



Efeitos da Espessura de Ferro, Anisotropia de Forma e Temperatura nas Propriedades Magnéticas de Nanodiscos Multi-Camadas:

RESUMO

Palavras-chave: magnetismo, nanodiscos, multicamadas, GMR, sensores biomédicos

Autores: Lívia Embiruçu Correia¹, Kleber Roberto Pirola^{*1}

¹Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW), Laboratório de Materiais e Baixas Temperaturas (LMBT)

1. Introdução

A caracterização magnética de nanodiscos metálicos multicamadas é essencial para o avanço de dispositivos sensoriais de alta precisão, especialmente em aplicações biomédicas voltadas à detecção de biomarcadores. Este estudo tem como **objetivo principal** investigar como a geometria e a composição influenciam a resposta magnética desses sistemas, visando otimizar seu desempenho em sensores baseados em magnetorresistência gigante (GMR). Propriedades como histerese, formação de estados de vórtice, anisotropia de forma e dependência com a temperatura são analisadas em função da variação estrutural, com foco na espessura de ferro e no formato dos discos. A pesquisa também busca comparar experimentalmente e por simulação o comportamento magnético de diferentes amostras, contribuindo para o desenvolvimento de sensores biomagnéticos mais eficientes, sensíveis e acessíveis.

Foram analisados nanodiscos multicamadas compostos por uma sequência simétrica de materiais: $\text{Al}_{50}/\text{Au}_5/\text{Fe}_x/\text{Ti}_5/\text{Fe}_x/\text{Au}_5$, onde x representa a espessura da camada de ferro central (em nm). A variação de x permite controlar a proporção de ferro total na estrutura, ajustando as propriedades magnéticas dos discos. Para fins comparativos, também foi incluída uma amostra de nanodisco circular composta por $\text{Fe}_{100}/\text{Al}_5$, permitindo avaliar o impacto da geometria e da composição na resposta magnética.

As propriedades magnéticas foram determinadas por magnetometria SQUID, revelando variações significativas nas curvas de histerese em função da espessura de ferro. O ferro, devido à sua elevada magnetização de saturação e à capacidade de estabilização de vórtices magnéticos em nanoestruturas, se mostra um material estratégico para otimizar o desempenho desses sistemas, especialmente em resposta a campos alternados.

Para complementar os dados experimentais, foram realizadas simulações micromagnéticas com o software MuMax, que permitiram explorar a dinâmica de reversão da magnetização sob diferentes orientações de campo aplicado. A comparação entre os resultados experimentais e simulados reforça o papel central da geometria e da espessura de ferro na engenharia de respostas magnéticas, destacando o potencial desses sistemas em aplicações nanomagnéticas e biomédicas.

2. Metodologia

Inicialmente, as amostras foram fabricadas por litografia eletrônica, com uma composição simétrica de multicamadas nos nanodiscos. Foram produzidas três amostras com diferentes espessuras da camada de ferro, seguindo a estrutura: $\text{Al}_{50}/\text{Au}_5/\text{Fe}_x/\text{Ti}_5/\text{Fe}_x/\text{Au}_5$, em que $x = 25, 50$ e 100 nm. Além disso, foi incluída uma amostra de geometria circular com composição $\text{Fe}_{100}/\text{Al}_5$.

A morfologia das amostras foi analisada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando tanto o modo de elétrons retroespalhados quanto secundários. A Figura 1 mostra, como exemplo, a imagem da amostra com $x = 25$ nm, na qual se evidencia a simetria e a distribuição uniforme das elipses.

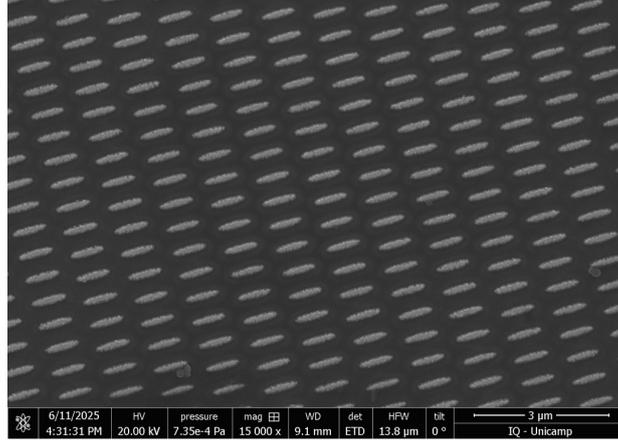


Figura 1: Imagem de MEV da amostra Fe25.

