes as amostras confeccionadas (figura 19), as amostras que contêm a mesma espessura e foram confeccionadas com máscaras de sombreamento de igual configuração, possuem duas medidas de magnetização, uma paralela ao eixo fácil e outra perpendicular ao eixo. Nas páginas seguintes essas curvas de magnetização estão dispostas duas a duas, proporcionando assim uma visão mais ampla das medidas para uma comparação dos resultados obtidos.

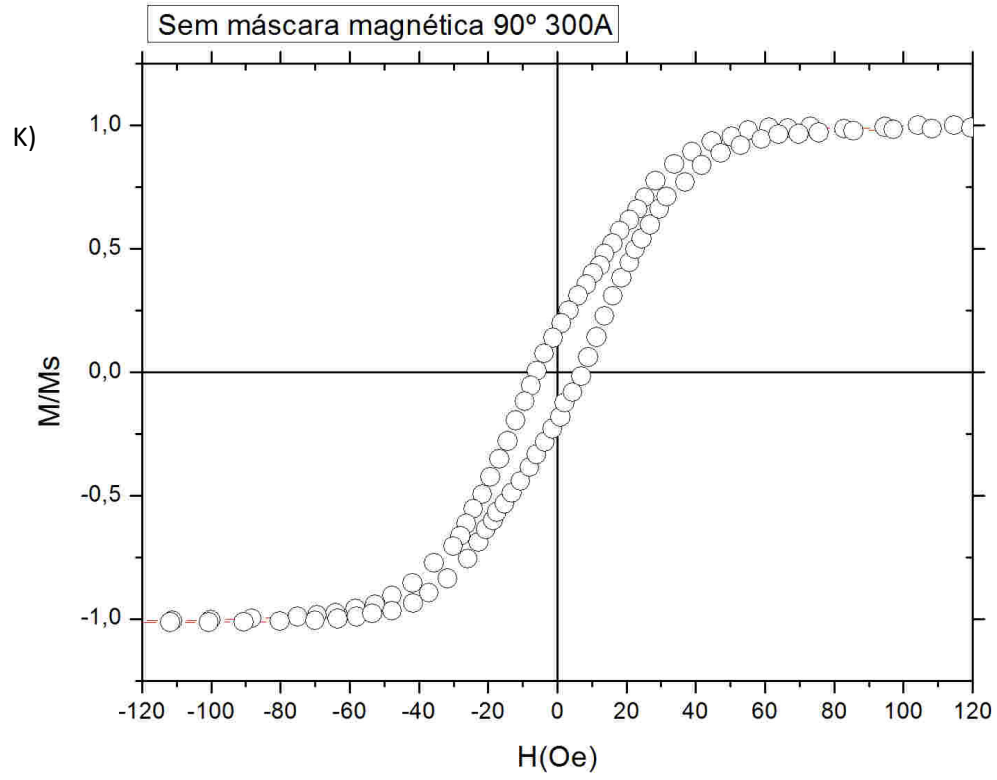


