



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VII
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

NATÁLIA ÉRIKA LAURENTINO BARBOSA

ESTUDO DE FILMES MAGNÉTICOS FINOS DE FE/SM-CO

**PATOS - PB
2017**

NATÁLIA ÉRIKA LAURENTINO BARBOSA

ESTUDO DE FILMES MAGNÉTICOS FINOS DE FE/SM-CO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Programa de Graduação em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Física.

Área de concentração: Materiais Magnéticos e Propriedades Magnéticas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Junior.

**PATOS - PB
2017**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

S238e Barbosa, Natália Érika Laurentino
Estudo de filmes magnéticos finos de Fe/Sm-Co [manuscrito]
/ Natalia Erika Laurentino Barbosa. - 2017.
36 p. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e
Sociais Aplicadas, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Júnior, CCEA".

1. Filme Magnético Fino. 2. Fe/Sm-Co. 3. Curva de
Histerese. I. Título.

21. ed. CDD 538

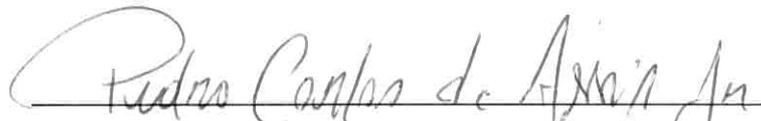
Natália Érika Laurentino Barbosa

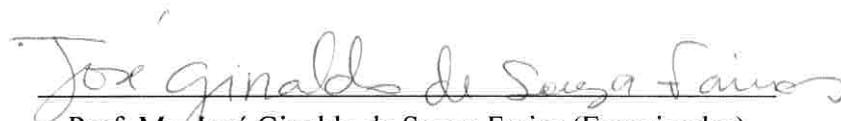
ESTUDO DE FILMES MAGNÉTICOS FINOS DE Fe/SmCo

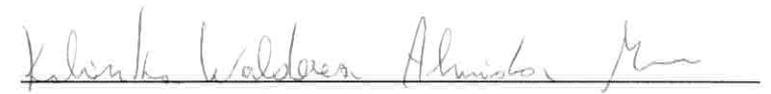
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura Plena em Física da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento à exigência para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Aprovado em 14 de agosto de 2017

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Júnior (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)


Prof. Ms. José Ginaldo de Souza Farias (Examinador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)


Prof^ª. Ms. Kalinka Walderea Almeida Meira (Examinadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Aos eternos, vô Chico e vô Paulo, mesmo distantes
fisicamente, mas sempre presentes em meu coração,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que permitiu que este momento fosse vivido por mim, trazendo alegria aos meus pais e a todos que contribuíram para a realização deste sonho.

Agradeço de forma especial ao meu Pai José, à minha Mãe Rosimere e ao meu Irmão Natanael, por acreditarem em mim, e não medirem esforços para que eu pudesse levar meus estudos em diante.

Agradeço ao meu noivo José Marques, pelo companheirismo, carinho, dedicação e amor. E a sua família pela força e pelo incentivo.

Agradeço de forma especial ao professor Raimundo Alencar, por me ajudar a dar os primeiros passos na realização de mais esse sonho.

Agradeço ao meu orientador Dr. Pedro Carlos, pelos ensinamentos e paciência.

Agradeço as minhas amigas e companheiras da vida Márcia, Isete e Lorena.

Agradeço as minhas amiga na qual dividi apartamento, pela força e apoio nas horas que precisei, as levarei no meu coração para sempre (Thays, Sabrina, Andrezza e Vanessa).

Aos colegas de classe pelos momentos de amizade e apoio (Géssica, Soraya, Daniele, Victor, Jardeson, Teodósio e Mateus), agradeço.

RESUMO

O magnetismo é a denominação dada aos fenômenos pelo qual um corpo pode atrair-se ou repelir-se em relação a outros. Com o passar do tempo, houve um grande progresso nos estudos dos materiais magnéticos, resultando em um grande avanço científico e tecnológico. A nanotecnologia vem proporcionando esse avanço e como consequência disso surgiram novos materiais magnéticos e esses por sua vez tem sido a resposta para essa gama de instrumentos tecnológicos de altíssima eficiência no ramo industrial, tendo grandes aplicações em diferentes setores, desde ímãs permanentes usados na fabricação de motores elétricos, autofalantes, fones, geladeiras, etc. até aplicações mais abrangentes, na construção de computadores e sistemas de comunicações. Neste trabalho fizemos um estudo bibliográfico sobre as propriedades intrínsecas do material e o comportamento da histerese magnética de um filme magnético fino de Ferro e Samário Cobalto. Observamos que estudos são feitos considerando um modelo discreto de planos atômicos para compor uma bicamada de Fe/SmCo no qual a curva de histerese magnética apresenta propriedades intrínsecas diferentes comparadas as de cada material isoladamente. Quanto mais finos os filmes mais facilmente acontecem a travessia dos elétrons no material, pois é muito pequena as colisões pelo caminho, resultando em um não comprometimento na orientação dos seus spins. Muitos pesquisadores veem usando nanotecnologia para alterar as propriedades intrínsecas dos mais diversos materiais e para isso idealizam modelos tais como: bicamadas, tricamadas e multicamadas, criando os famosos filmes magnéticos finos. A histerese magnética é obtida quando definimos a energia associada ao filme magnético fino. As energias associadas aos filmes magnéticos mais comuns são: **energia de troca**, **energia de anisotropia** e **energia Zeeman**. A energia de troca e a energia anisotropia uniaxial são intrínsecas de cada material e estão diretamente associadas aos comportamentos dos momentos de cada material. A energia Zeeman na qual o campo externo contribui está diretamente associada aos valores que o campo externo pode assumir. Para os filmes magnéticos considerados nesse trabalho a energia total é dada pela soma de cada uma delas. Cada energia está associada a uma função diferente na junção dos filmes na composição das camadas magnética. Mostramos que as curvas de histerese magnética variam com a espessura do Ferro, bem como o campo de reversão. Considero que nesse trabalho foi possível romper os limites do conhecimento designado para um curso de graduação em Física, pelo qual, no momento, estou concluindo. Esse trabalho forneceu um ganho adicional em uma área específica do conhecimento, enriquecendo minha formação curricular. A partir desse trabalho outros estudantes possam usufruir dessas informações para mostrar o comportamento da curva de histereses em tricamadas ou multicamadas. Por fim, encerro deixando esse trabalho de conclusão de curso como sendo minha contribuição a estudos mais avançados na grande área do eletromagnetismo aplicado.

Palavras-Chave: Propriedades Intrínsecas do Material, Filme Magnéticos Finos de Fe/SmCo; Curva de Histerese.

ABSTRACT

Magnetism is the denomination given to phenomena by which a body can attract or repel itself in relation to others. Over time, there has been great progress in the study of magnetic materials, resulting in a great scientific and technological advance. Nanotechnology has been providing this advancement and as a consequence of this new magnetic materials have appeared and these have in turn been the answer to this range of technological instruments of very high efficiency in the industrial branch, having great applications in different sectors, from permanent magnets used in the manufacture of Electric motors, speakers, headphones, refrigerators, etc. To more comprehensive applications, in the construction of computers and communications systems. In this work, we did a bibliographic study on the intrinsic properties of the material and the behavior of the magnetic hysteresis of a fine magnetic film of Iron and Samarium Cobalt. We observed that studies are done considering a discrete model of atomic planes to compose a Fe / SmCo bilayer in which the magnetic hysteresis curve presents different intrinsic properties compared to each material alone. The finer the films, the more easily the electrons pass through the material, because the collisions are very small along the way, resulting in a non-compromise in the orientation of your spins. Many researchers see using nanotechnology to alter the intrinsic properties of the most diverse materials and for this they idealize models such as: bilayers, tricamadas and multilayers, creating the famous thin magnetic films. Magnetic hysteresis is obtained when we define the energy associated with the fine magnetic film. The energies associated with the most common magnetic films are: exchange energy, anisotropy energy and Zeeman energy. The exchange energy and the uniaxial anisotropy energy are intrinsic to each material and are directly associated with the behavior of the moments of each material. The Zeeman energy in which the external field contributes is directly associated with the values that the external field can assume. For the magnetic films considered in this work the total energy is given by the sum of each one of them. Each energy is associated with a different function at the junction of the films in the composition of the magnetic layers. We show that the magnetic hysteresis curves vary with the thickness of the Iron, as well as the reversal field. I believe that in this work it was possible to break the limits of the knowledge assigned to an undergraduate course in Physics, for which I am currently concluding. This work provided an additional gain in a specific area of knowledge, enriching my curriculum training. From this work, other students can use this information to show the behavior of the hysteresis curve in tricams or multilayers. Finally, I close leaving this work of completion of course as my contribution to more advanced studies in the large area of applied electromagnetism.