Posteriormente, as propriedades magnéticas das amostras foram caracterizadas por meio de magnetometria SQUID. Foram obtidas curvas de histerese da magnetização em função do campo aplicado, em diferentes temperaturas. Esses dados permitiram não apenas uma comparação entre as amostras, como também a análise da influência da temperatura sobre suas propriedades magnéticas.

Finalmente, realizaram-se simulações micromagnéticas com o software MuMax3, que além de complementarem os dados experimentais, permitiram estudar a influência da orientação do campo externo na reversão da magnetização.

3. Resultados e Discussão

Como mostrado na Figura 2, as curvas de histerese revelam uma transição gradual de uma configuração em vórtice (Fe_{25}) para um estado magnético monodomínio (Fe_{100}) com o aumento da espessura da camada de ferro. Como demonstrado na Tabela 1, essa transição é refletida principalmente pelo aumento da magnetização de saturação (M_s), que praticamente dobra de Fe_{25} para Fe_{50} e novamente até Fe_{100} , indicando maior contribuição dos momentos magnéticos.

A magnetização remanescente (M_r) também cresce, especialmente entre Fe_{50} e Fe_{100} , sugerindo maior alinhamento e estabilidade magnética. Já os valores de coercividade (H_c) mantêm-se relativamente constantes, indicando que a reversibilidade do processo de magnetização não varia significativamente com a espessura.

Esses resultados reforçam o papel da espessura na evolução das propriedades magnéticas, evidenciando a transição de um regime dominado por flutuações térmicas e estruturas não uniformes para uma configuração magneticamente mais rígida e estável.

Tabela 1: Comparação das propriedades magnéticas das amostras Fe₂₅, Fe₅₀ e Fe₁₀₀ a 300 K / 2 K.

Propriedade	Fe ₂₅	Fe ₅₀	Fe ₁₀₀
Coercividade (H_c)	$\pm 0,06$ / $\pm 0,11$ kOe	$\pm 0,06$ / $\pm 0,11$ kOe	$\pm 0,05$ / $\pm 0,13$ kOe
Magnetização remanente (M_r)	130 / 210 μemu	130 / 210 μemu	250 / 400 μemu
Magnetização de saturação (M_s)	470 / 470 μemu	600 / 600 μemu	1100 / 1100 μemu

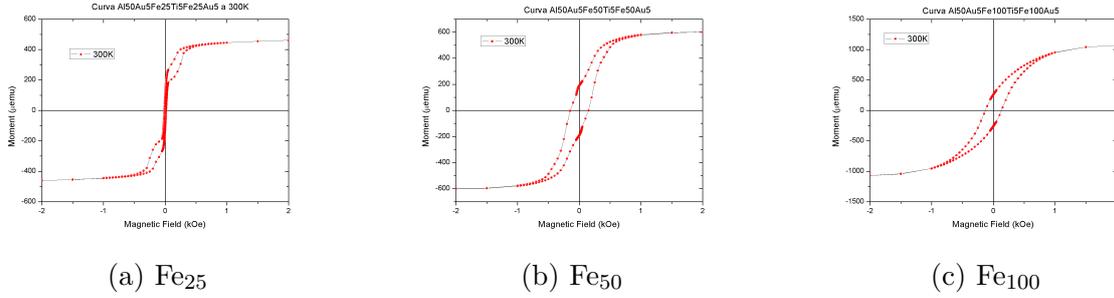


Figura 2: Curvas de histerese para as amostras Fe₂₅, Fe₅₀ e Fe₁₀₀ a 300 K.

Quanto a anisotropia de forma, a Figura 3 mostra representações esquemáticas da orientação preferencial da magnetização em nanodiscos com diferentes geometrias. A anisotropia de forma do disco elipsoidal favorece o alinhamento ao longo do eixo maior, o que se reflete em uma curva de histerese mais suave e com maior coercividade. Já a amostra circular, apesar de apresentar composição distinta, exibiu uma curva semelhante à da amostra multicamada com 100 nm de ferro, com significativa remanência, o que indica uma configuração magneticamente mais rígida, não compatível com a presença dominante de vórtices. Esses resultados destacam o papel da geometria no processo de magnetização, embora diferenças de composição impeçam conclusões definitivas.