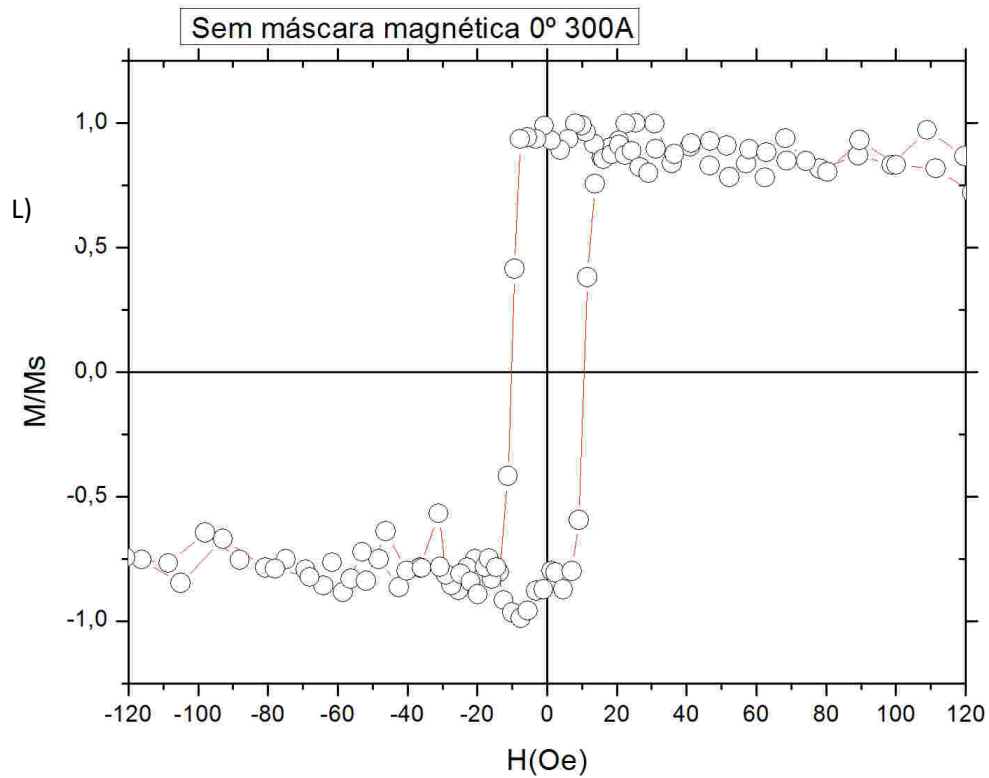












FIG

URA 19 – Curvas de magnetização referente às amostras confeccionadas.

Para a amostra de 500Å podemos verificar um campo coercivo de em torno de 50e já para a amostra de 300 Å o campo sofre um aumento para em torno de 20Oe (figura 20), onde este comportamento já era esperado [6].

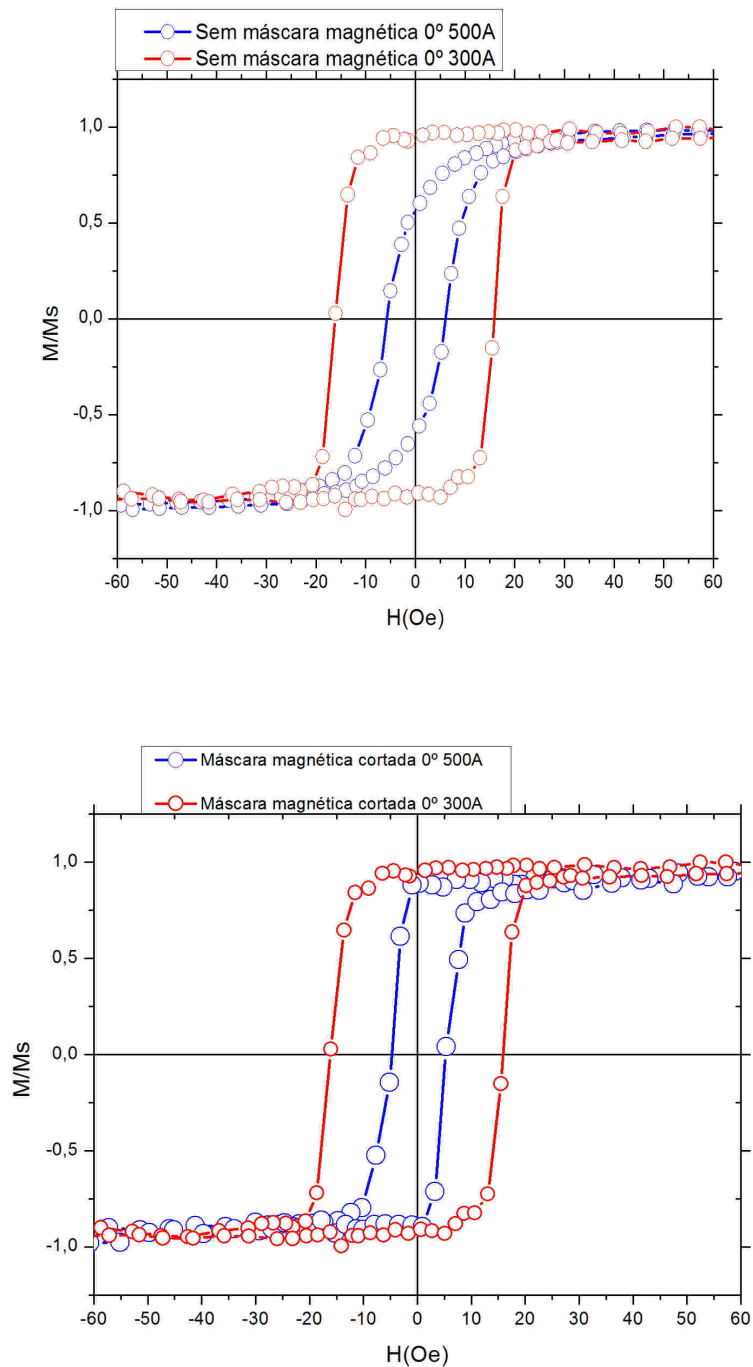


FIGURA 20 - Curvas de magnetização em relação ao eixo duro de magnetização sobrepostas.

