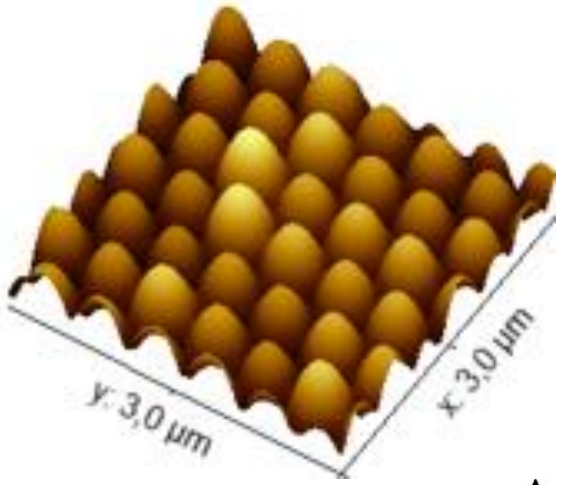
Projeto: Estabilização e dinâmica de skyrmions

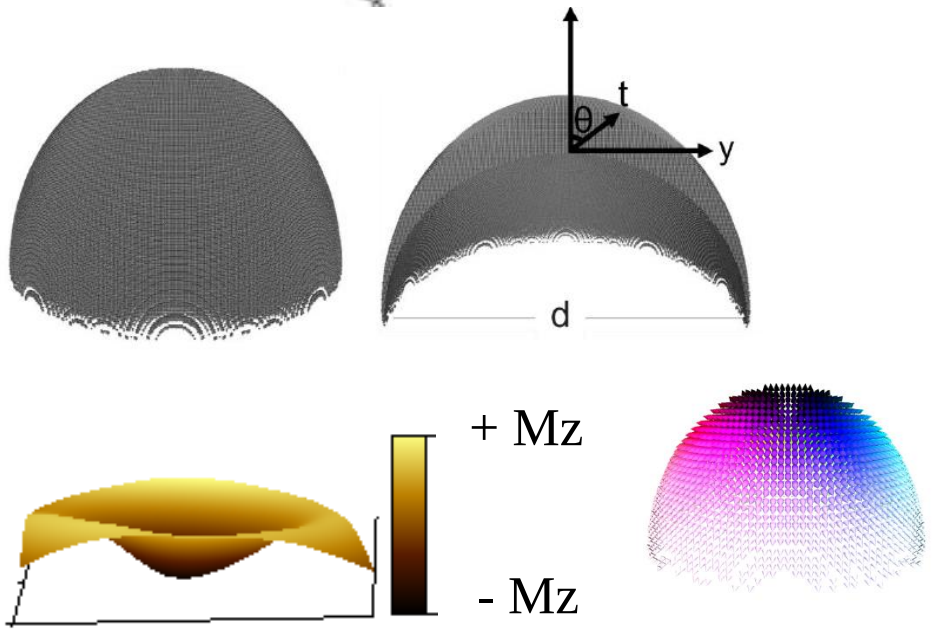
Programa de Capacitação Institucional (PCI –DB)

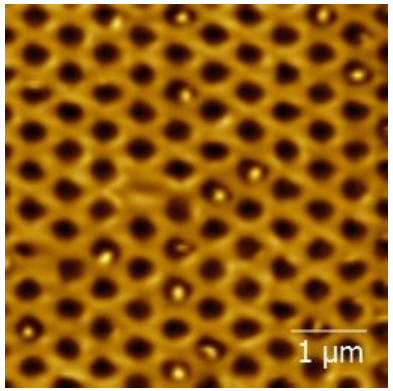


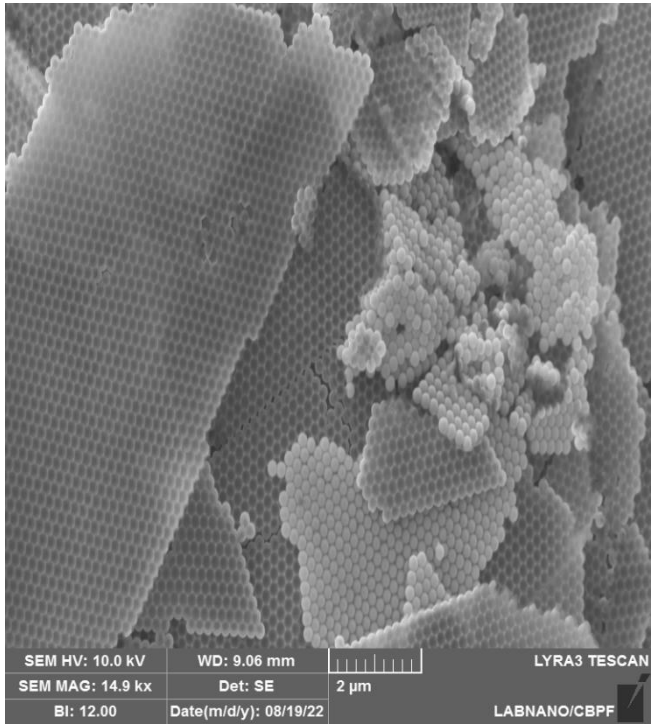
Estabilização de domínios magnéticos e skyrmions em µ-membranas corrugadas

Danian Alexandre Dugato

Flávio Garcia







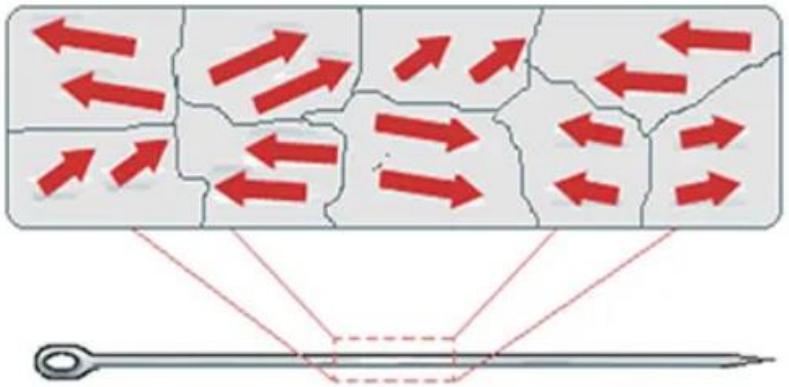
22 de Novembro de 2022

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Esboço

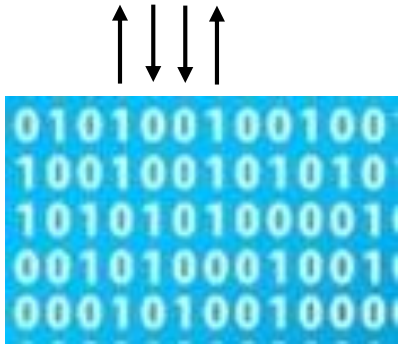
- Domínios magnéticos e skyrmions;
- Aplicações;
- Problemas/Questões abertas;
- Proposta;
- Resultados (VSM, AFM, MFM, MEV, MET);
- Conclusão;
- Perspectivas;

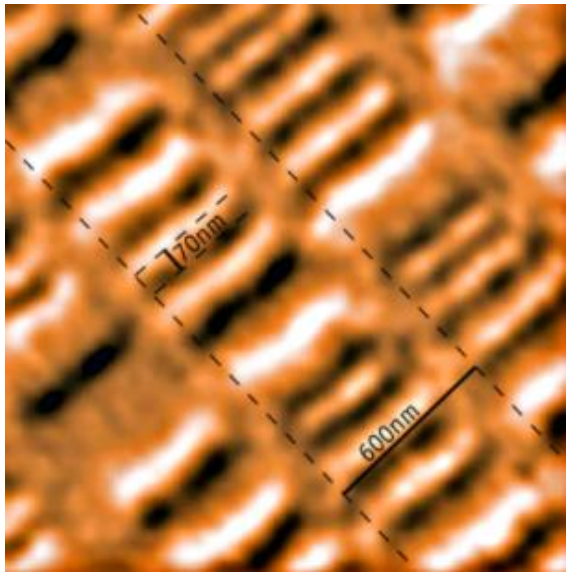
Domínios magnéticos (convencionais)



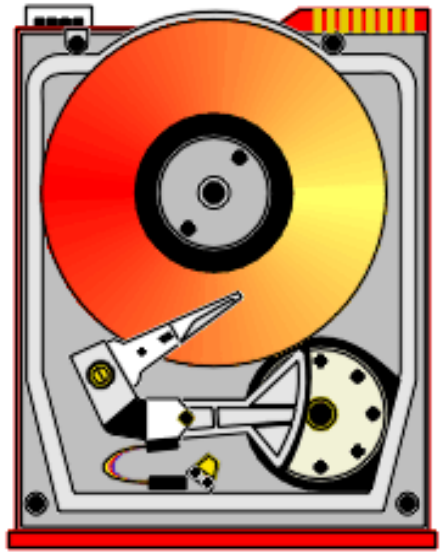
Campo magnético

Disco rígido (HD) – gravação magnética



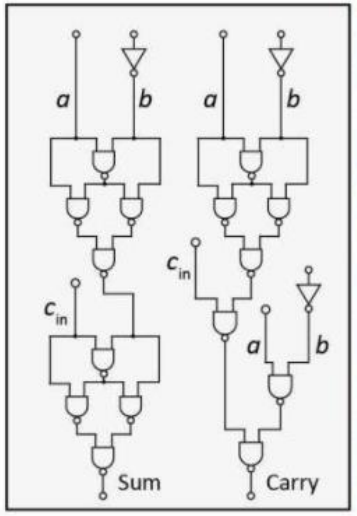


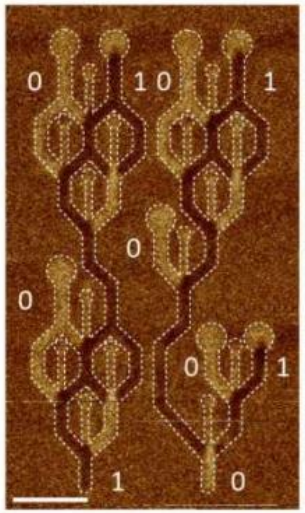
Nanosurf



Gifmania

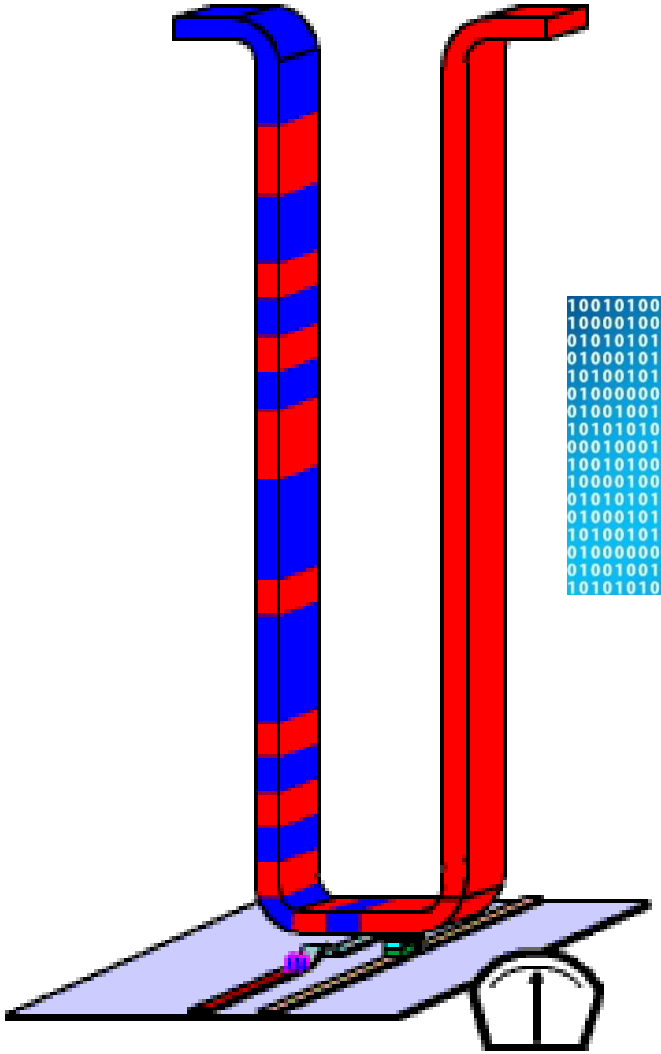
Portas lógicas





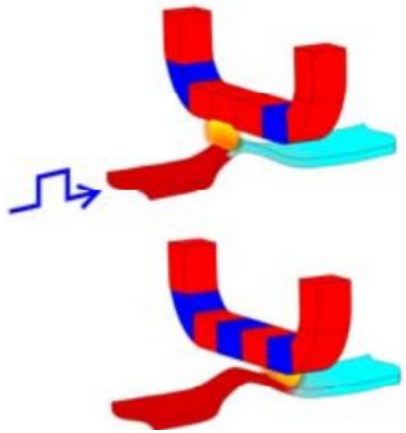
Nature **579**, 214 (2020)

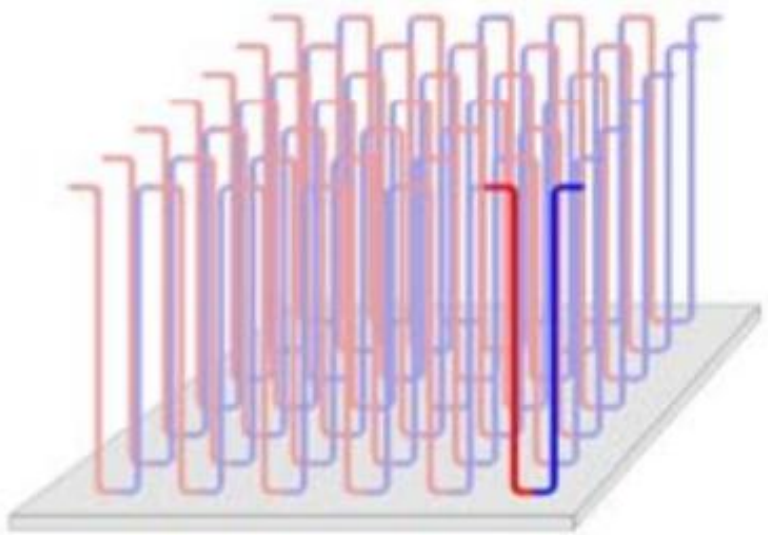
”Racetrack memory”



Science **320** 5873, 190 (2008)

Escrita

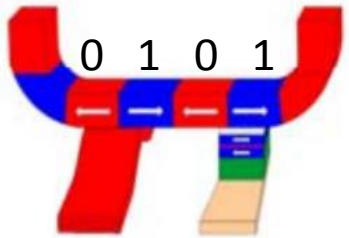




Maximização do espaço

Aumento ~1000 X na capacidade de armazenamento de informações

Leitura

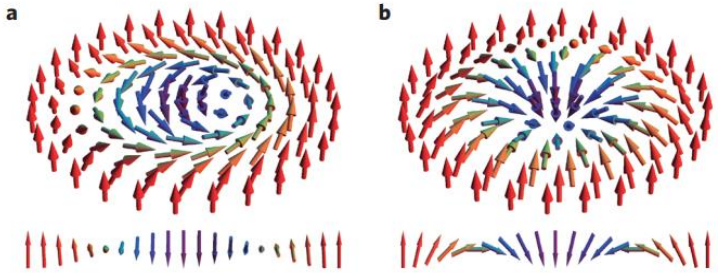


A ideia não funcionou com domínios magnéticos convencionais.