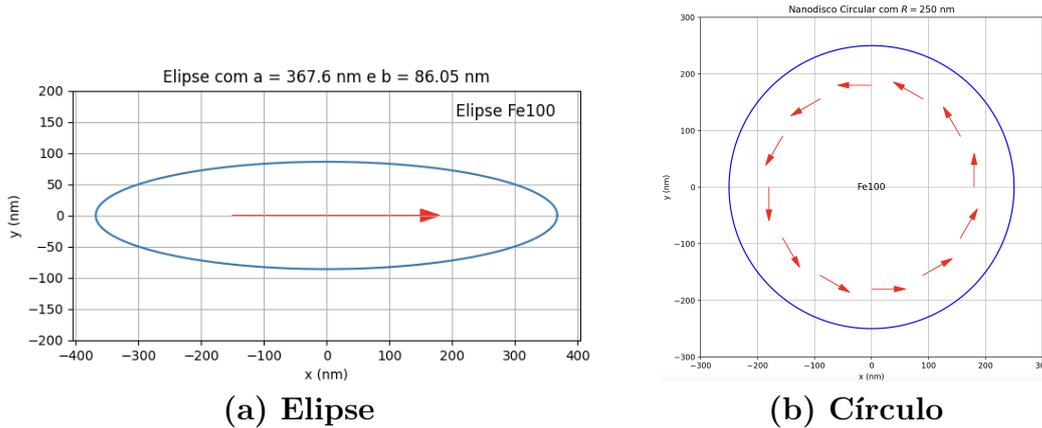


Figura 3: Representações esquemáticas da orientação preferencial da magnetização em nanodiscos com diferentes geometrias.

Finalmente, as simulações micromagnéticas permitiram uma análise detalhada da evolução dos momentos magnéticos durante a reversão da magnetização, esclarecendo os mecanismos responsáveis pelas curvas de histerese (Figura 5). Foram realizadas simulações da amostra Fe₂₅ sob a aplicação de um campo externo orientado em três ângulos distintos: 0°, 45° e 90° em relação ao eixo x , conforme ilustrado na Figura 4. Para $\theta = 0^\circ$, a reversão ocorre de forma

coerente e abrupta, com realinhamento coletivo dos momentos magnéticos. Já para $\theta = 90^\circ$, o processo é mais gradual e não coerente, com formação de domínios intermediários e transições suaves. A estrutura simulada possui geometria elipsoidal, como mostrado na figura.

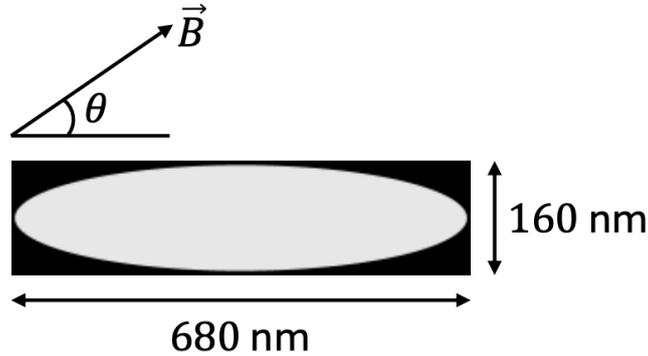


Figura 4: Esquema representativo da amostra circular de Fe_{25} sob a aplicação de um campo magnético externo em um ângulo θ em relação ao eixo x . As dimensões do nanodisco também estão indicadas na imagem.

O caso mais complexo e interessante é o do campo aplicado em $\theta = 45^\circ$, onde a curva de histerese apresenta “degraus”, indicando que a reversão não ocorre de forma totalmente coerente, mas sim por propagação sucessiva de pequenos domínios magnéticos. Essa orientação intermediária quebra a simetria da anisotropia de forma, promovendo um processo de reversão mais gradual e energeticamente complexo, que é o que melhor reproduz o comportamento experimental observado.