Quando analisadas as curvas de magnetização das amostras com máscara magnética cortada (MMC), com máscara não magnética (MNM), e sem máscaras magnéticas de sombreamento (SM) (figura 21) notamos que o comportamento das curvas de histerese referentes às amostras com MMC e SM é muito semelhante, e já quando o filme é produzido com MNM as informações que podem ser obtidas através da histerese desse filme tornam-se menos evidentes.

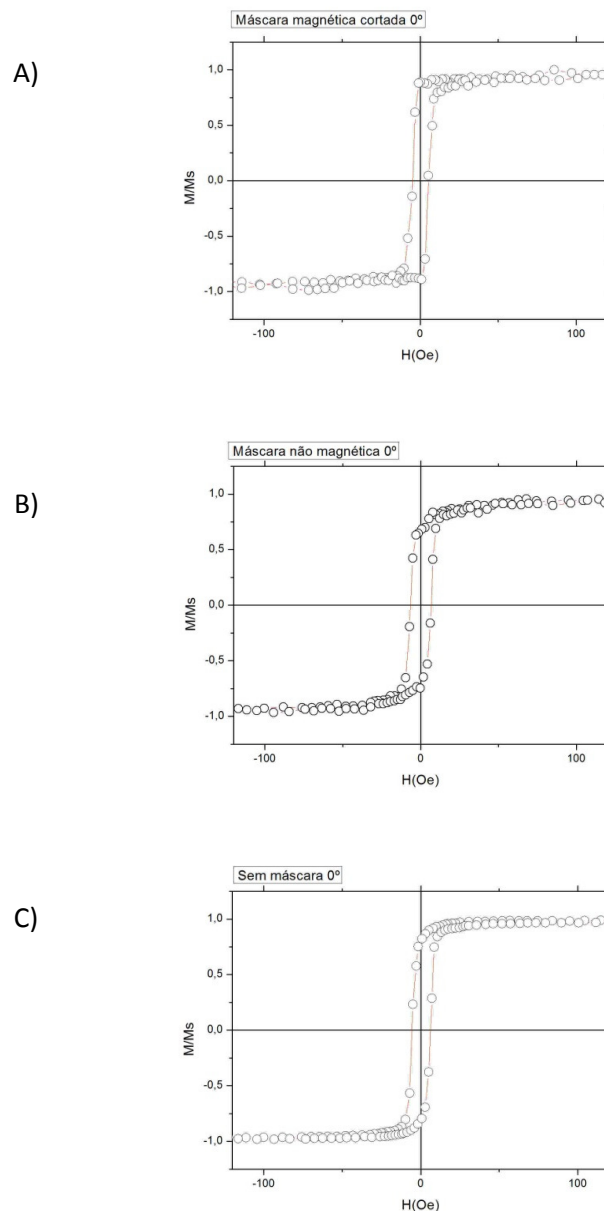


FIGURA 21 - Curvas de magnetização normalizadas com filmes de CoFeB de espessura de 500Å, medidas referente a seus eixos fáceis de magnetização, a) filme de CoFeB confeccionado com máscara magnética cortada, b) filme de CoFeB confeccionado com máscara não magnética, c) filme de CoFeB confeccionado sem máscara

Como já citado acima notamos, a partir das curvas apresentadas na figura 21, que o comportamento das curvas de histerese referentes às amostras com MMC e SM são muito semelhantes, e esse resultado é de grande importância, pois nos parece que o problema na confecção das MTJ's confeccionadas com filmes usando máscaras não magnéticas, pode ser amenizado usando filmes produzidos com

máscaras magnéticas cortadas, produzindo amostras com campos coercivos diferentes para diferentes espessuras.

Com as medidas de magnetização, já foi possível observar que o uso da máscara magnética cortada, a princípio funcionou bem pois comparando as duas curvas representadas na figura 22 A de máscara não magnética (MNM) e 22 B com a máscara magnética cortada (MMC) observa-se que na curva referente a MMC torna-se bem mais claro qual o valor do campo magnético de inversão e já para a curva que contém a amostra com MNM não é simples obtermos o valor dessa inversão.