Keywords: Bilayers, Second Neighbors, Magnetic hysteresis curves.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	MATERIAIS MAGNÉTICOS	16
2.1	DIAMAGNÉTICOS, PARAMAGNÉTICOS E FERROMAGNÉTICOS.....	16
2.2	BICAMADAS, TRICAMADAS E MULTICAMADAS MAGNÉTICAS.....	22
2.3	ESTUDO ENERGÉTICO	25
3	METODOLOGIA	28
4	COMPORTAMENTO DA BICAMADA DE Fe/SmCo	29
5	CONCLUSÕES	34
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Muito se tem discutido sobre a explosão tecnológica que estamos vivenciando. Recentemente os estudos de materiais magnéticos tem sido a resposta para essa gama de instrumentos tecnológicos de altíssima eficiência no ramo industrial, tendo grandes aplicações em diferentes setores, desde ímãs permanentes usados na fabricação de motores elétricos, autofalantes, fones, geladeiras, etc. até aplicações mais abrangentes, na construção de computadores e sistemas de comunicações. É comum hoje, conseguirmos guardar informações utilizando dispositivos muito pequenos que dependem diretamente das propriedades magnéticas dos materiais que os constituem. Armazenar informações nada mais é do que criar uma rede de ímãs microscópicos no interior de um disco rígido (SEARS & ZEMANSKY 2009 p. 262). Por esse motivo é importante estudar e discutir as classificações magnéticas dos materiais, considerando as aplicações no mundo tecnológico.

Magnetismo é a denominação dada aos fenômenos pelo qual um corpo pode atrair-se ou repelir-se em relação a outros. As primeiras observações desse fenômeno ocorreram na Grécia antiga, mais precisamente na cidade de Magnésia. Estudos mais detalhados só vieram ocorrer por volta do século VI a.C., através das observações de Tales de Mileto, estudando pequenas pedras que podiam se atrair e repelir uma das outras, que mais tarde seriam denominadas magnetitas. Mas foram os chineses que, primeiramente, utilizaram de forma prática o magnetismo na construção das bússolas para serem usadas como instrumento na navegação (RIBEIRO, 2000, pag. 299). Com o passar do tempo, houve um grande progresso nos estudos dos materiais magnéticos, resultando em um grande avanço científico e tecnológico.

Os materiais magnéticos são divididos em categorias e dependem das propriedades intrínsecas de cada um deles. Esse estudo é direcionado aos materiais que se comportam como ímãs permanentes, que não podem ser retirados diretamente da natureza, mas podem ser desenvolvidas em laboratórios e suas estruturas próprias serem alteradas. É importante conhecer a dureza desses materiais para uma produção cada vez mais eficiente e que facilite a comercialização que gira em torno de todo o mundo, movimentando o mercado capitalista.

Neste trabalho objetivamos conhecer sobre a nanotecnologia na construção das novas propriedades intrínsecas das bicamadas, tricamadas, multicamadas e filmes magnéticos. Apresentaremos o comportamento da curva de magnetização de materiais dopados formando uma bicamada magnética. Objetivamos ainda, mostrar as aplicações dessas dopagens de

materiais fabricados em escalas nanométricas, na construção de aparatos tecnológicos no armazenamento de informações em aparelhos cada vez menores e mais eficientes. E, finalmente, compreender as razões físicas pela qual as propriedades desses materiais são modificadas.

No capítulo 2 abordamos as propriedades magnéticas de alguns materiais, sob uma visão microscópica dos domínios magnéticos de cada um. Apresentamos breves discussões sobre cada propriedade magnética em termos de magnetização, permeabilidade magnética e susceptibilidade magnética na presença e ausência de campo externo. Mostramos que a uma dada temperatura crítica os materiais que estavam magnetizados perdem sua magnetização, mesmo na presença de um campo externo. Fizemos um estudo energético dos filmes magnéticos, mostrando as equações associadas a cada energia do sistema. E, finalizamos o capítulo mostrando como foi representado o Hamiltoniano utilizado no estudo energético associados aos planos atômicos.

No capítulo 3 apresentamos nossa metodologia que foi baseada em um estudo bibliográfico amplo, desde livros da física básica à livros específicos e entre outros trabalhos científicos na área. Foi feito um estudo sobre as propriedades magnéticas dos filmes finos na construção de bicamadas, tricamadas e multicamadas magnéticas, e, através de uma pesquisa já efetuada mostramos os principais parâmetros para a obtenção das curvas de magnetização para uma bicamada magnética de dois materiais Fe/Sm-Co.

No capítulo 4 apresentamos os resultados obtidos para alguns materiais baseado na metodologia proposta. Mostrando inicialmente a histerese formada pelos materiais separados, o Fe e o Sm-Co, depois para a bicamada composta pela junção dos materiais, aumentando as espessuras de cada material e mostrando os diferentes comportamentos.

Finalmente, no cap. 5 apresentamos nossas conclusões finais, mostrando a relevância de trabalhos nessa área. Apresentamos as possibilidades de alavancar pesquisas mais aprofundadas nessa área deixando como proposta para outros estudantes que despertarem interesse nessa área do eletromagnetismo aplicado a partir da leitura desse trabalho.

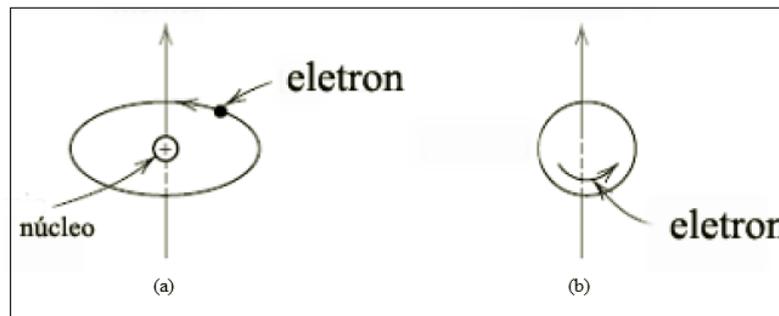
2 MATERIAIS MAGNÉTICOS

Os materiais podem ser classificados segundo a ordem do seu momento magnético. Assim, a seguir apresentaremos uma breve abordagem dos materiais e de suas propriedades intrínsecas.

2.1. DIAMAGNÉTICOS, PARAMAGNÉTICOS E FERROMAGNÉTICOS

As propriedades magnéticas dos materiais têm sua origem na estrutura eletrônica do átomo. Existem dois tipos de movimento, do ponto de vista clássico para explicar a existência dos momentos magnéticos: o momento angular orbital e o momento angular dos “*spins*” (rotação em torno de se próprio) do elétron. Cada elétron possui um momento angular orbital e um momento angular dos spins, que se combinam vetorialmente tanto com os elétrons do mesmo átomo quanto com os demais átomos de uma mesma amostra de um material. A forma como ocorre essa combinação determina como o material irá se comportar na presença de outro campo magnético. Na fig.1 apresentamos os dois tipos de momentos magnéticos existente dentro do átomo do ponto de vista clássico.