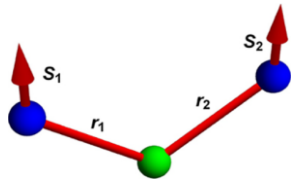
Skyrmions são a solução?

Domínio magnético;

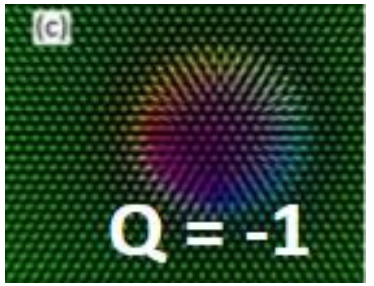
Estrutura quiral;



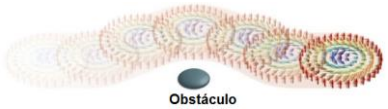
Bloch Néel



Interação Dzyaloshinskii-Moriya



Physical Review B **95**(9):094423 (2017)

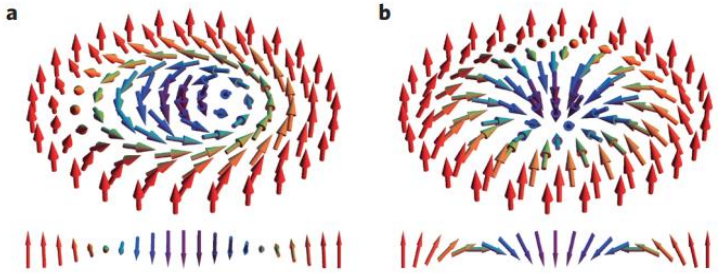


- **Imune a defeitos;**
- **Uma das menores estruturas magnéticas;**
- **Estáveis a temperatura ambiente;**
- **Movimentados com baixa densidade de corrente;**

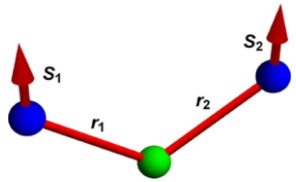
Skyrmions são a solução?

Domínio magnético;

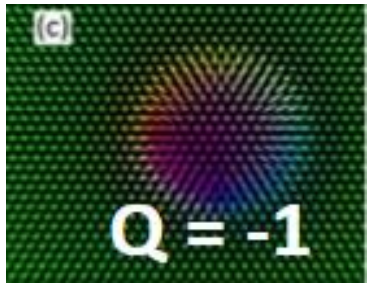
Estrutura quiral;



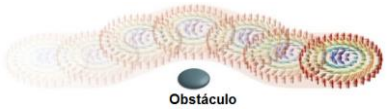
Bloch Néel



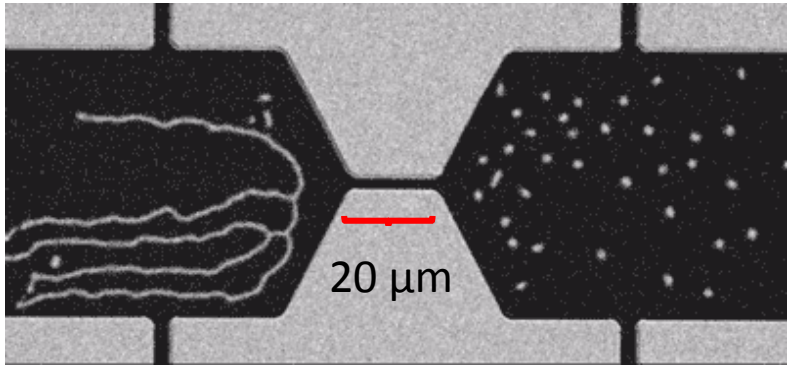
Interação Dzyaloshinskii-Moriya



Physical Review B **95**(9):094423 (2017)

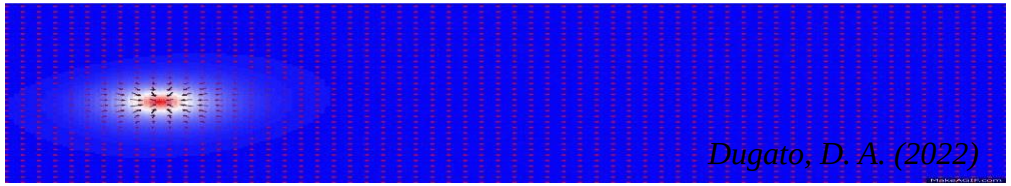


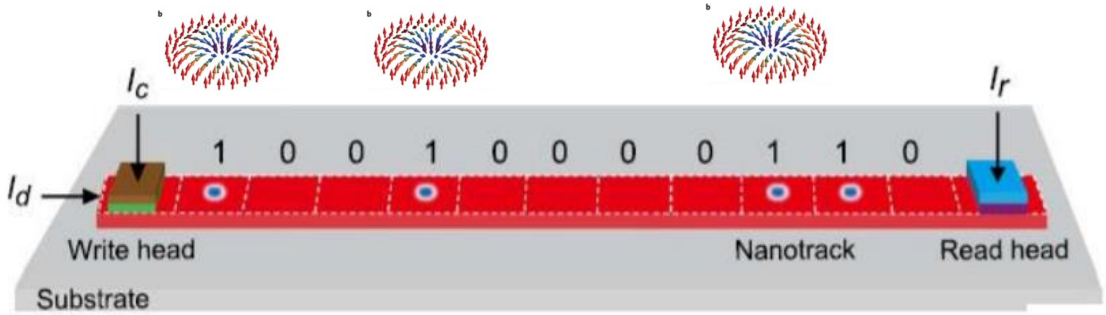
- **Imune a defeitos;**
- **Uma das menores estruturas magnéticas;**
- **Estáveis a temperatura ambiente;**
- **Movimentados com baixa densidade de corrente;**



Science **349,** 6245 283 (2015)

Jc = 10^{5} A/cm^{2}



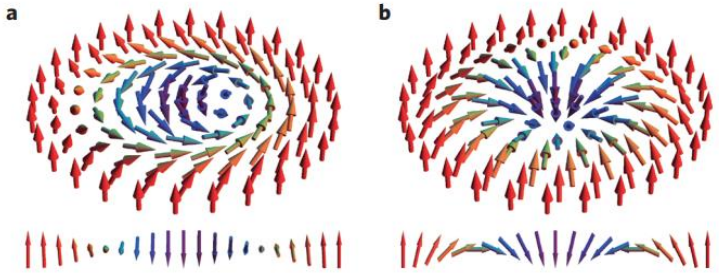


IEE EXplore 104, 2040 (2016)

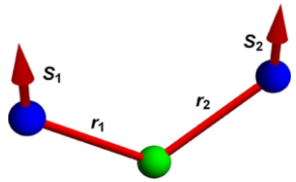
Skyrmions são a solução?

Domínio magnético;

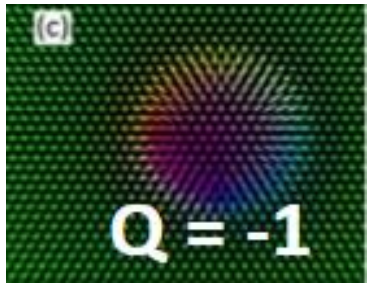
Estrutura quiral;



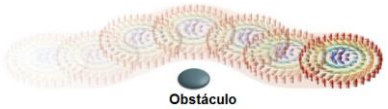
Bloch Néel



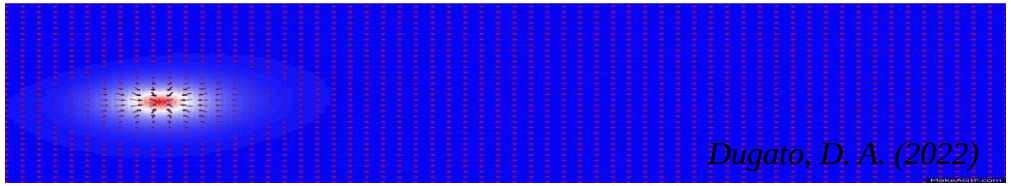
Interação Dzyaloshinskii-Moriya

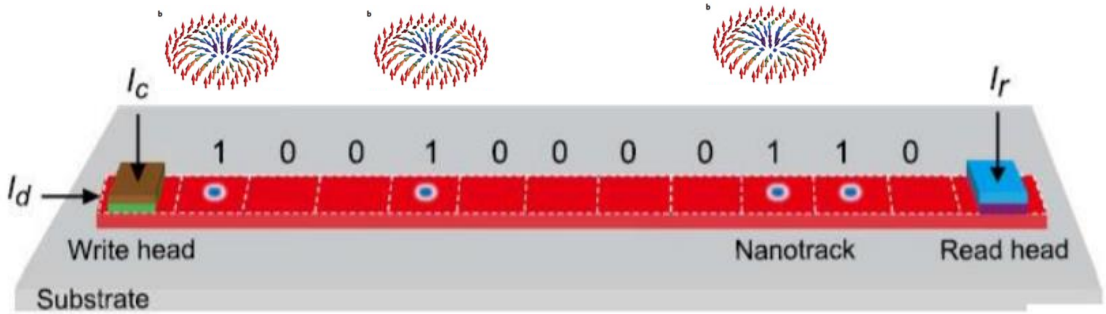


Physical Review B **95**(9):094423 (2017)

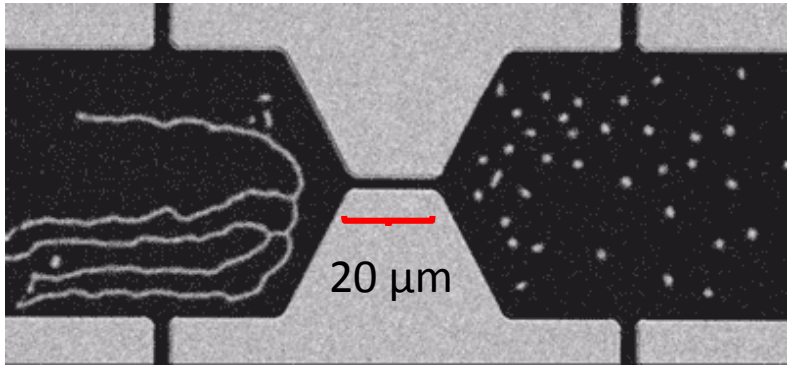


- **Imune a defeitos;**
- **Uma das menores estruturas magnéticas;**
- **Estáveis a temperatura ambiente;**
- **Movimentados com baixa densidade de corrente;**





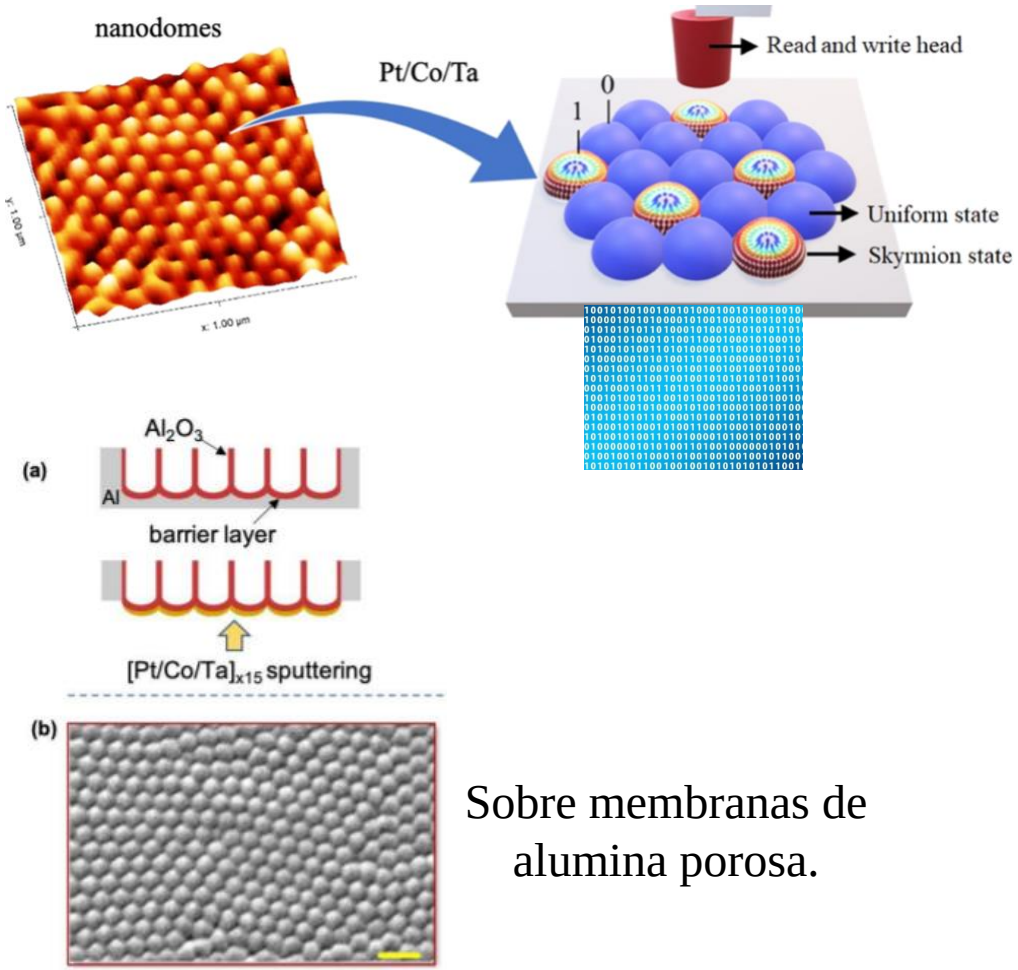
IEE EXplore 104, 2040 (2016)