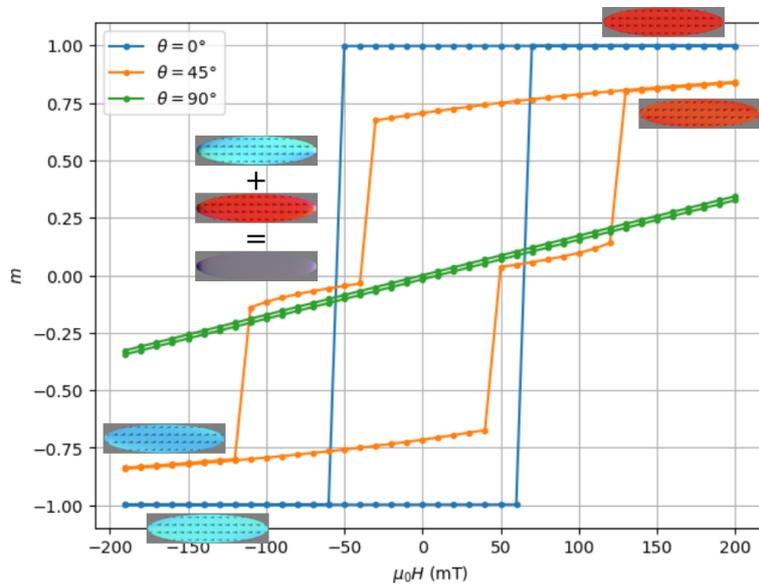


Figura 5: Curvas de histerese simuladas para diferentes ângulos θ do campo aplicado, sobrepostas. Figuras em pontos específicos indicam a configuração dos momentos magnéticos durante a reversão.

Além disso, as simulações do estado de mínima energia, obtido após relaxação sem campo externo, mostram que os momentos magnéticos se organizam em estruturas tipo vórtices nas extremidades ao longo do eixo maior do nanodisco elíptico. Essa configuração, associada à anisotropia de forma, minimiza a energia magnetostática e pode envolver um padrão Vórtice-Antivórtice-Vórtice (VAV), contribuindo para a estabilidade magnética da amostra (Figura 6).



Figura 6: Configuração de mínima energia após relaxação, evidenciando a formação de estruturas tipo vórtices nas extremidades do nanodisco elíptico ao longo do eixo maior.

5. Conclusão

Este trabalho analisou nanodiscos multicamadas voltados para sensores biomagnéticos na detecção de biomarcadores. Ainda se investiga qual espessura de ferro é mais adequada: Fe_{25} apresenta quase ausência de campo remanescente, o que reduz a tendência à aglomeração, mas é menos estável magneticamente; já Fe_{100} oferece maior estabilidade, com magnetização de saturação mais elevada. Amostras elipsoidais mostraram resposta ajustável e baixa coercividade, favorecendo a seletividade. As camadas externas de Al e Au permitem funcionalização química, mantendo o desempenho magnético em temperatura fisiológica. Os resultados destacam a importância do controle geométrico e composicional no desenvolvimento de sensores biomédicos eficientes.

Referências

- [1] Aharoni, A. *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. 2nd ed., Oxford University Press, 2000.
- [2] Osborn, J. A. Demagnetizing Factors of the General Ellipsoid. *Physical Review*, **67**(11–12), 351–357 (1945). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.67.351>
- [3] Novais, É. R. P. *Influência da Anisotropia Perpendicular em Nanopontos Magnéticos*. Tese de Doutorado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), 2010.
- [4] M. Knobel, *Partículas finas: superparamagnetismo e magnetoresistência gigante*, Revista Brasileira de Ensino de Física, **22** (3), 335–346 (2000).
- [5] B. D. Cullity e C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*, 2^a ed., IEEE Press / Wiley, 2011.
- [6] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, F. García-Sánchez, B. Van Waeyenberge, *The design and verification of MuMax³*, AIP Advances **4**, 107133 (2014).
- [7] J. T. S. Dantas, *Vórtices em nanoestruturas magnéticas elípticas*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Física Teórica e Experimental (2017).
- [8] Bakonyi, I. and Péter, L. *Magnetoresistance*. In: ScienceDirect Topics. Elsevier. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/magnetoresistance>.
- [9] Mills, A. M.; Strzalka, J.; Bernat, A.; Rao, Q.; Hallinan, D. T. *Magnetic-core/gold-shell nanoparticles for the detection of hydrophobic chemical contaminants*. Nanomaterials (Basel, Switzerland), 7 abr. 2022. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9027997/>.