Figura 1: Representação dos momentos magnéticos de um elétron: (a) momento magnético orbital e (b) momento magnético de spin.



Fonte: Ebah.com.br

O comportamento dos materiais magnéticos é resultado da característica particular de cada elétron de um átomo, a qual definimos como **dipolo magnético**. Podemos considerar um dipolo magnético como um pequeno ímã e sua medida ou caracterização definida como **momento de dipolo magnético**. Numa escala macroscópica a grandeza que descreve o estado magnético de um material é a **magnetização** representada pelo símbolo **\mathbf{M}** , definido como o somatório do momento dipolar magnético (**μ**) por unidade de volume (**V**),

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum \vec{\mu}_i \quad (1)$$

i representa todos os pontos que serão somados por toda extensão de **V** , nos quais exista o momento de dipolo magnético **μ_i** . É necessário escolher uma amostra com um volume suficientemente grande para que se possa ter uma boa visão macroscópica. Dizemos que um

material tem magnetização nula quando os momentos magnéticos estão desalinhados uns em relação aos outros, pois a soma de todos os momentos μ_i será 0.

O campo magnético gerado \mathbf{B} (indução magnética) é proporcional a soma de \mathbf{H} (campo magnetizante) e \mathbf{M} (magnetização). O fator de proporcionalidade é a permeabilidade magnética no vácuo (μ_0), obtendo assim a seguinte expressão:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

Podemos mostrar ainda que, para um material que tenha magnetização nula ($\mathbf{M}=0$) a indução (\mathbf{B}) é proporcional ao campo externo aplicado (\mathbf{H}),

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} \quad (3)$$

Como vimos a cima, a aplicação de um campo externo \mathbf{H} induz uma magnetização nesse material \mathbf{M} , logo a magnetização é proporcional ao campo aplicado, expressada por:

$$\vec{M} = \chi\vec{H} \quad (4)$$

onde χ representa a constante de proporcionalidade conhecida como **susceptibilidade magnética** que é uma propriedade física que diferencia a classificação magnética dos materiais.

A **permeabilidade magnética** é a medida da habilidade de um material transportar as linhas de campo magnético (fluxo magnético). Os materiais magnéticos apresentam permeabilidade magnética alta. A expressão da permeabilidade magnética parte do princípio da combinação das equações (1), (2), (3) e (4), definida por:

$$\mu = (1 + \chi) \quad (5)$$

A partir dessas informações seremos capazes de entender como se dá o comportamento dos materiais magnéticos com interações internas sob uma visão microscópica. Usualmente os materiais magnéticos são classificados em:

- Diamagnéticos
- Paramagnéticos
- Ferromagnéticos
 - Ferrimagnéticos
 - Antiferromagnéticos

Os materiais diamagnéticos são aqueles que apresentam uma resposta magnética muito fraca e não possuem momentos magnéticos permanentes, ou seja, só conseguem manifestar algum comportamento na presença de um campo externo \mathbf{H}_{ext} . Nesses materiais a combinação dos momentos dipolares quando submetido a \mathbf{H}_{ext} apresentam um campo magnético com pouca intensidade e de orientação oposto ao campo aplicado. A susceptibilidade magnética em materiais diamagnéticos é pequenos números negativos ($\chi < 0$). Não é de interesse nesse trabalho estudar materiais que apresentam esse tipo de comportamento.

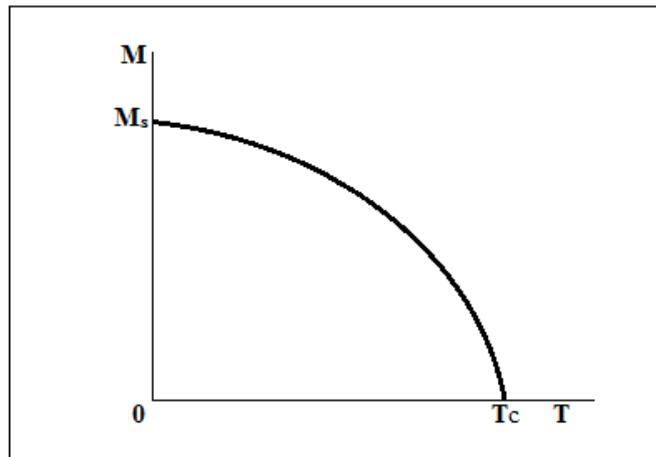
Pertencem ao grupo dos paramagnéticos, materiais que apresentam momentos magnéticos permanentes, mas, isolados uns dos outros. Na presença de um campo magnético externo os spins desses materiais se alinham parcialmente, resultando em uma magnetização no mesmo sentido do campo aplicado. Quando o campo externo é removido os momentos desalinham e voltam a ter magnetização nula. Em termos de susceptibilidade, esses materiais apresentam pequenos valores positivos ($\chi > 0$).

Os materiais ferromagnéticos são caracterizados por apresentarem fortes interações internas dos seus momentos magnéticos, resultando em um alinhamento total quando submetidos a presença de um campo externo. Esse alinhamento permanece mesmo quando o campo externo é removido e por esse motivo os materiais ferromagnéticos tem um magnetismo permanente. A susceptibilidade magnética nesse tipo de materiais é grande, ou seja, $\chi \gg 0$. De um ponto de vista macroscópico, as propriedades dos materiais ferrimagnéticos são muito semelhantes às dos ferromagnéticos, pois os materiais que se comportam como ferrimagnéticos têm diferentes intensidade dos momentos de dipolos magnéticos e logo existe sempre um momento resultante diferente de zero. Já os antiferromagnéticos têm características opostas aos demais, pois mesmo na presença de um campo externo não apresentam propriedades magnéticas, são os conhecidos materiais não magnéticos. A exemplo desses materiais temos vidros, plásticos, madeiras, etc. É de interesse desse trabalho estudar materiais ferromagnéticos.

Pierre Curie em meados do século XIX, verificou que a uma certa temperatura crítica, mais tarde conhecida como temperatura de Curie, os materiais ferromagnéticos perdem sua magnetização, isso em decorrência da agitação térmica dos seus momentos (RIBEIRO, 2000,

pag.303). O valor dessa temperatura varia especificamente de material para material, pois o valor de **M** (magnetização) depende do momento magnético e contrapartida o valor de T_c (Temperatura de Curie) depende da interação entre esses momentos . Na Fig.2 apresentamos como ocorre a desmagnetização do material em função da temperatura.

Figura 2: Variação da magnetização espontânea em materiais ferromagnéticos com a temperatura de Curie.



Fonte: Autoria Própria

A Fig. 2, apresenta como a magnetização M varia com o aumento da temperatura T , até que esta alcance uma magnetização nula ($M = 0$), quando atinge a temperatura de Curie T_c .