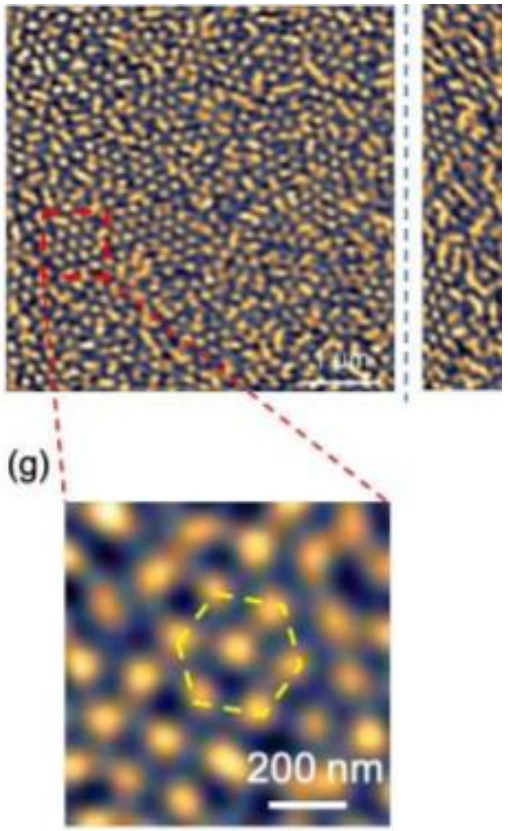
Science **349,** 6245 283 (2015)

Jc = 10^{5} A/cm^{2}

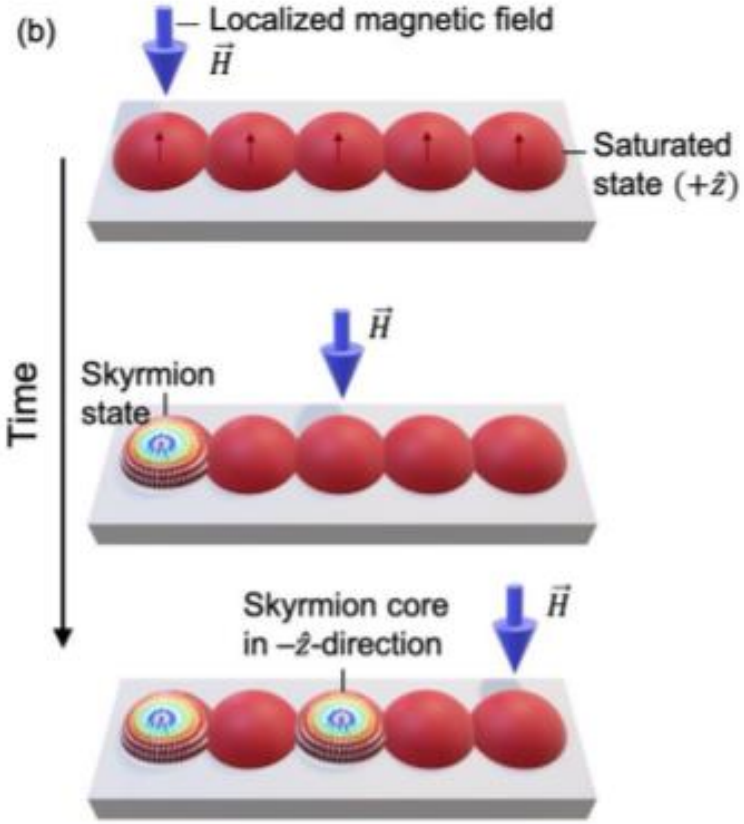
Rede hexagonal de skyrmions < 100 nm



Sobre membranas de alumina porosa.



Skyrmions nanométricos < 100 nm



* Gravação magnética de alta densidade.
* Redes de nanosciladores

ACS Appl. Mater. Interfaces 12 , 47 , 53454 (2020)

Problemas/Questões abertas

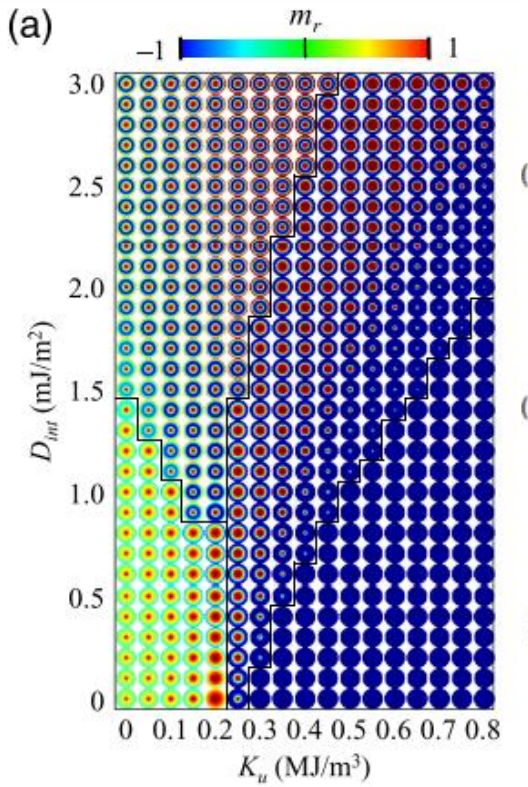
- Maior densidade de domínios magnéticos.
- Skyrmions em condições simples (campo magnético nulo).
- Alta densidade de skyrmions/skyrmions nanométricos (gravação magnética);
- Rede hexagonal de skyrmions nanométricos;
- Skyrmions pontuais (localizados, organizados);
- Filmes autossustentáveis (sem substrato);

Problemas/Questões abertas

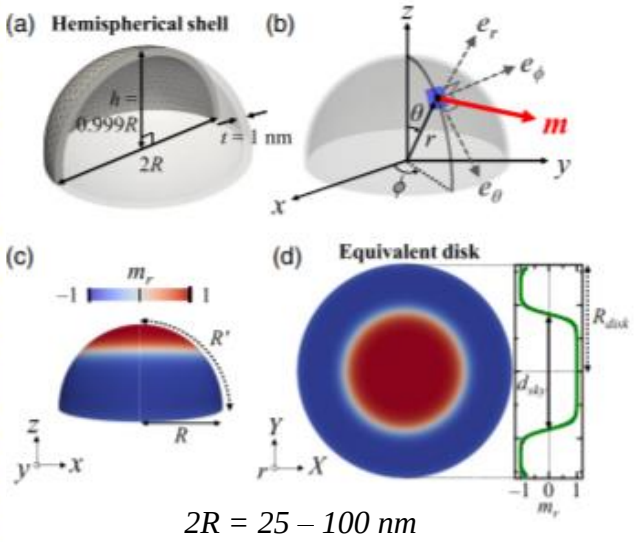
- Maior densidade de domínios magnéticos.
- Skyrmions em condições simples (campo magnético nulo).
- Alta densidade de skyrmions/skyrmions nanométricos (gravação magnética);
- Rede hexagonal de skyrmions nanométricos;
- Skyrmions pontuais (localizados, organizados);
- Filmes autossustentáveis (sem substrato);

Proposta

Explorar o efeito de curvatura para obter domínios magnéticos e skyrmions mais promissores para aplicações em dispositivos de spintrônica (gravação magnética, nanosciladores, etc.) buscando a formação de amostras autossustentáveis.



Simulado



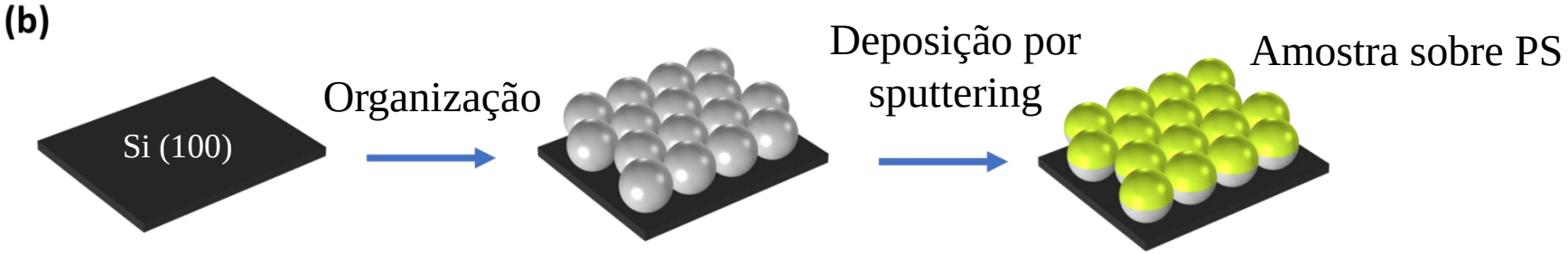
2R = 25 – 100 nm

Substrato curvado quebra a simetria e induz interação DM.

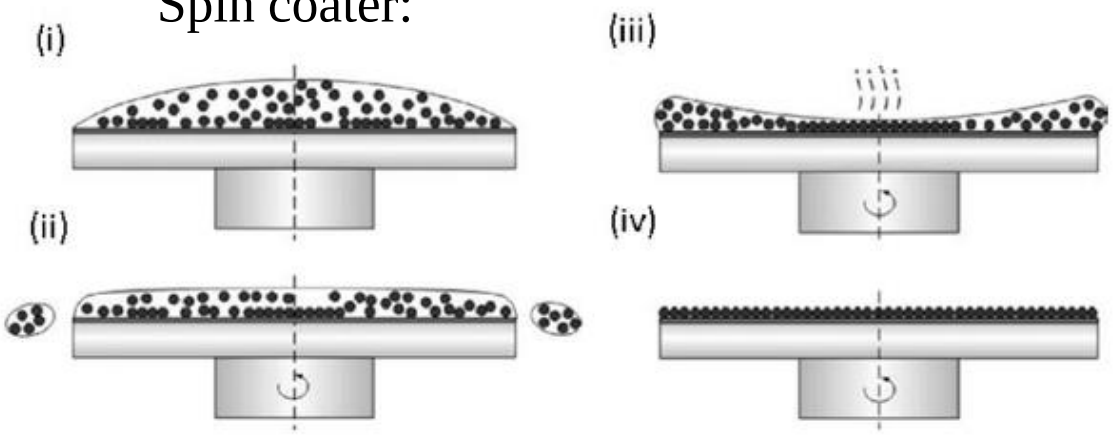
Mudaremos a anisotropia magnética perpendicular (K_u).

PHYSICAL REVIEW B **104**, 134427 (2021)

Preparação das amostras sobre esferas de poliestireno (PS)



Spin coater:



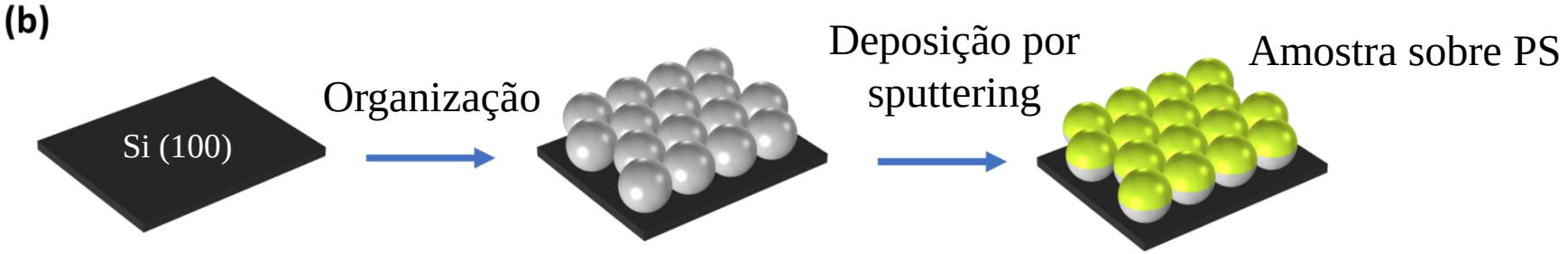
J. Chen et al., Appl. Surf. Sci., 270, 6-15 (2013).