Outro fator a ser considerado é a diferença dos campos coercivos, para a amostra contendo a MMC o campo coercivo é mais intenso quando comparado com o campo coercivo da amostra contendo MNM, o que também pode ser visto na figura 22.

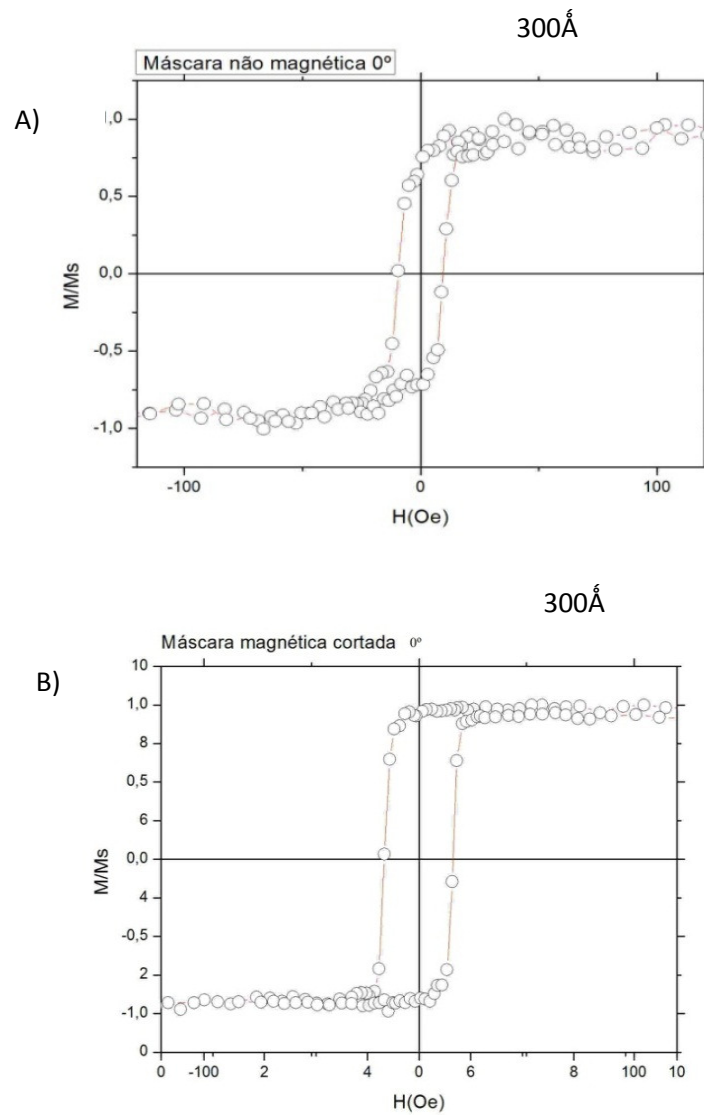


FIGURA 22 - Curvas de magnetização normalizadas para filmes de 300Å de CoFeB, a) com máscara de sombreamento não magnética e b) com máscara magnética cortada.

CONCLUSÕES

Neste trabalho filmes de CoFeB foram confeccionados com duas espessuras diferentes, utilizando máscaras de sombreamento com distintas configurações. Esses foram produzidos no intuito de induzir um eixo preferencial de magnetização nas amostras, para em trabalhos futuros estes filmes serem usados como eletrodos em MTJ's para possíveis medidas de TMR.

Foram realizadas medidas de magnetização, que mostra que para os filmes de diferentes espessuras temos diferentes campos coercivos. Para os filmes com espessuras de 500Å verificamos um campo coercivo em torno de 5 Oe, já com a diminuição da espessura tivemos um aumento no campo coercivo para em torno de 20 Oe, o que já era esperado, e esse resultado foi verificado tanto nas curvas de magnetização referentes aos filmes de CoFeB produzidos sem máscaras de sombreamento, quanto para as curvas de magnetização referentes aos filmes produzidos com máscaras magnéticas cortadas.