A tendência dos momentos atômicos de se alinharem paralela ao campo é dificultada pelos movimentos da agitação térmica desses momentos e com isso sua susceptibilidade magnética sempre diminui à medida que a temperatura aumenta. Na maioria dos casos esta é inversamente proporcional a temperatura T e podemos expressar a magnetização M pela *Lei de Currie*:

$$M = C \frac{B}{T} \quad (6)$$

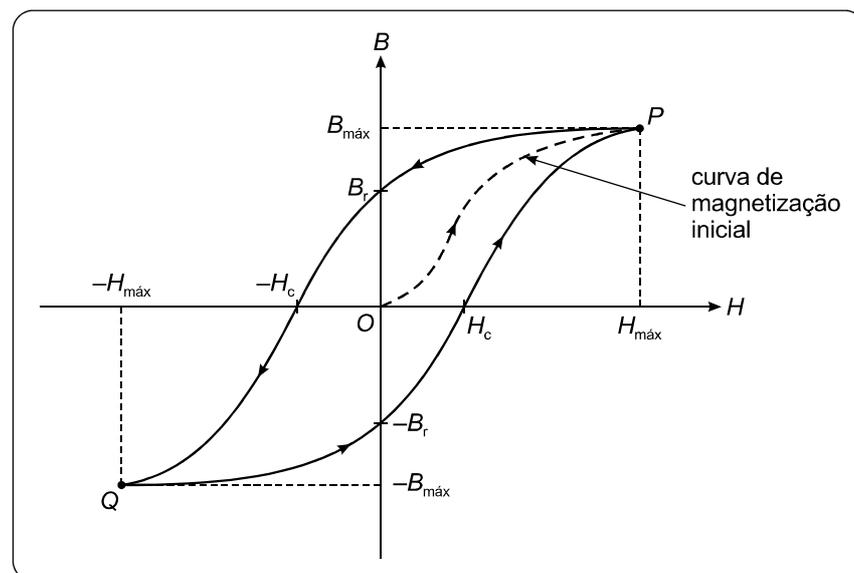
Onde C é denominada *constante de Currie* e possui valores diferentes para materiais diferentes.

Em materiais ferromagnéticos que apresentam uma temperatura menor que a de Curie acontece o alinhamento dos momentos de dipolos magnético dos átomos vizinhos e na presença de um campo externo os momentos evoluem até a *magnetização de saturação*, em

outras palavras, atinge um ponto onde todos os momentos estão alinhados com o campo. Depois de atingir esse ponto o aumento da intensidade do campo não surtirá efeito algum, a magnetização de saturação é a magnetização máxima de um corpo. Na medida que magnetizamos um material, colocando este sob efeitos de um campo externo, na verdade estamos fazendo com que despertem dois efeitos nesse material, o aumento do tamanho dos domínios que tem a mesma orientação do campo e a diminuição daqueles que tem orientações diferentes.

Através das curvas de magnetização é possível percebermos como um material ferromagnético se comporta quando aumentamos ao máximo e diminuimos na mesma intensidade o campo externo aplicado. Chamamos de *Histerese* a tendência de um sistema conservar suas propriedades quando é retirado o estímulo que o gerou.

Figura 3: Representação de um ciclo de histerese



Fonte: ebah.com.br

A Fig. 3 é a representação da histerese de um material inicialmente desmagnetizado (ponto O) como podemos observar. Logo em seguida houve um aumento no valor de H (campo externo) - devido o aumento da corrente - até que chegue a intensidade máxima do campo aplicado $H_{máx}$, gerando uma curva de magnetização inicial (OP), o ponto P é exatamente o momento em que o material chega a saturação magnética. B não retorna pela mesma curva (OP), B atrasa em relação a H . H é reduzido e toca no ponto B_r que é a magnetização permante quando não há corrente, conhecido como *magnetização remanente*. No momento que há inversão no sentido da corrente a curva segue os mesmos valores de B

menores que B_r até que B se anule em determinado valor H_c , chamado de *campo coercitivo* (campo aplicado no sentido negativo). Com o aumento negativamente do campo até que atinja valor $-H_{m\acute{a}x}$, B cresce até novamente chegar a saturação Q , retornando a curva por $-B_r$ completado o ciclo de histerese. Um material é dito duro, quando tem altos valores de B_r e de campo coercitivo H_c , e por tanto ciclo de histerese mais alargadas, são os casos dos materiais usados na fabricação de ímãs permanentes com grande utilidade no armazenamento de informações.

2.2. BICAMADAS, TRICAMADAS E MULTICAMADAS MAGNÉTICAS

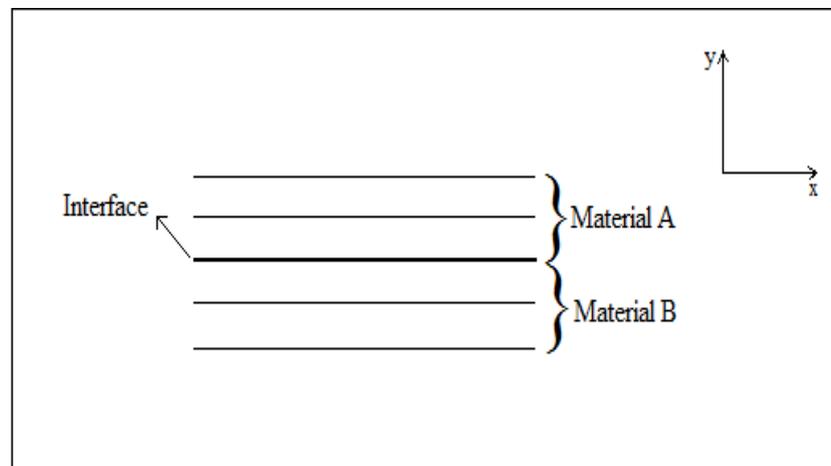
Em 1959 o físico americano Richard Feynman apresentou uma pesquisa que mostrava a visão miniaturizada das tecnologias revolucionárias futuristas. Esse estudo despontava a possibilidade de poder organizar e reorganizar a menor parte da matéria, o átomo, da forma que se desejar. Foi um impacto essa notícia para a época, pois era um estudo muito avançado para a realidade vivenciada. Após passar três décadas, a ideia revolucionária de Feynman toma forma e passa a ser estudada como ciência de um mundo pequeno, conhecida hoje como Nanotecnologia. O avanço desenfreado de pesquisas em todo o mundo, mostrou descobertas jamais vislumbradas para a tecnologia. Nanotecnologia é proveniente da palavra nanômetro (equivalente a bilionésima parte de metro), nessa escala é possível observar propriedades físicas e parâmetros importantes observados em escalas macroscópicas (FRANCISQUINI, SCHOENMAKER, SOUZA, 2014, pag. 288). Nesse sentido, muitas das explicações para fenômenos em escalas macroscópicas divergem das nanoscópicas. Essa ciência hoje conglomerada muitas áreas de pesquisas em diversos campos de aplicações com uma visão de avanço a curta e longo prazo.

O estudo da nanotecnologia magnética tem uma contribuição muito importante nas aplicações tecnológicas. Essa tecnologia na fabricação de filmes magnéticos é indispensável, pois se trata de alterar propriedades em camadas atômicas, na construção de microestruturas de acordo com o número de camadas que se desejar. As camadas magnéticas intercaladas a camadas não magnéticas, com diferentes espessuras em escala nanométricas, resultam nas chamadas bicamadas (AL-OMARI; SELLMYER, 1992, tricamadas (LUI, et al, 1997) e até multicamadas magnéticas (SHINJO, et al, 1996). Essa organização estrutural das camadas dos filmes está inteiramente ligada à sua espessura. Quanto mais finos os filmes mais facilmente acontecem a travessia dos elétrons no material, pois é muito pequena as colisões pelo caminho, resultando em um não comprometimento na orientação dos seus spins. Apesar de

apresentarmos uma visão geral dos filmes magnéticos finos para diferentes números de camadas, neste trabalho o foco principal é um estudo mais detalhado de uma bicamada de dois tipos de materiais que serão abordados posteriormente.

Consideramos nesse trabalho de conclusão de curso o estudo dos filmes magnéticos em duas dimensões, assim como está representada na Fig.4. Através das dimensões de um sistema geométrico de planos atômicos, podemos perceber em quais direções acontecerão o movimento dos spins.

Figura 4: Representação geométrica de planos atômicos de uma bicamada magnética.