- Concentração;
- Aceleração;
- Velocidade;

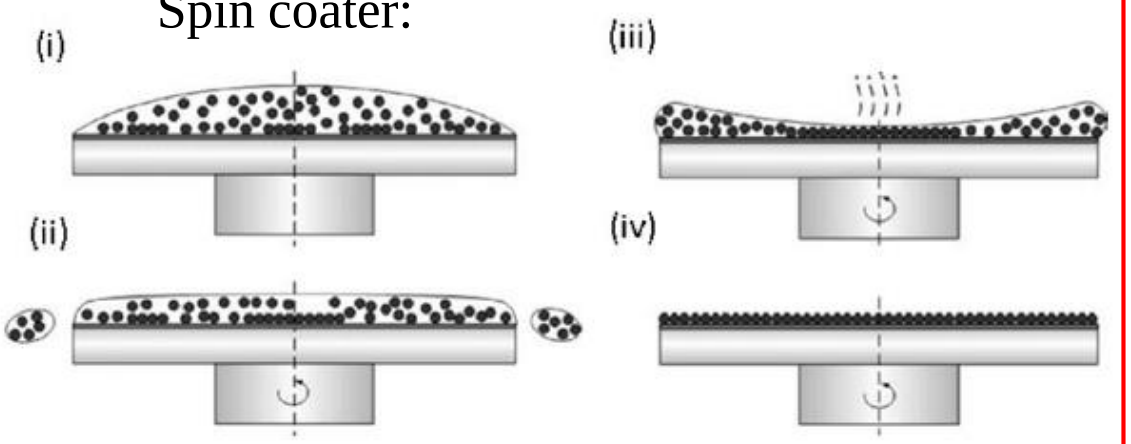
<u>Encontrar a melhor receita.</u>

Jalil, W.; Dugato, D.; Almeida, T.; Garcia, F. Em revisão. (2022)

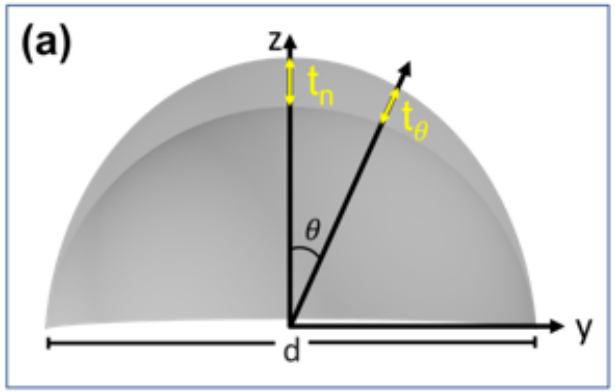
Preparação das amostras sobre esferas de poliestireno (PS)



Spin coater:



J. Chen et al., Appl. Surf. Sci., 270, 6-15 (2013).



*Amostra curvada;

*Gradiente de espessura (nominal = t_n)

- Concentração;
- Aceleração;
- Velocidade;

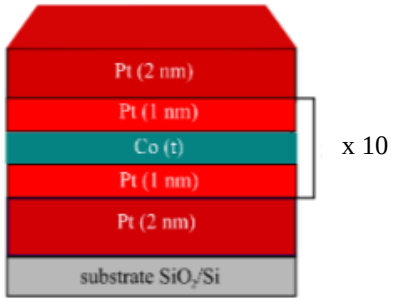
Encontrar a melhor receita.

Quais amostras?

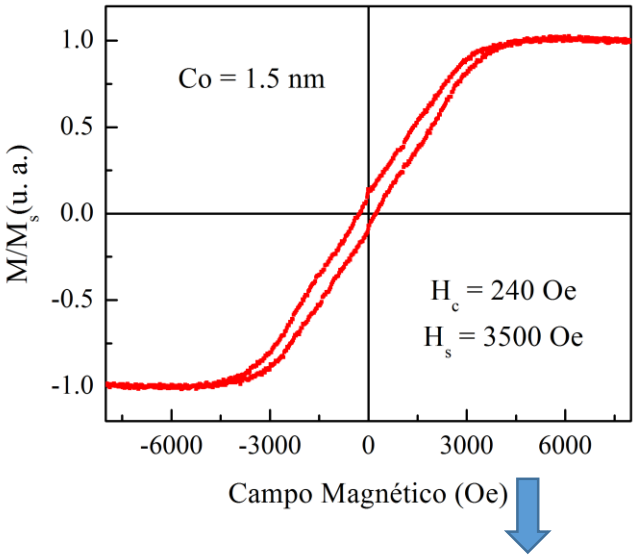
Jalil, W.; Dugato, D.; Almeida, T.; Garcia, F. Em revisão. (2022)

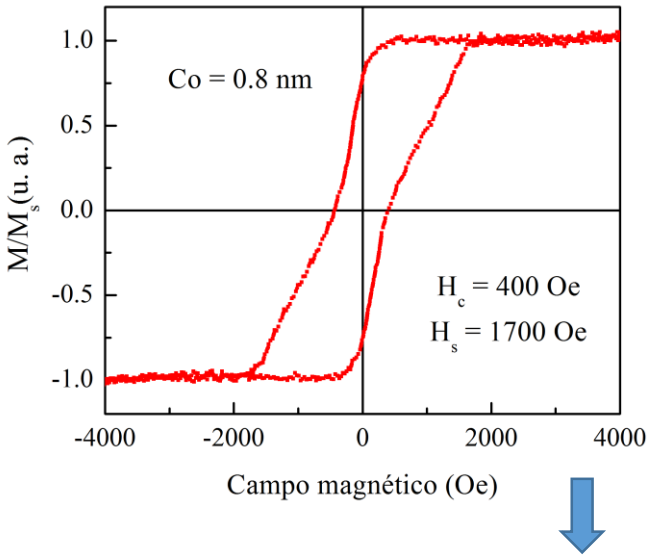
Ajustando a anisotropia magnética perpendicular (K_u) em amostras planas (Si 100)

Estrutura das amostras:



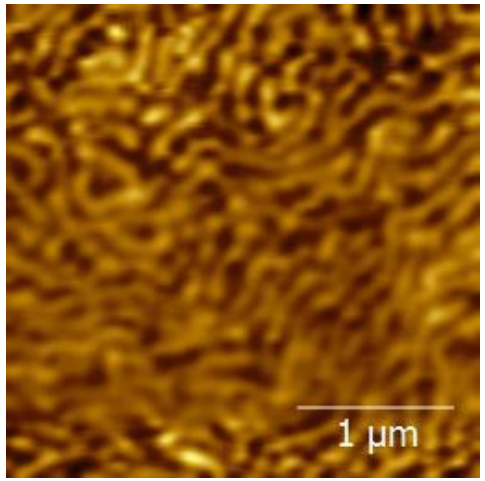
Campo magnético perpendicular a amostra



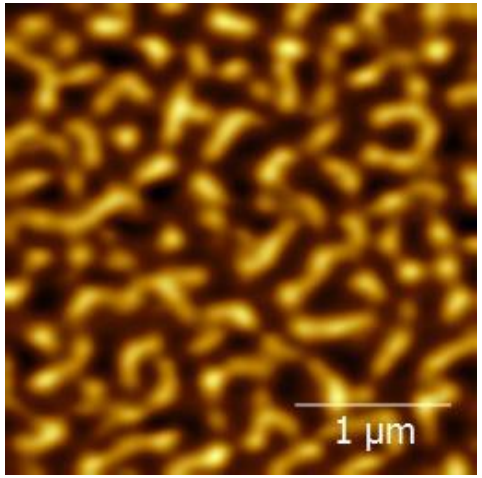


Variando a espessura do Co.

Como visto no diagrama anterior a formação dos domínios depende de K_u.



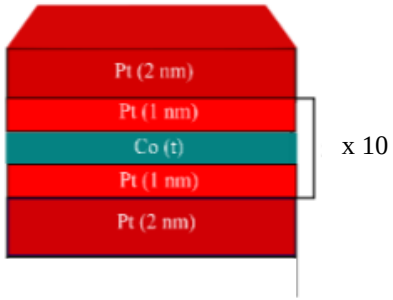
Microscopia de força magnética (MFM):

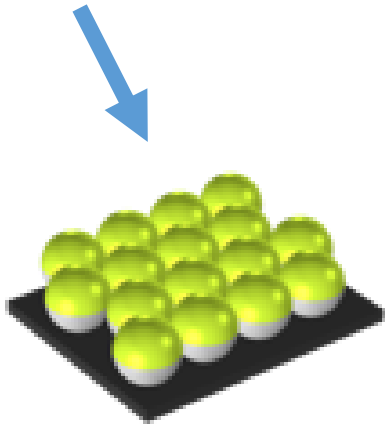


Diferentes tamanhos de domínios magnéticos.

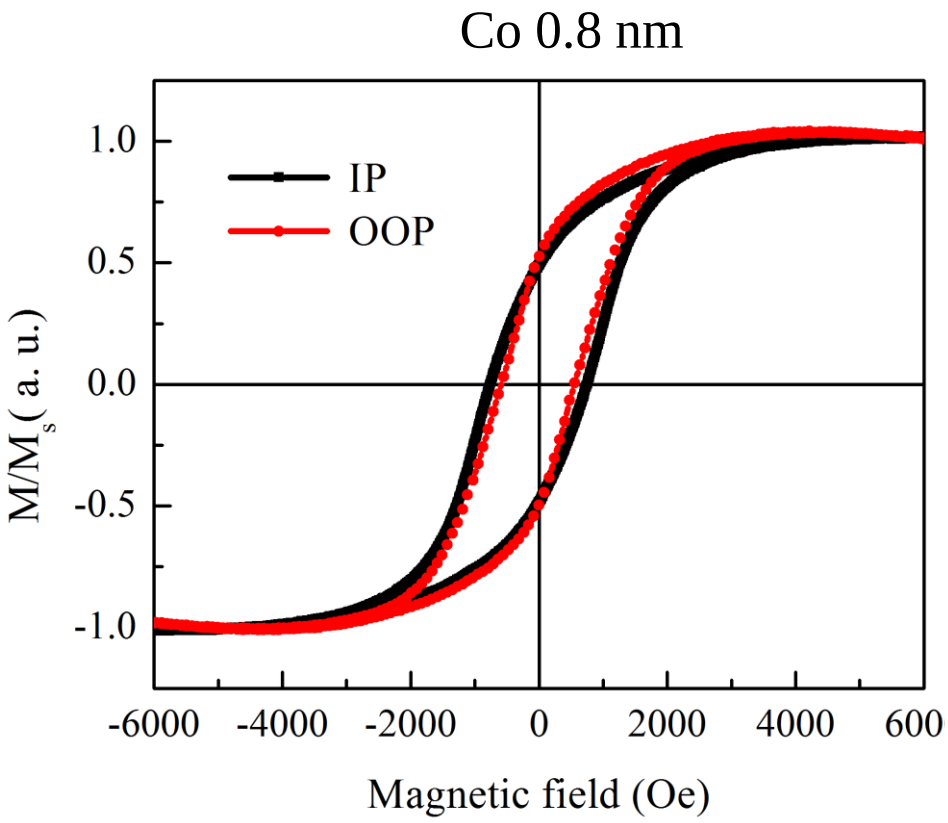
E sobre as esferas?

Multicamadas Pt/Co/Pt sobre esferas de poliestireno de 500 nm

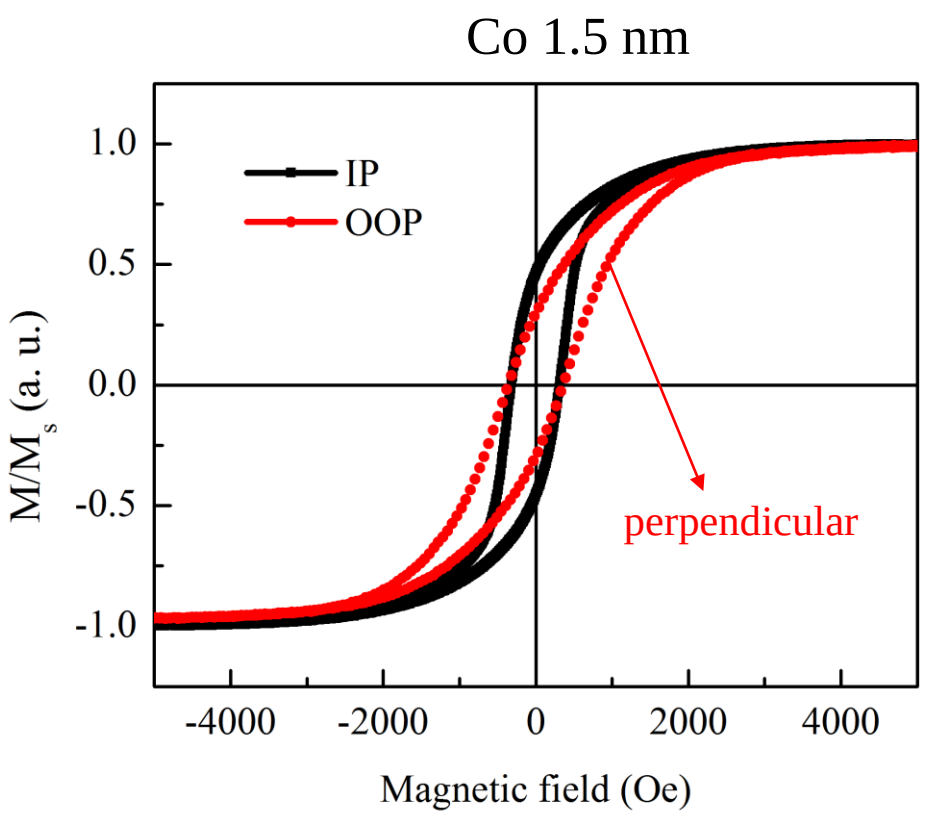




Esferas de poliestireno (PS) 500 nm



Conseguimos ajustar a PMA sobre as esferas! (menos significativamente)

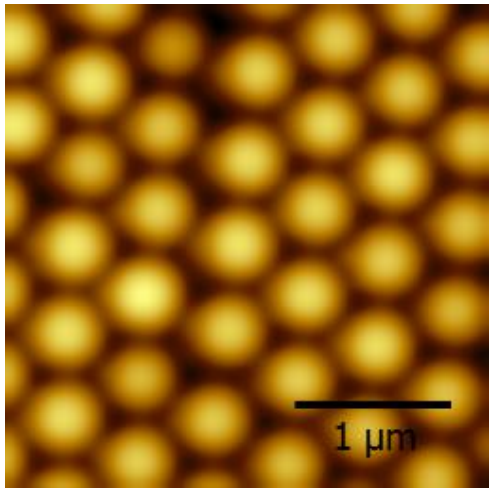


Como estão organizadas as esferas?