Analisando os filmes confeccionados com as máscaras magnéticas cortadas, conseguimos induzir um eixo fácil de magnetização, o que não é observado nesses filmes produzidos com máscaras não magnéticas. O corte nas máscaras funcionou muito bem, pois para as duas espessuras produzidas tivemos essa definição do eixo de fácil magnetização e o eixo de difícil magnetização, resultado esse que torna mais possível confecções de MTJ's para medirmos TMR nas mesmas.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Para uma possível continuação deste trabalho, são apresentadas as seguintes propostas:

- Confeccionar filmes com máscaras magnéticas cortadas com variadas espessuras;
- Confeccionar filmes com máscaras magnéticas cortadas com outros tipos de materiais;
- Produzir junções túnel utilizando os filmes produzidos nesse trabalho, na tentativa de medir TMR;
- Aprofundar o estudo referente a influência de máscaras de sombreamento em filmes finos de diferentes materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Slaughter, J. M., Dave, R.W., Durlam, M., Kerszykowski, G., Smith, K., Nagel, K., Feil, B., Calder, J., Deherrera, M., Garni, B., Tehrani, S., High speed toggle MRAM with MgO based tunnel junctions, IEEE, (2005).
- [2] Dave, R. W., Steiner, G., Slaughter, J.J., Craigo, B., Pietambaram, s., Smith, K., Grynkewich, G., Deherrera, M., Akerman, J., Tehrani, S., MgO based tunnel junction material for high speed toggle magnetic random access memory, IEEE Trans. Magn., Vol. 42, No. 8, (2006).
- [3] Lee, Y. M., Yoshida, C., Tsunoda, K., Umehara, S., Aoki, M., Sugii, T., Highly Scalable STT MRAM with MTJs of Top pinned Structure in 1T/1MTJ Cell, IEEE, 2010.
- [4] DELLA PACE, Rafael Domingues. **Estudo do tunelamento em Junções Túnel de CoFeB/MgO/CoFeB**. 2010, 68f. Dissertação (mestrado em Física). Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2010.
- [5] DORNELES, Lucio Strazzabosco. **Efeitos das flutuações nas espessuras do isolante sobre o tunelamento em junções de Al/ALoX/Al1**. 2003. 108f. Tese (doutorado em Física) Universidade Federal de Santa Maria, Rio grande do Sul, 2003.
- [6] URBANO, Alexandre. **Obtenção e caracterização de filmes finos ferromagnéticos das fases $Fe_{17}TR_2$, $TR=Nd$, Pr e Sm** . 1997, 82f. Dissertação (mestrado em Física) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1997.
- [7] OLIVEIRA, Sabrina Nicolodi. **Exchange bias em filmes de IrMn/Cu/Co**. 2007, 88f. Dissertação (mestrado em Física) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007

- [8] CHIKAZUMI, S., Physics of Magnetism (Wiley, New York, 1964).
- [10] Tehrani, s., Slaughter, J. M., DeHerrera,N., Engel, B N., Rizzo, N. D., Salter,J., Durlam,M., Dave, R.W., Janesky, J., Grynkewich, G. Magnetoresistive Random Access Memory using Magnetic Tunnel Junctions, Proceedings of the IEEE, Vol 91, No 5, 703, (2003).
- [11] Julleire, M., Tunneling between ferromagnetic films ,Phyc. Rev. Lett. A, Vol.54, 225, (1975)
- [12] RIGUE, Josué Neroti. **Anisotropia magnéticas em filmes finos de Co: Uma análise por magnetometria de torque.** 2010, 88f. Dissertação (mestrado em Física). Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2010
- [13] K. Nakajima, G Fen and J. M. D. Cocy .**Magnetoresistance in Magnetic Tunnel Junctions with Amorphous Electrodes.**
- [14] S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P.M. Rice, B. Hughes, M. Samant, and S. H. Yang, Giant tunnellingmagnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers, Nat. Mat., Vol. 3, 862,(2004).
- [15] S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P.M. Rice, B. Hughes, M. Samant, and S. H. Yang, Giant tunneling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers, Nat. Mat., Vol. 3, 862,(2004).
- [16] S. YuasaS. Matsumoto, R., Fukushima, A., Kubota, H., Yakushiji, K., Nakamura, T., Suzuki, Y., Ando, K.,Apresentacao em pdf internet Tunnel Magnetoresistance Effect and Its Applications, AIST National institute of advanced industrial science and technology.
- [17] Bohn, F., Propriedades estatísticas do ruído barkhausen em materiais magnéticos artificialmente estruturados Tese de doutorado, (2009).

[18] P. J. Flanders, An alternating-gradient magnetometer (Invited), J. Appl. Phys., Vol. 63, No.8,3940 - 3945, 15 April 1988.