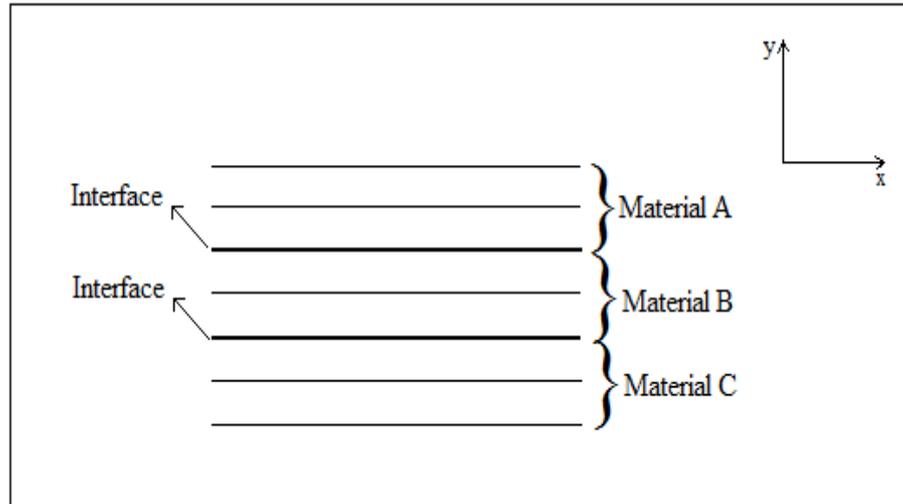


Fonte: Autoria Própria

A Fig. 4, representa um modelo imaginário de átomos de dois materiais (A e B), cada linha representa um plano atômico e o conjunto de planos formam uma camada com espessura na ordem de nanômetros. A linha que separa os dois materiais chamamos de interface. Essa é uma representação geométrica de uma bicamada magnética em uma visão imaginária e microscópica.

A representação geométrica de uma tricamada magnética é análoga a de uma bicamada. A Fig. 5 é a representação imaginária geométrica dos planos atômicos de uma tricamada magnética.

Figura 5: Representação geométrica de planos atômicos de uma tricamada magnética.

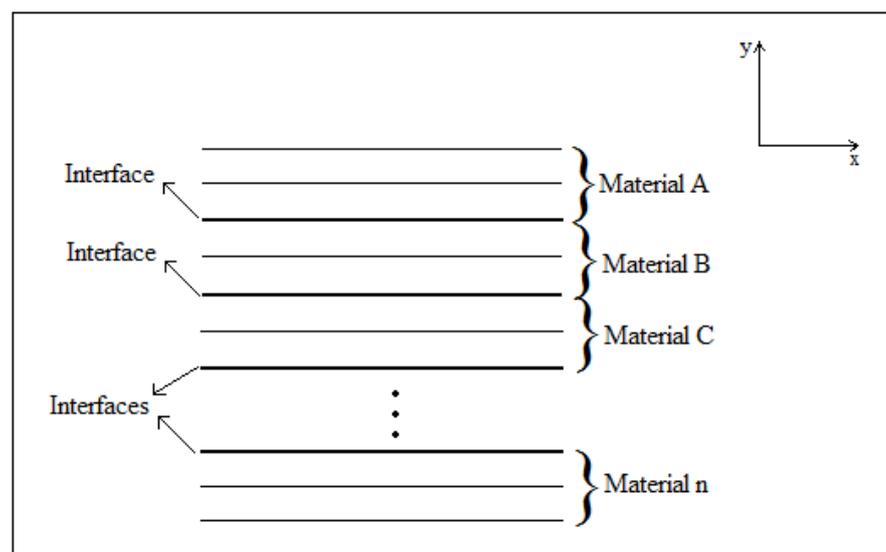


Fonte: Autoria Própria

A tricamada magnética apresentada na Fig. 5 são estruturas de materiais magnéticos ou não magnéticos, alternadamente empilhados (A, B e C). Apresenta pequena diferença da bicamada apontada anteriormente, pois é composta por três materiais acoplados e com uma combinação quanto a espessura de cada camada, para que haja uma uniformização da parcela de cada material na eficiência das aplicações.

Para as multicamadas segue a mesma geometria de planos atômicos das camadas anteriores, podendo ter n materiais acoplados de maneiras diferentes.

Figura 6: Representação geométrica de multicamadas magnéticas.



Fonte: Autoria Própria

Na Fig.6, está a representação imaginária e microscópica de uma multicamada magnética. Essas multicamadas magnéticas apresentam diferença das demais estudadas até o momento, nesse tipo de acoplamento não existe uma exigência específica ao número de camadas, podendo conter n materiais empilhados de maneiras distintas. É chamada de multicamadas estruturas que apresentam mais de três filmes finos.

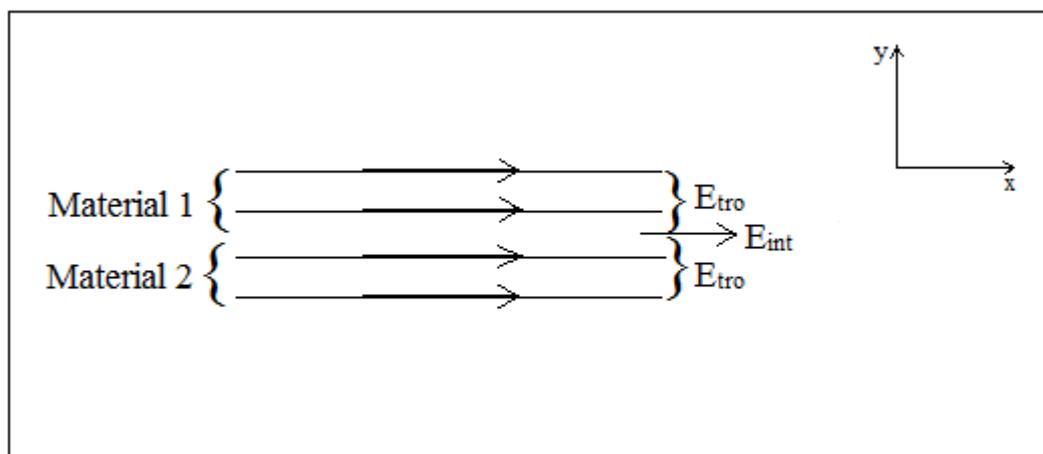
O número de camadas dos filmes finos vai depender do material e das propriedades física de interesse, pois vai existir aplicações onde será necessária uma bicamada para atender à necessidade, assim como situações onde é mais relevante o uso de multicamadas.

2.3. ESTUDO ENEGÉTICO

As energias associadas aos filmes magnéticos mais comuns são: **energia de troca**, **energia de anisotropia** e **energia Zeeman**. A energia de troca e a energia anisotropia uniaxial são intrínsecas de cada material e estão diretamente associadas aos comportamentos dos momentos de cada material. A energia Zeeman na qual o campo externo contribui está diretamente associada aos valores que o campo externo pode assumir. Para os filmes magnéticos considerados nesse trabalho a energia total é dada pela soma de cada uma delas. Cada energia está associada a uma função diferente na junção dos filmes na composição das camadas magnética.

A energia de troca é a energia associada as interações dos spins nos materiais ferromagnéticos em termo dos seus momentos angulares. Se considerarmos uma bicamada magnética formada por um material ferromagnético e outro material antiferromagnético teremos uma representação geométrica de como acontece a energia de troca entre os spins de diferentes planos.