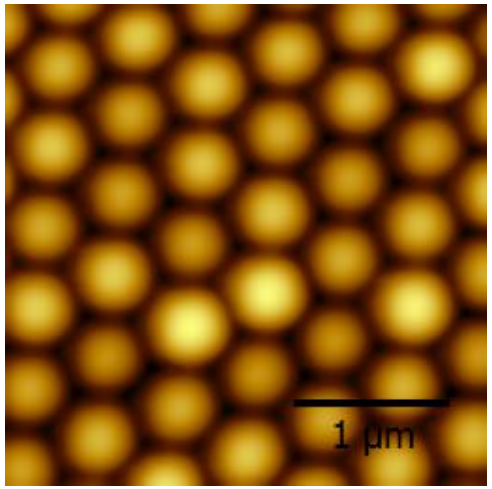
Multicamadas Pt/Co/Pt sobre esferas de poliestireno de 500 nm

Microscopia de força atômica:

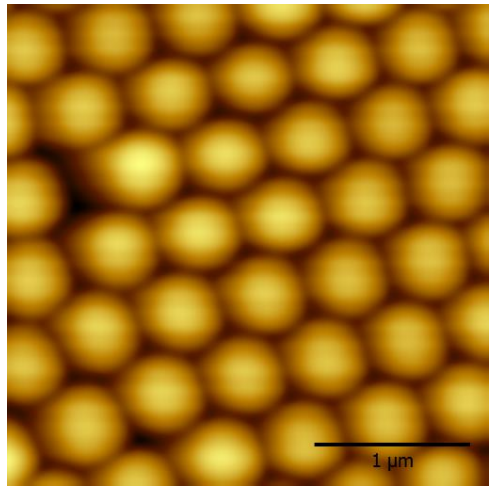
Co 1.5 nm



Co 1.0 nm



Co 0.8 nm

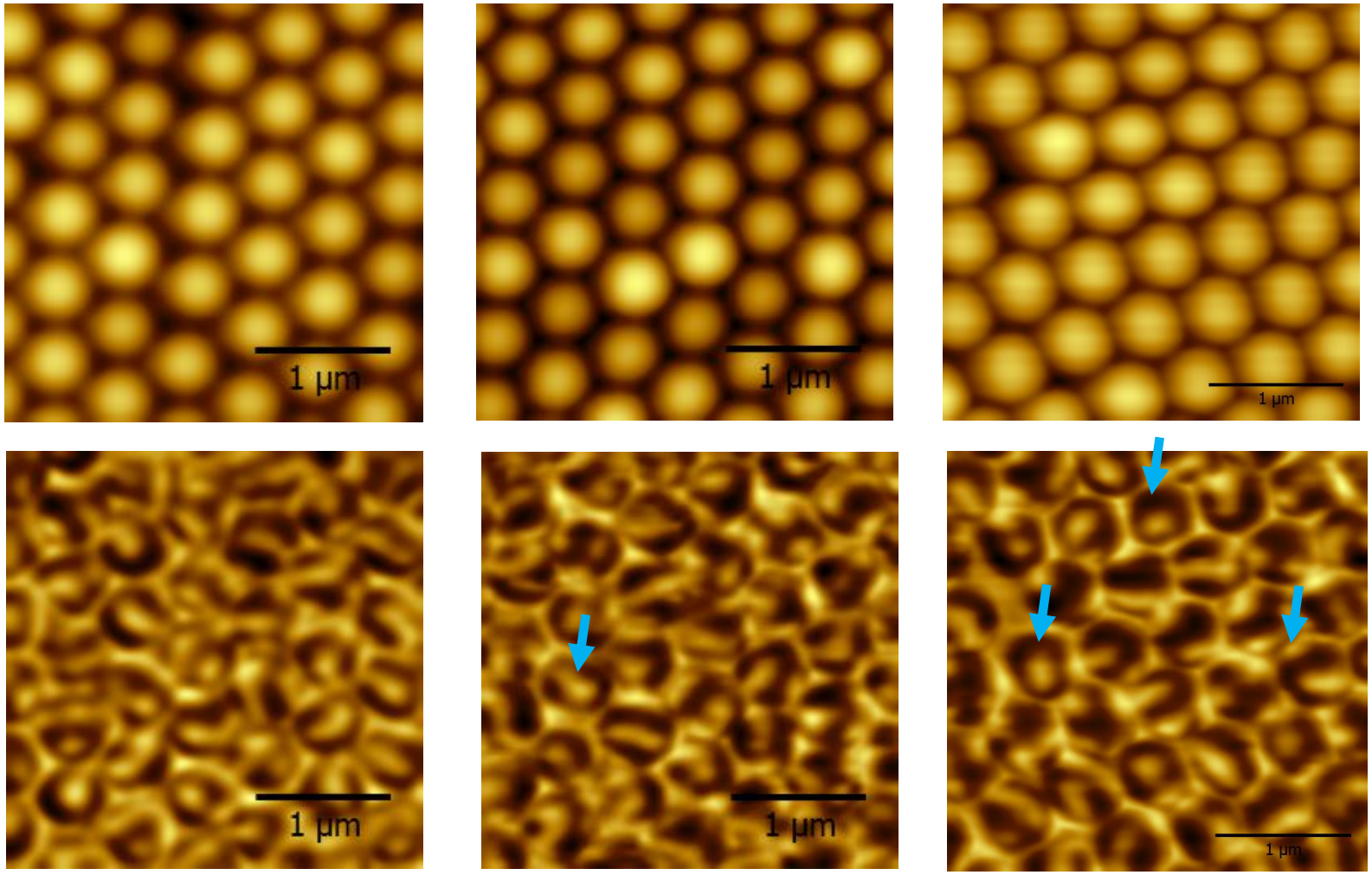


Esferas bem organizadas.

Multicamadas Pt/Co/Pt sobre esferas de poliestireno de 500 nm

Microscopia de força atômica:

Co 1.5 nm | Co 1.0 nm | Co 0.8 nm



Esferas bem organizadas.

Domínios magnéticos em posições específicas (sobre as esferas)

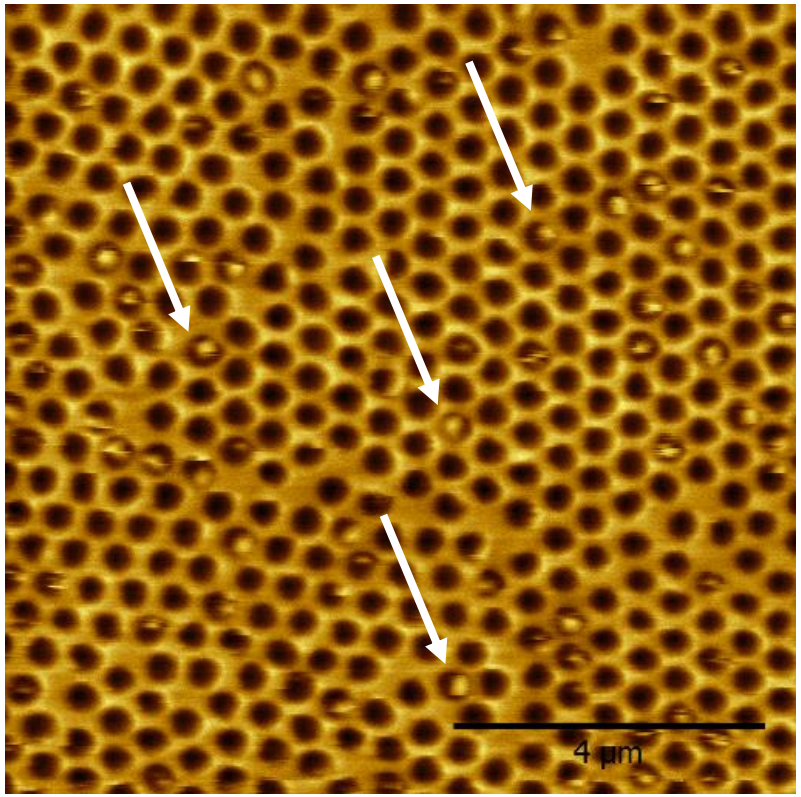
Domínios mistos.

Alguns skyrmions (azul)

Microscopia de força magnética

PS 500 nm – Co 2.0 nm

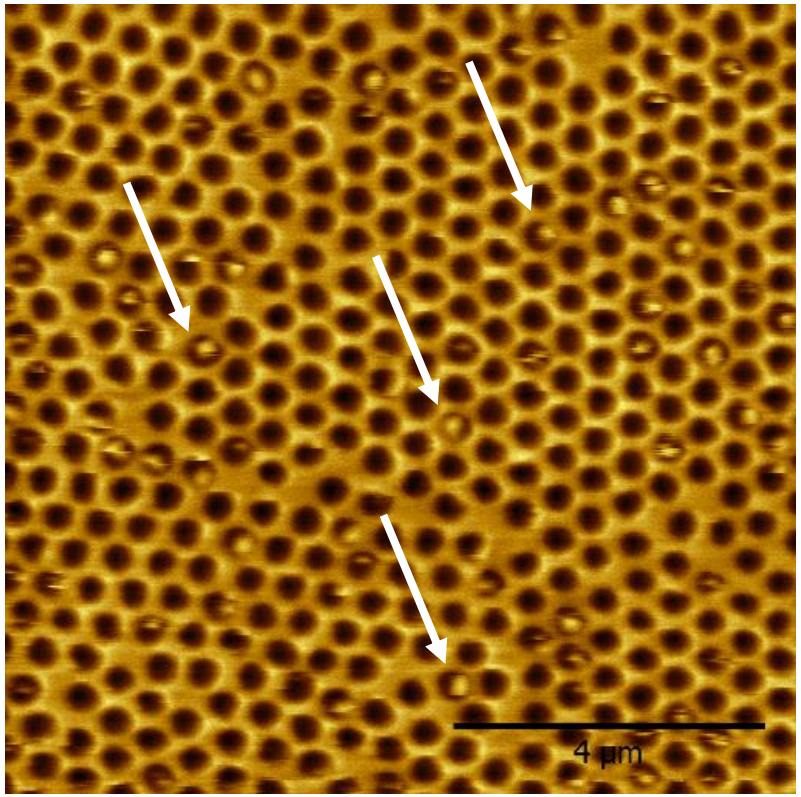
Microscopia de força magnética (MFM)



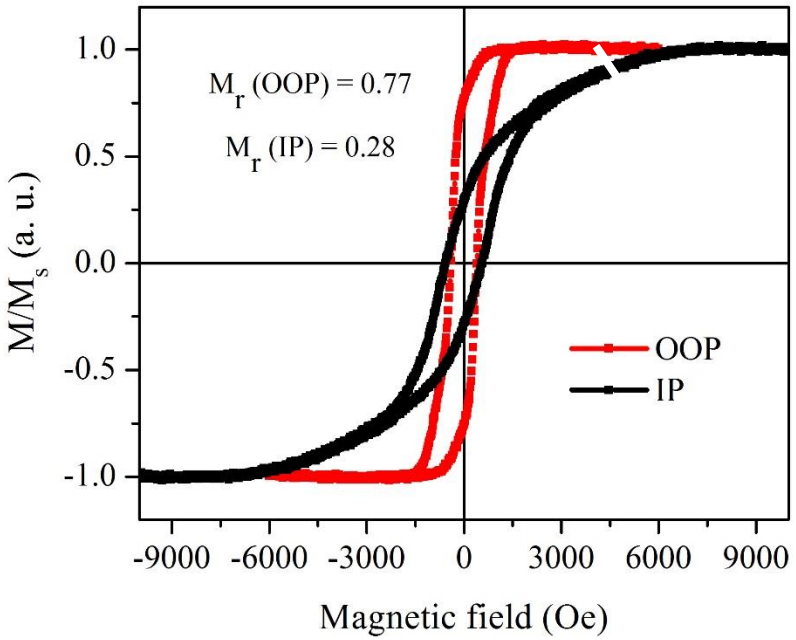
Monodomínios = escuros
Alguns domínios claro sobre as esferas

PS 500 nm – Co 2.0 nm

Microscopia de força magnética (MFM)



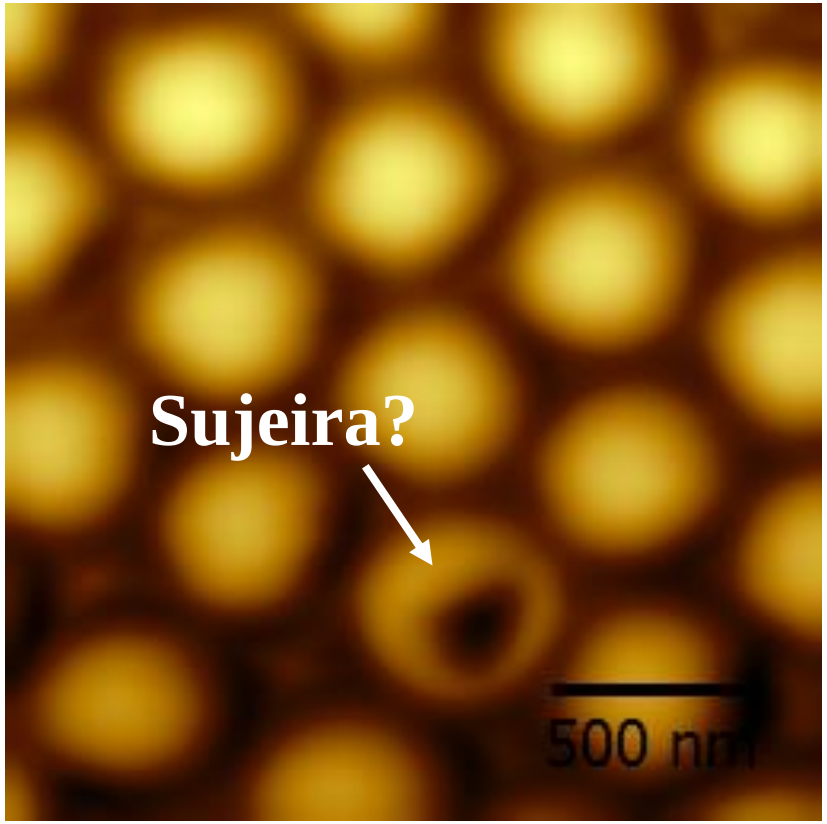
Monodomínios = escuros
Alguns domínios claro sobre as esferas



Mudança mais significativa na anisotropia magnética.