Figura 7 – Modelo geométrico da energia de troca entre primeiros vizinhos



Fonte: Autoria Própria

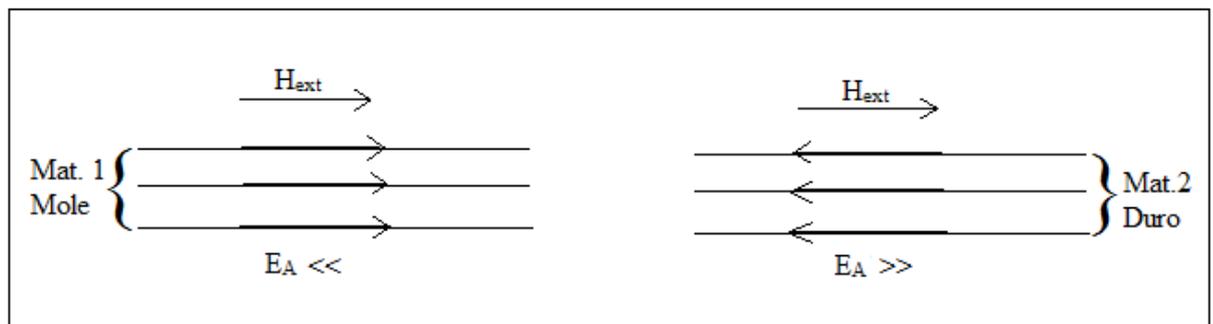
A Fig.7,é a representação de como se dá a energia de interação entre planos vizinhos, representados através de dois materiais, considerando a energia de interface entre a junção dos materiais como sendo diferente da energia de troca dos planos do mesmo material.

A equação da energia de troca relaciona o somatório dos momentos de spins de interação entre primeiros vizinhos com a interface é dada por:

$$E_t = - \sum_{n=1}^N J_n [(S_n \times S_{n+1}) + (S_n \times S_{n-1})] \quad (7)$$

A **Energia Anisotrópica Uniaxial** é a energia intrínseca que os momentos magnéticos possuem e que dificultam seu giro na presença de um campo externo. Esse efeito é devido ao movimento orbital do spin, que dificulta localmente o giro livre dos momentos.

Figura 8. Energia anisotrópica uniaxial em dois materiais(1 e 2) na presença de um campo externo H.



Fonte: Autoria própria

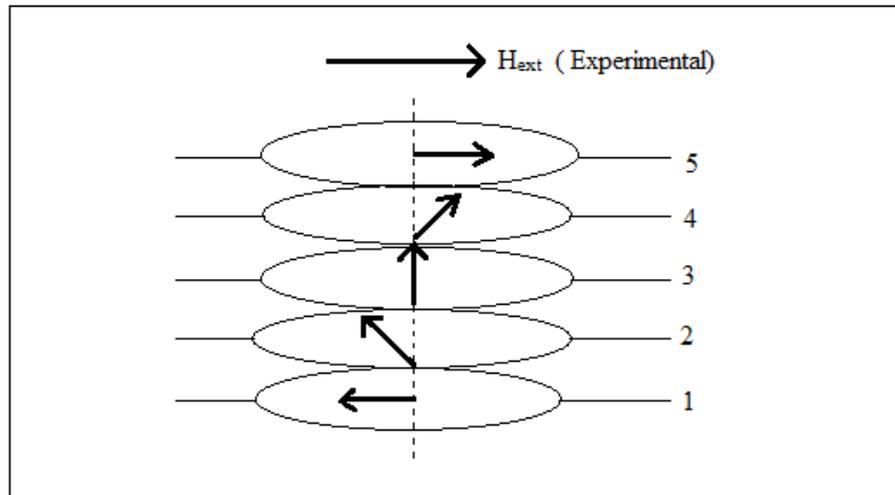
A expressão matemática que representa a energia anisotrópica uniaxial é dada por

$$E_A = -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^N K_n (S_n)^2$$

Quando é aplicado um campo magnético externo sobre uma amostra de um material magnético, haverá uma tendência natural de uma diminuição na energia de interação dos momentos e os mesmos tenderão a se alinha favorável a direção do campo aplicado. Essa

interação entre a magnetização da amostra e o campo externo aplicado, se deve a **Energia de campo externo** ou **Energia de Zeeman** (em homenagem ao Pieter Zeeman que em 1896 estudou esse efeito). A figura abaixo representa esse efeito

Figura 9. Energia de campo externo (Parede de Bloch).



Fonte: Autoria Própria

A expressão matemática que representa a energia Zeeman é dada por:

$$E_{H_{ext}} = -g\mu_B \sum_{n=1}^N J_n (S_n \times H_{ext}) \quad 8)$$

E, finalmente, a expressão matemática para a energia total é expressa por:

$$E_{total} = E_t + E_A + E_{H_{ext}} \quad 9)$$

$$E_{total} = - \sum_{n=1}^N J_n [(S_n \times S_{n+1}) + (S_n \times S_{n-1})] - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N K_n (S_n)^2 - g\mu_B \sum_{n=1}^N (S_n \times H(0))_z$$

A histerese magnética é obtida a partir da expressão matemática do campo efetivo e da equação de movimento dos spins. O campo efetivo é obtido quando usamos o valor da energia total.

Os resultados apresentados no capítulo 4 são para uma bicamada de Ferro e Samário Cobalto. Os valores das constantes foram obtidos de um artigo experimental. A seguir apresentamos a metodologia utilizada nesse trabalho.

3 METODOLOGIA

As propriedades intrínsecas dos materiais magnéticos ou não magnéticos são de suma importância em diversos fenômenos físicos na natureza. Cientistas buscam compreendê-las para que novas tecnologias possam ser desenvolvidas, possibilitando mudanças significativas na ciência. No processo de gravação de informações em HD's de computadores, pen drives e outros dispositivos eletrônicos são necessários materiais com propriedades magnéticas bem definidas. Assim, surgiram as bicamadas, tricamadas e multicamadas magnéticas. A metodologia adotada nesse trabalho foi uma ampla pesquisa bibliográfica acerca do tema. Durante o levantamento bibliográfico, selecionamos alguns artigos, livros, dissertações e teses que nos forneceu a base teórica necessária para que pudéssemos compreender as propriedades magnéticas a partir de uma curva de histerese para uma bicamada de Fe/SmCo. Passamos inicialmente a compreender os materiais classificados em: paramagnéticos, diamagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos. Consideramos um modelo de bicamada no espaço bidimensional no qual possui a energia de troca, anisotrópica uniaxial e Zeeman. Esse modelo não é real, contudo serve de base teórica para modelos mais precisos. Utilizamos a equação de campo efetivo e de movimentos dos spins para obter os resultados necessários para construir a curva de histerese magnética. Com o conhecimento do comportamento dos spins de cada propriedade, passamos a fazer um estudo discursivo através de definições e expressões matemáticas para fazer interpretações da magnetização do material na presença e ausência de um campo externo. Nos aprofundamos particularmente no artigo experimental do Fullerton et al. Esse artigo fornece os valores exatos dos parâmetros necessários para o estudo de uma bicamada de Ferro e Samário Cobalto. Observamos o comportamento da histerese magnética quando variamos a espessura do Ferro e do Samário Cobalto, bem como, deles isoladamente. Finalmente, descrevemos cuidadosamente os resultados obtidos para cada parâmetro que variamos na bicamada como forma de explicitar

as alterações ocorridas na estrutura intrínseca desse material. Por fim, recomendamos outros trabalhos em tricamada ou multicamadas que venham a contribuir na socialização do conhecimento nessa área da ciência.

A seguir, apresentamos as curvas de histerese magnética para uma bicamada de Fe/SmCo explicitando, em particular, cada caso.

4 COMPORTAMENTO DA BICAMADA DE Fe/SmCo

Antes de apresentar o comportamento da curva de histerese magnética para a bicamada magnética de Fe/SmCo, faremos uma breve descrição da obtenção das medidas necessárias para construção dessas histereses. Uma vez definida a energia considerada para a bicamada magnética, no caso específico, dada pela equação Eq.10, podemos calcular o campo efetivo, Eq.11 é a equação do movimento dos spins, Eq.12. O tratamento adotado é discreto onde consideramos uma sequência de planos atômicos paralelo num plano bidimensional. Esse modelo é puramente didático. As expressões matemáticas para o campo efetivo e o movimento dos spins são dadas por:

$$H_{\text{eff}} = \frac{1}{g\mu_B} \frac{\partial E}{\partial S} \quad (11)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \gamma S \times H_{\text{eff}} \quad (12)$$

onde g representa a gravidade, μ_B a permeabilidade magnética e a derivada representa a variação da energia segundo o spin. O gama, γ , representa a razão giromagnética específico de cada elemento.

Nos limitamos aos estudos das bicamadas magnéticas composta por Fe/SmCo. A tabela 1 apresentamos alguns valores de constantes, anisotropias, magnetização e espessura dos planos atômicos.

Tabela 1. Parâmetro dos materiais

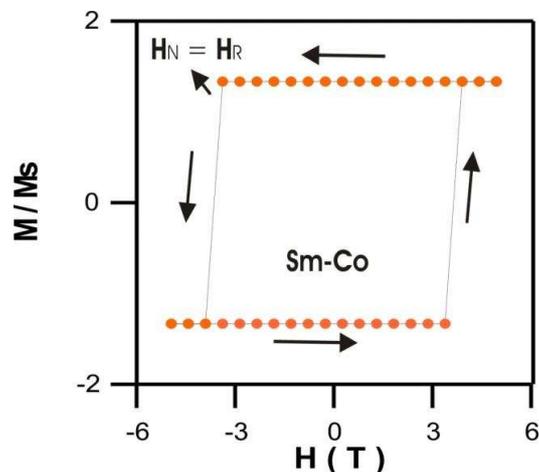
	Símbolo	Ferro (Fe)	Samário Cobalto (Sm-Co)	Unidades
Anisotropias	K	10^3	5×10^7	ergs/cm ³

Magnetização de saturação	M_s	1700	550	emu /cm ³
Campo de troca	J_{int}	$2,8 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-6}$	ergs /cm
Distância entre planos atômicos	d	2,0	2,0	Å

Fonte: E. E. Fullerton, J. S. Jiang, S. D. Bader, J. Magn. Magn. Mater. 200 (1999) 392-404

Iniciamos construindo uma histerese magnética para um filme de Samário Cobalto isolado Fig. 10. Sabemos pela tabela 1 que a magnetização do Samário Cobalto é pequena em relação ao Ferro. Contudo, sua anisotropia é bem maior que a do Ferro. A anisotropia uniaxial impede que os momentos girem facilmente com o campo externo, assim sua histerese apresentou-se relativamente alargada. A princípio parece um bom resultado utilizar o Samário Cobalto na produção de equipamentos eletrônicos que exijam essa propriedade.

Figura 10. Curva de histerese do Samário-Cobalto (material único) onde as paredes de domínios são muito pequenas.



Autoria: ASSIS JR, Dissertação Mestrado, UFRN, 2004.

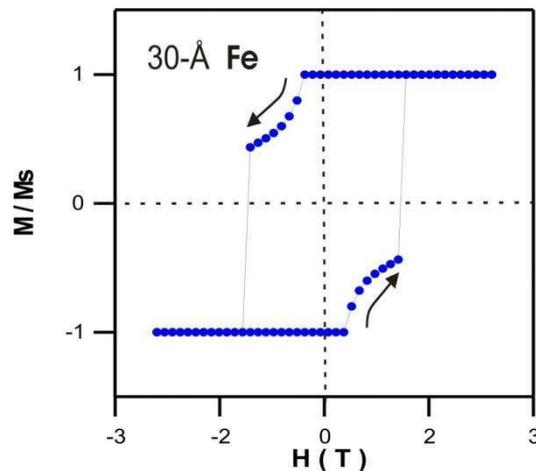
Mas como a magnetização é pequena isso dificulta o processo de magnetização impossibilitando sua utilização em equipamentos eletrônicos que exigem gravar informações. Assim, uma mistura de materiais com alta magnetização e alta anisotropia seria o ideal.

As bicamada, tricamadas e multicamadas são as formas geométricas surgidas para melhorar as propriedades magnéticas de alguns dispositivos eletrônicos necessários para

gravação de informações. A seguir, apresentamos uma curva de histerese na qual foi construída a parti de uma bicamada magnética, ou simplesmente filme magnético fino.

A espessura do Ferro foi de 30 Angstroms acoplado a uma outra parte de Samário Cobalto formando a bicamada. Observamos a formação de uma parede de domínio no qual o campo externos consegue girar os momentos até a saturação nos limites da curva de histerese, Fig.11.

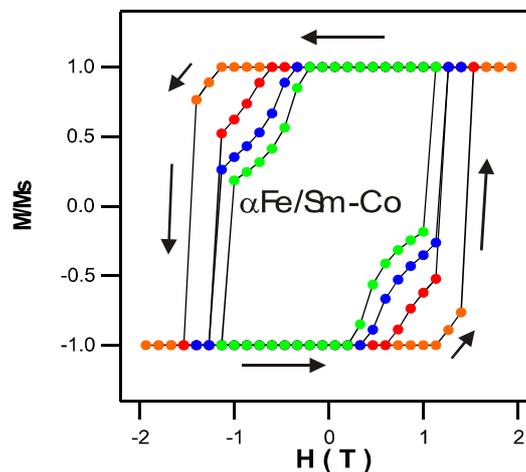
Figura 11. Curva de histerese do Ferro (único material) com espessura de 30 Å.



Autoria: ASSIS JR, Dissertação Mestrado, UFRN, 2004.

A histerese da Fig. 12, apresenta valores da espessura do Ferro um pouco maior, variando de 40 a 100 Angstroms. O aumento do Ferro diminui o alargamento da histerese. Neste caso, é importante não aumentar muito a quantidade de Ferro na bicamada, pois uma histerese muito estreita mostra que a bicamada pode perde facilmente a orientação magnética.

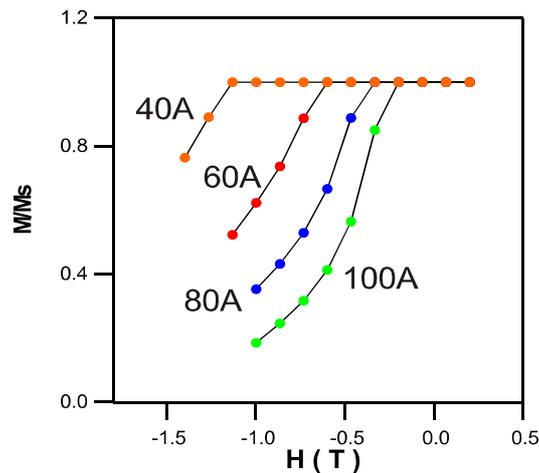
Figura 12. Histerese de uma bicamada (Ferro/Samário-Cobalto) com variações na espessura do Ferro entre 40 e 100 Å.



Fonte: ASSIS JR, Dissertação Mestrado, UFRN, 2004.

Na Fig. 13, mostramos um area ampliada da histerese da Fig.12, onde mostramos os valores especificos da espessura do Ferro na bicamada. Observamos que a medida que aumentamos o Ferro, a bicamada apresenta valores de campo de reversão cada vez menor.

Figura 13. Ampliação do lado superior esquerdo da histerese (Figura 12) mostrando o campo de nucleação de acordo com o aumento da espessura α do Ferro.

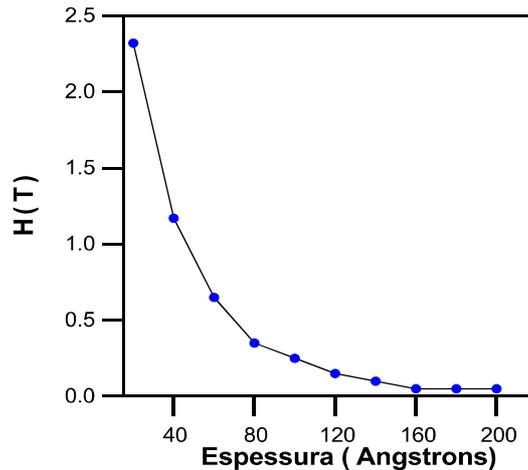


Fonte: ASSIS JR, Dissertação Mestrado, UFRN, 2004.