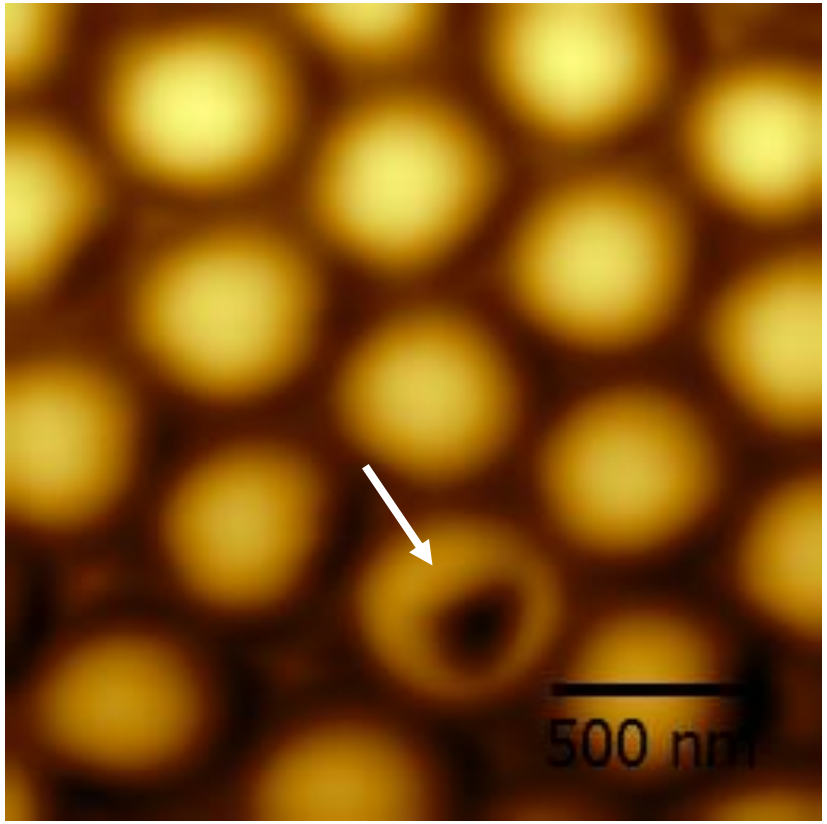
Podem ser artefatos topográficos?

PS 500 nm – Co 2.0 nm

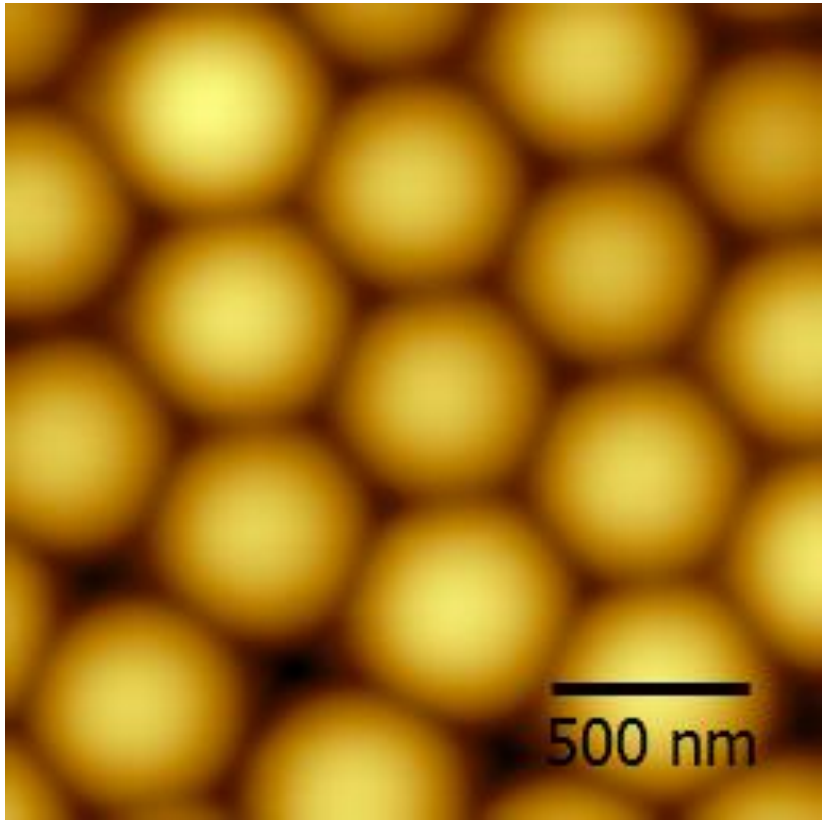


MFM

PS 500 nm – Co 2.0 nm

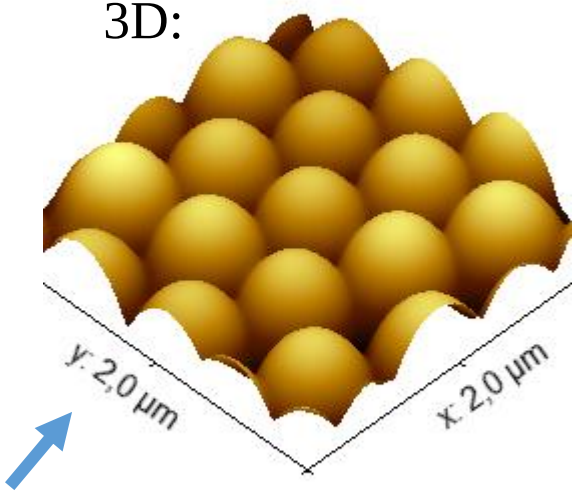


MFM



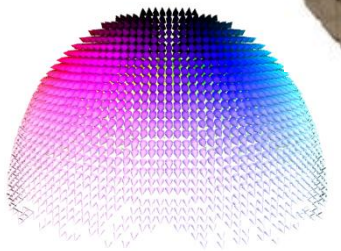
AFM correspondente

3D:

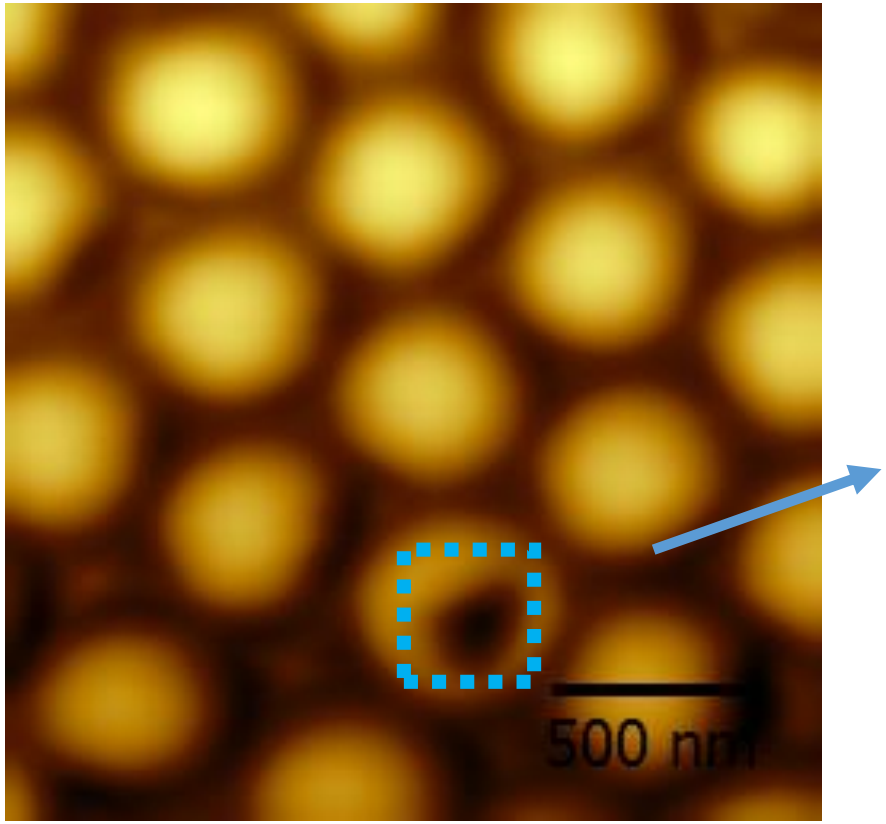


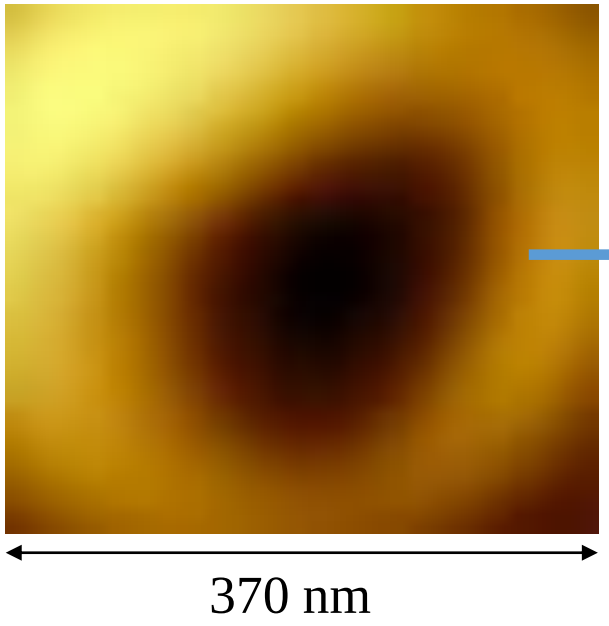
PS 500 nm – Co 2.0 nm

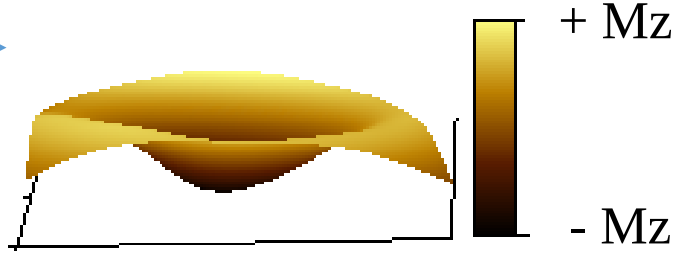
mumax^3



Microscopia de força magnética





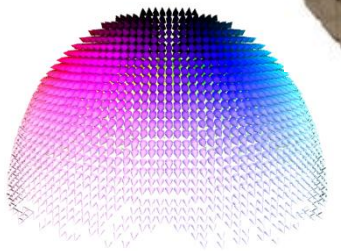


370 nm

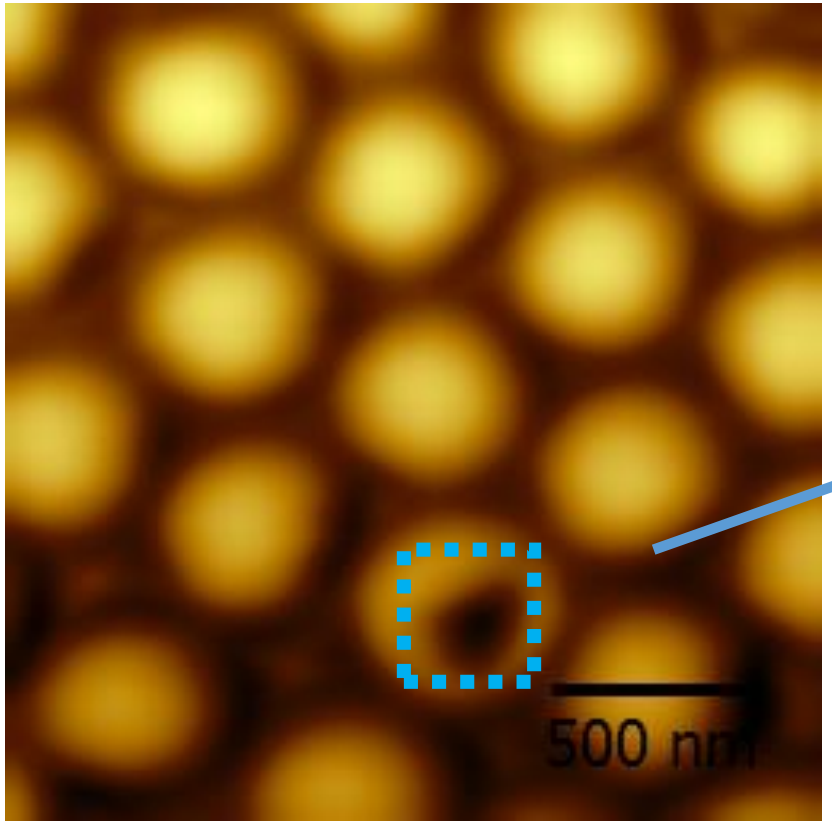
FWHM ~140 nm

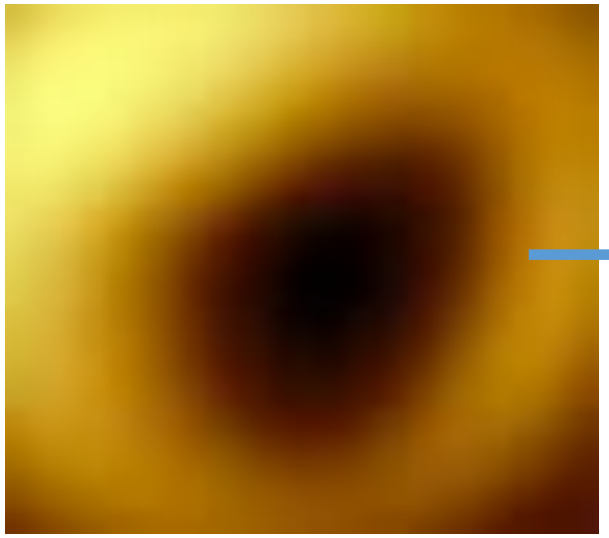
PS 500 nm – Co 2.0 nm

mumax^3

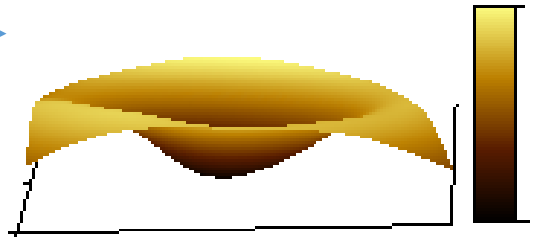


Microscopia de força magnética



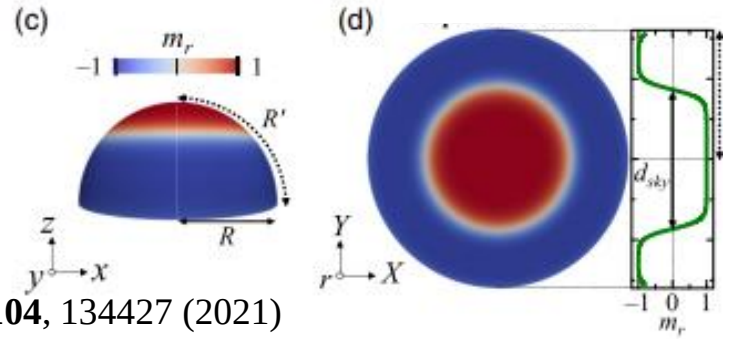


370 nm



370 nm

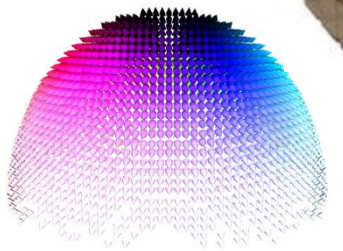
FWHM ~140 nm



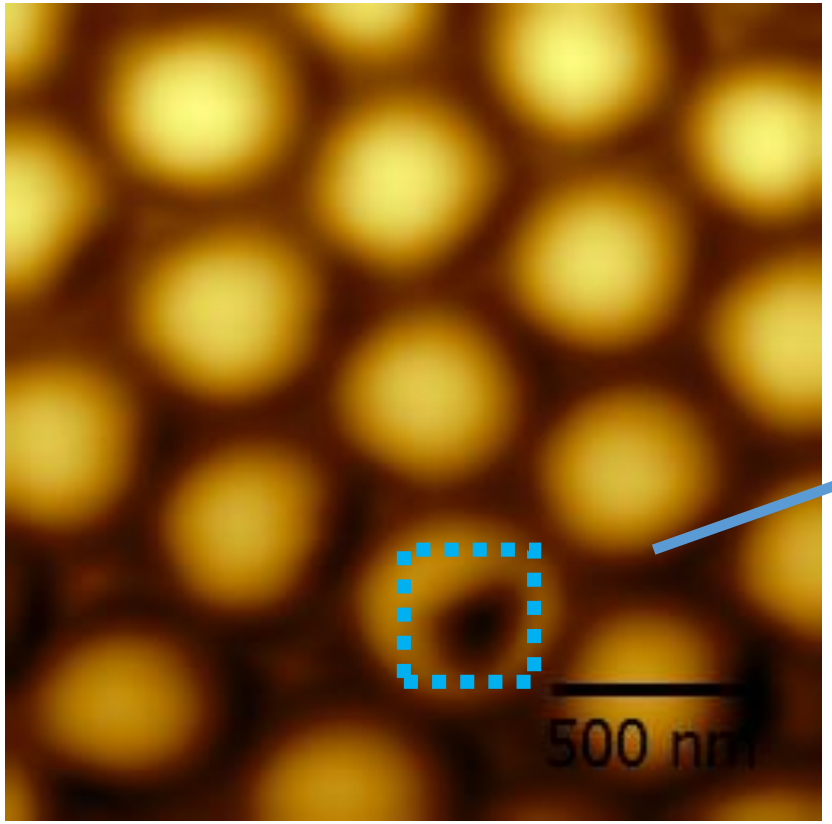
PHYSICAL REVIEW B **104**, 134427 (2021)

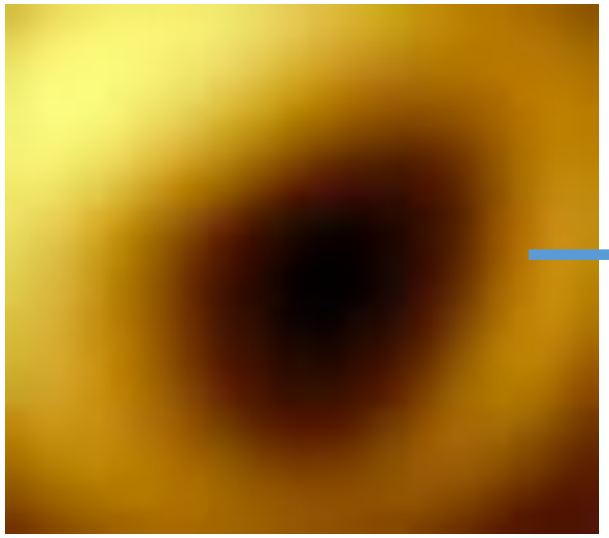
PS 500 nm – Co 2.0 nm

mumax^3

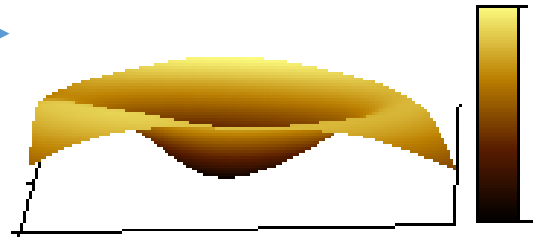


Microscopia de força magnética



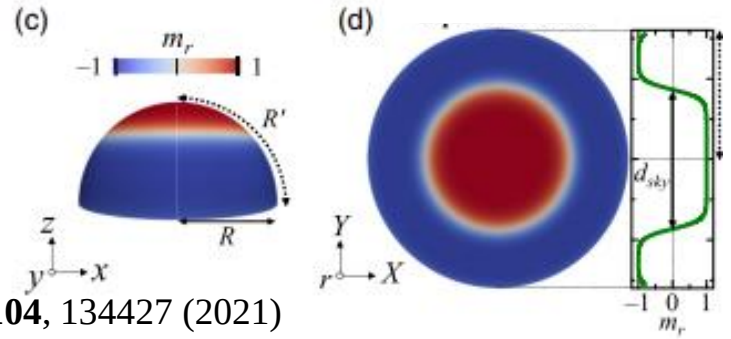


370 nm



370 nm

FWHM ~140 nm



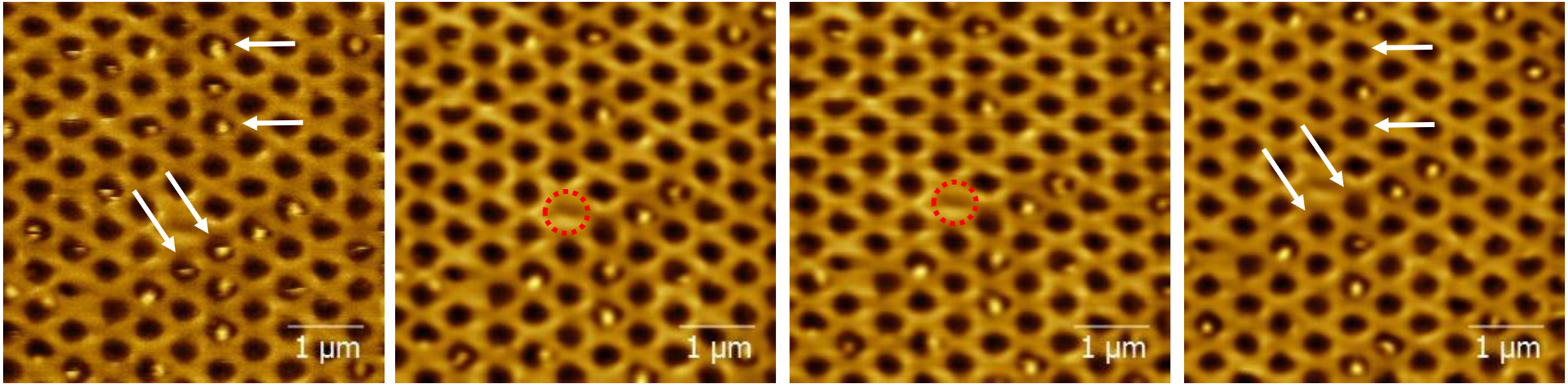
A medida afeta o estado físico?

PHYSICAL REVIEW B **104**, 134427 (2021)

PS 500 nm (Co 2.0 nm)
- efeitos da medida -

Microscopia de força magnética

Medida 1 | Medida 3 | Medida 5 | Medida 7

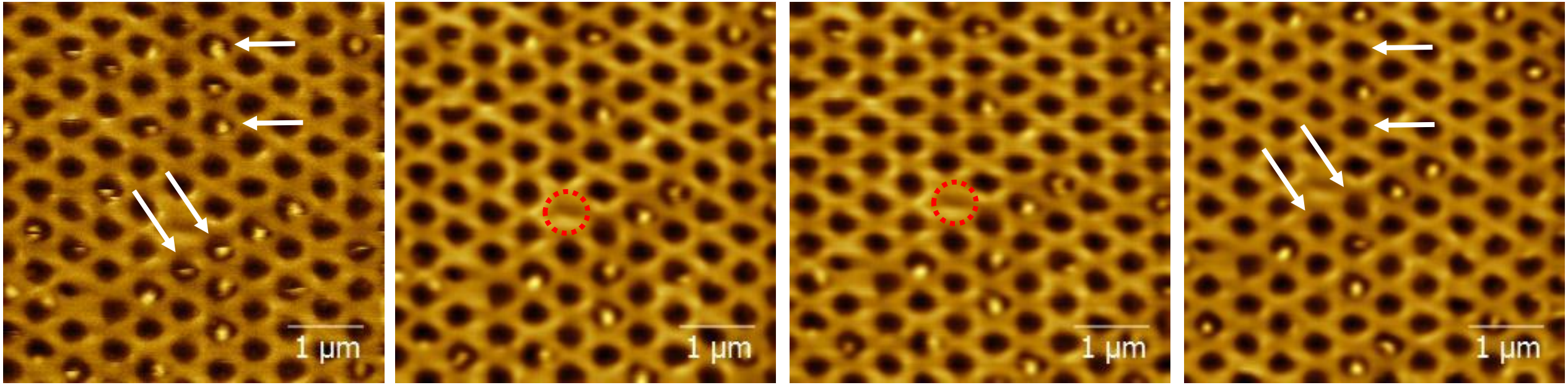


Estabilizamos domínios magnéticos e skyrmions sobre as esferas.

PS 500 nm (Co 2.0 nm)
- efeitos da medida -

Microscopia de força magnética

Medida 1 | Medida 3 | Medida 5 | Medida 7

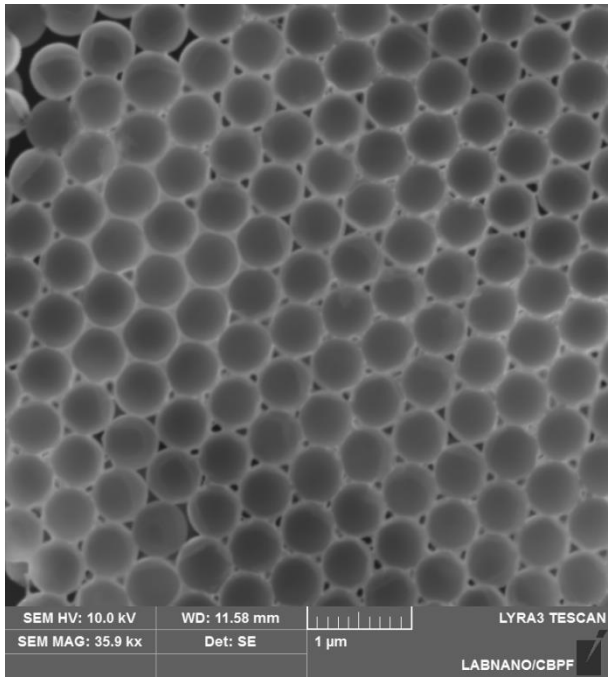


Estabilizamos domínios magnéticos e skyrmions sobre as esferas.

Como fica se removermos as esferas de poliestireno? A amostra (Co/Pt) fica autossustentável?

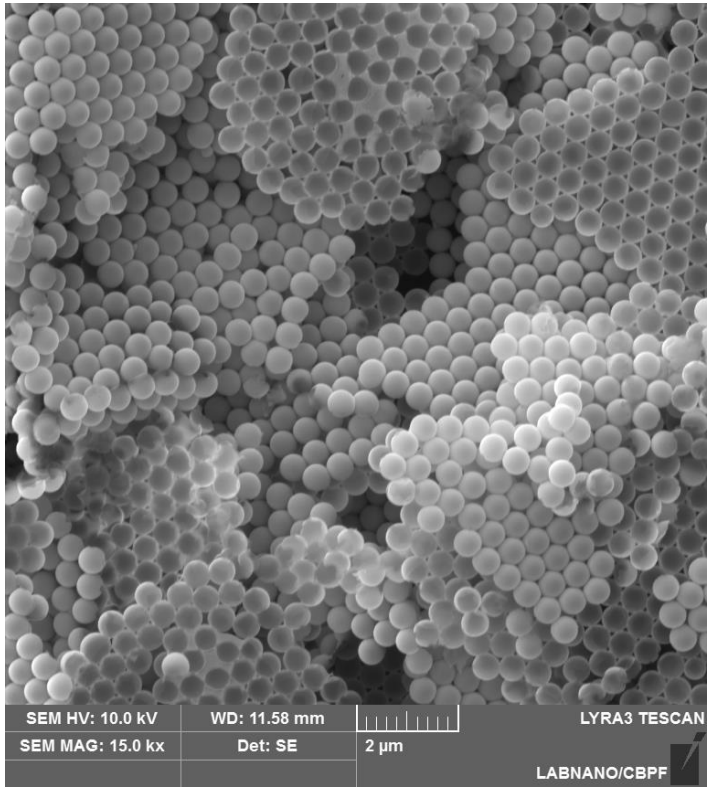
(PS 500 nm – Co 2.0 nm)
-caracterização das membranas-