Na Fig.15, apresentamos o comportamento do campo de nucleação ou reversão. Nesse gráfico mostramos os valores do campo de reversão a medida que aumentamos a espessura do Ferro de 0 até 200 Angstroms.

Para bicamada utilizadas em dispositivos eletrônicos de gravação, é importante que a espessura do Ferro não ultrapasse valores acima de 100 Angstroms., pois o campo de reversão apresenta valores muito baixo.

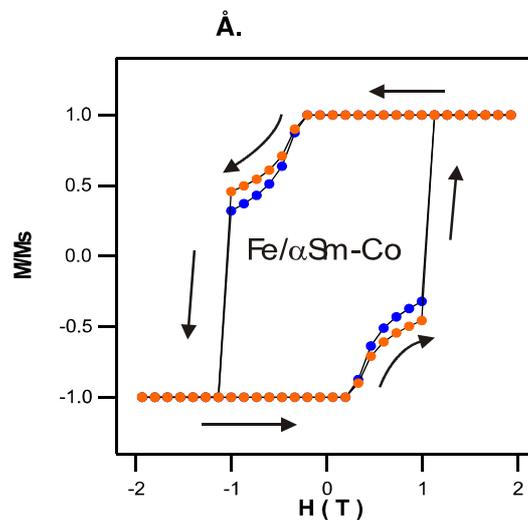
Figura 15. Campo de nucleação em função da espessura do Ferro.



Autoria: ASSIS JR, Dissertação Mestrado, UFRN, 2004.

Por outro lado, podemos variar a espessura do Samário Cobalto, que possui alta anisotropia e baixa magnetização. Observamos na Fig.16, que o campo de reversão é idiferente neste caso. O alargamento da histerese permanece inalterado. Assim, não convém alterar a espessura do SmCo.

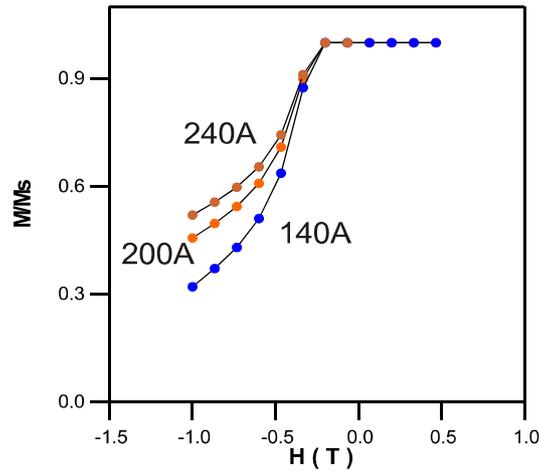
Figura 16. Histerese da bicamada Fe/Sm-Co com a espessura do Sm-Co variando entre 140 à 240



Fonte: ASSIS JR, Dissertação Mestrado, UFRN, 2004.

Na Fig.17, mostramos uma região da Fig.16 ampliada. É possível observar nitidamente que o campo de nucleação não se altera. Então, o Ferro é quem pode alterar as características magnéticas dessa bicamada.

Figura 17. Ampliação do lado superior esquerdo da histerese (Figura 16) mostrando o campo de nucleação de acordo com o aumento da espessura α do Sm-Co.



Fonte: ASSIS JR, Dissertação Mestrado, UFRN, 2004.

Após todos esses resultados podemos facilmente perceber que existem limitação para a espessura do Ferro, para os quais teremos uma bicamada interessante para dispositivos eletrônicos de gravação. Outra forma de melhorar os valores de campo de nucleação e construir tricamada ou multicamadas de forma a favorecer o aumento da magnetização sem gerar campos de nucleação de fácil reorientação.

A seguir, apresentamos nossas conclusões finais e possíveis sugestões para novos trabalhos com tricamadas ou multicamadas, pois existe uma tendência natural para estudos direcionados nessa área do magnetismo.

5 CONCLUSÕES

A pesquisa nessa área do magnetismo é bastante interessante e promove a construção de dispositivos eletrônicos de gravação cada vez mais avançados. O estudo de filmes finos na estrutura de bicamada é apenas uma pequena amostra de que novos modelos geométricos compostos por tricamadas ou multicamadas devem ser construídos e analisados. Modelos em três dimensões que se aproximem cada vez mais do universo real em que vivemos e as técnicas de conhecimento aprimoradas no uso da nanotecnologia possibilitaram novos conhecimentos específicos nessa área do magnetismo e trarão grandes descobertas científicas.

Consideramos que nesse trabalho foi possível romper os limites do conhecimento designado para um curso de graduação em Física, pelo qual, no momento, estou concluindo. Esse trabalho forneceu um ganho adicional em uma área específica do conhecimento, enriquecendo minha formação curricular.

Considero, que a partir desse trabalho outros estudantes possam usufruir dessas informações para mostrar o comportamento da curva de histereses em tricamadas ou multicamadas. Entendo, as limitações existentes em nossos laboratórios, contudo é possível fazer um trabalho nessa mesma linha que possa familiarizar fenômenos físicos mais avançados a nossa realidade.

Por fim, encerro minhas considerações deixando esse trabalho de conclusão de curso como sendo minha contribuição a estudos mais avançados na grande área do eletromagnetismo aplicado.

REFERÊNCIAS

- AL-OMARI, I. A.; SELLMYER, D. J. **Phys** 1992. v. 52, p. 34-41.
- ASCROFT, N. W.; MERMIN, N. D. **Solid State Physics**. New York: Saunders College, 1976.
- ASSIS JR., Pedro Carlos de. **Excitações de Bicamadas Ferromagnéticas**. Natal: UFRN-DFTE, 2004. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2004.
- BITTER, F. **Experimentes on the nature of ferromagnetic**. *Phys. Rev.*, 1932. v. 41. p. 507-515.
- CRAICK, Derek J. **Magnetism: principles and applications**. Chichester: Wiley, 1995.
- FRANCISQUINI, E. ; SCHOENMAKER, J. ; SOUZA, J. A. . **Nanopartículas Magnéticas e suas Aplicações** QUÍMICA SUPRAMOLECULAR E NANOTECNOLOGIA. 1 ed. São Paulo: Atheneu, 2014, v. 10, p. 269-288.
- E. E. FULLERTON, J. S. JIANG, S. D. BADER, J. **Magn. Magn. Mater**. 200 (1999) 392-404.
- HALLIDAY, RESNICK, WALKER; **Fundamentos da Física**, Vol. 3, 8ª Edição, LTC, 2010.
- LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. **On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies**, *Phys. Z. Sowjetunio*, 1935. p. 153-169, v. 8.
- LUI, J. P. et al. **IEEE Trans Magn.**, 1997. v. 33. Pag.3709.
- MAGTEK – Soluções Magnéticas. **Samário Cobalto**. Acesso em: 22/04/2017. Disponível em: <<http://www.magtek.com.br/imas.asp?ima=6>>.
- NOVAK, Miguel A. **Introdução ao Magnetismo**. IF-UFRJ. Acesso em: 01/11/2016. Disponível em: <<http://www.cbpf.br/~labmag/miguel.pdf>>.
- REZENDE, Sergio M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. 2.ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.
- RIBEIRO, Giulian A.P. **As propriedades magnéticas da matéria: Um primeiro contato**. UFSCar. Acesso em : 17/05/2017. Disponível:< http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_299.pdf>.
- SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. Pag.687.
- SEARS, ZEMANSKY. **Física: Eletromagnetismo**, Vol 3, 10ª Edição, Pearson, 2009.
- SHINJO, M. et al. **J. Magn. Magn. Mater**. 1996, v. 161.

SÓLYOM, Jenő. **Fundamentals of the Physics of Solids**. Volume I – Structure and Dynamics. New York: Springer, 2007.