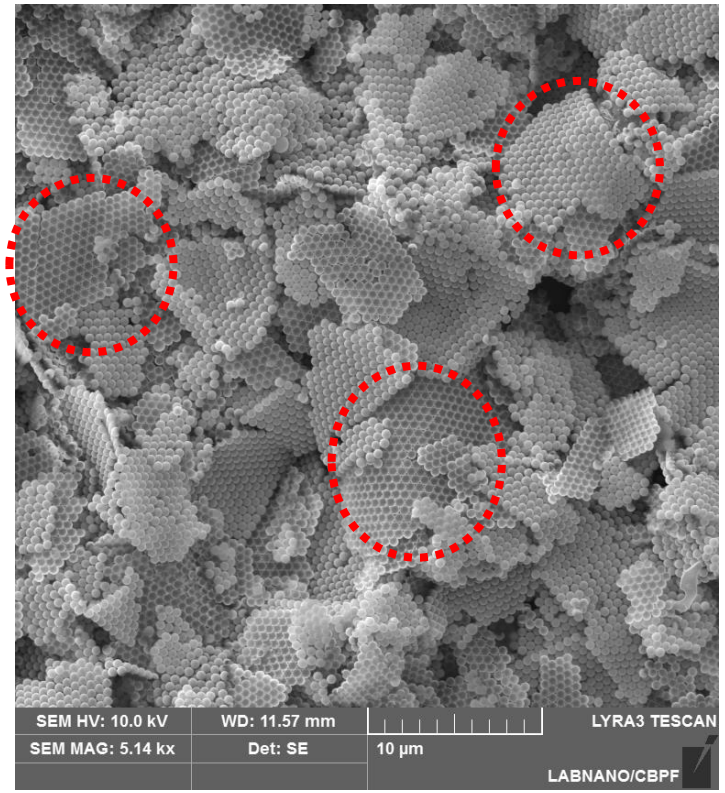
Removemos as esferas de poliestireno com solvente Tetraidrofurano (THF)



Cascas semi-esféricas bem organizadas.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)



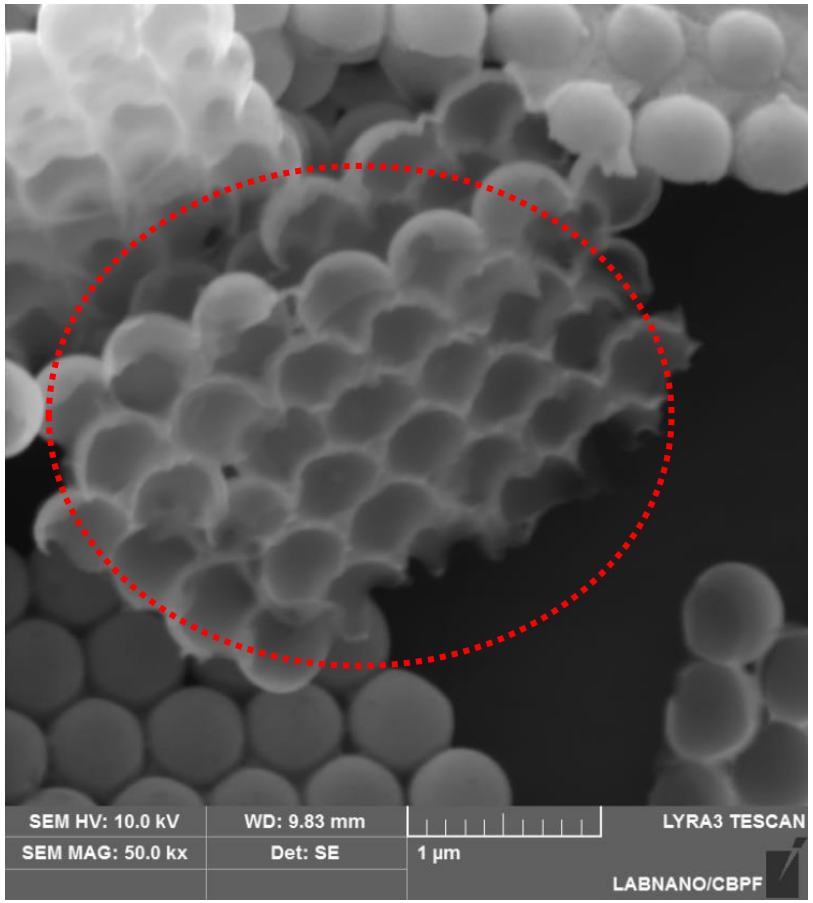


Membranas micrométricas autossustentáveis.

Dugato et. al. Em preparação. (2022).

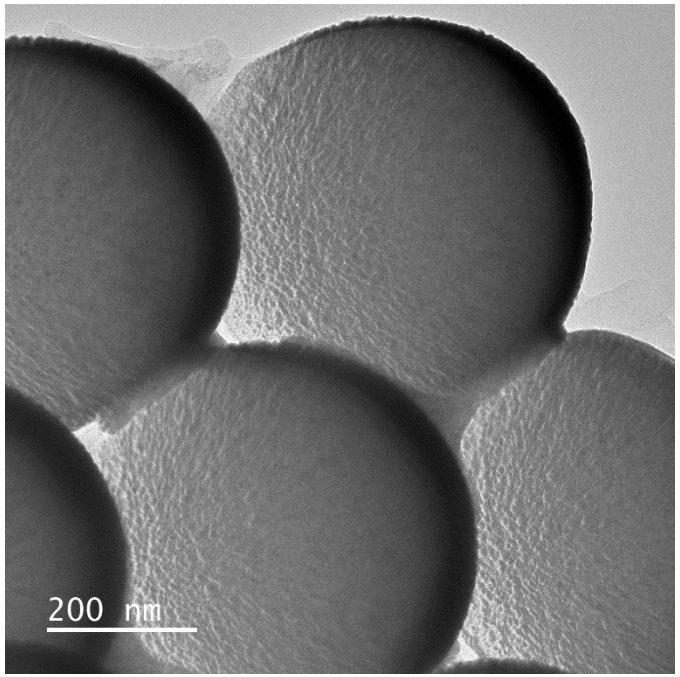
Co 2.0 nm (PS 500 nm)
-caracterização das membranas-

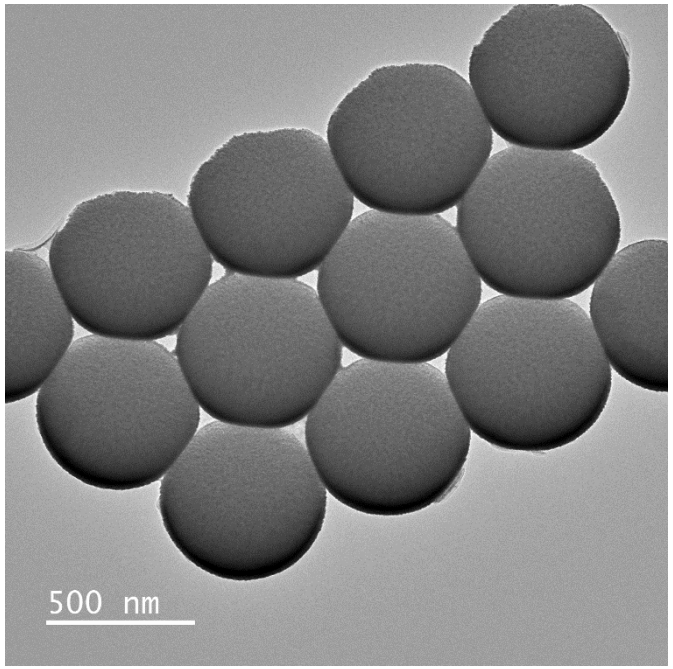
Microscopia eletrônica de varredura:



Dugato et. al. (em preparação) 2022.

Microscopia eletrônica de transmissão:

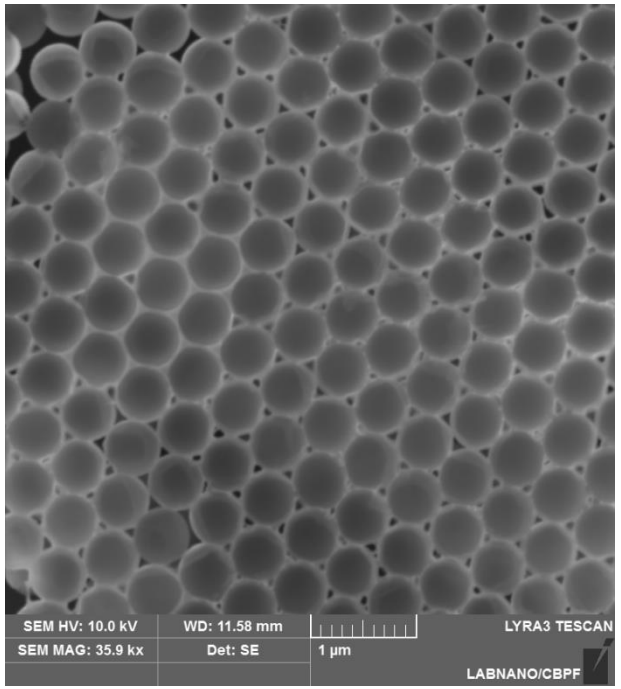




Filmes em forma de “caixa de ovos” (meia casca esférica).
Uma “capa” é fundida na outra.
Existem pontos onde as “capas” não se tocam (furos);

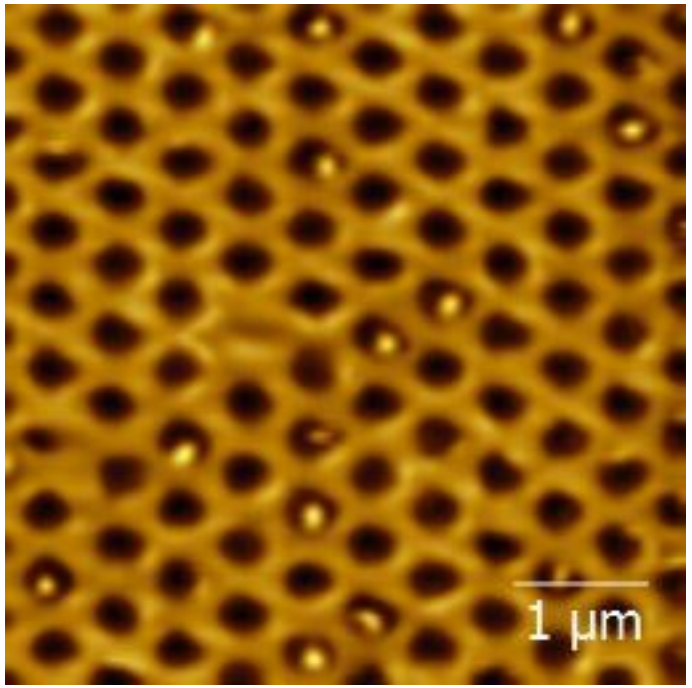
Amostra Co 2.0 nm sobre PS 500 nm

Amostra autossustentável:

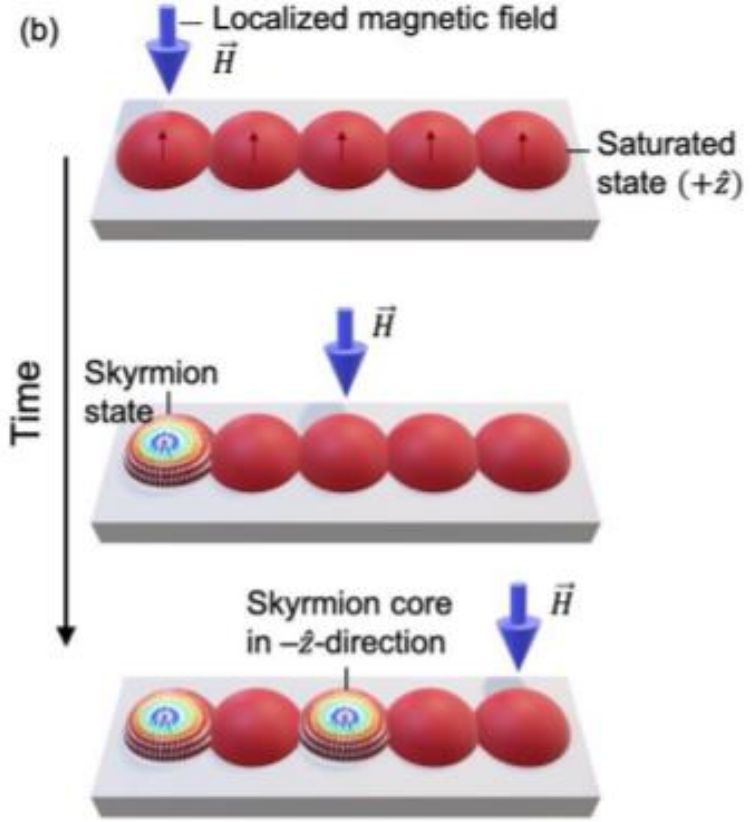


MEV

Skyrmions “pontuais” (~140 nm):



MFM



ACS Appl. Mater. Interfaces 12 , 47 , 53454 (2020)

*Gravação magnética;
*Rede de nanosciladores;

Conclusões

Usando o agrupamento de esferas de poliestireno conseguimos formar μ-filmes corrugados autossustentáveis, o que permite ter dezenas de “meias cascas esféricas” interligadas. Manipulação em dispositivos sem precisar substrato.

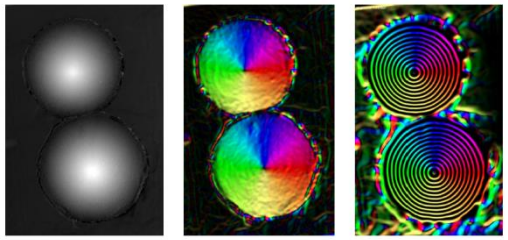
Forte influência da curvatura na anisotropia magnética. Conseguimos amostras com PMA sobre as esferas de poliestireno (PS) de 500 nm .

Demonstramos a estabilização de domínios magnéticos localizados pontualmente nas μ-membranas (tipo em HD).

Para o caso específico da amostra de Co 2.0 nm (PS 500 nm), observamos skyrmions isolados. Estes de tamanho ~140 nm. Promissores para aplicações em dispositivos spintrônicos.

Em andamento/Perspectivas

Medir as amostras mais promissoras com técnica de maior resolução e investigar a aplicação de campo magnético na medida.



Jalil, W.; Dugato, D.; Almeida, T.; Garcia, F. Em revisão JAP (2022)

Explorar mais as esferas com diâmetros menores. Conseguimos membranas maiores para 200 nm.

Sistemas assimétricos para conseguir estabilizar skyrmions (Pt/Co/Au, Pt/Co/Ta, Pt/Co/W, etc.). Visto que para o diâmetro de 100 nm as amostras de Pt/Co/Pt formaram apenas monodomínios.

Explorar a interação entre domínios afastando as esferas.

Dinâmica e interação entre skyrmions via simulação.

Ofereceremos um módulo na 6ª EAFExp relacionado a este assunto.

Agradecimentos

Wesley Jalil
Evelyn Santos
Trevor Almeida

Flávio Garcia

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

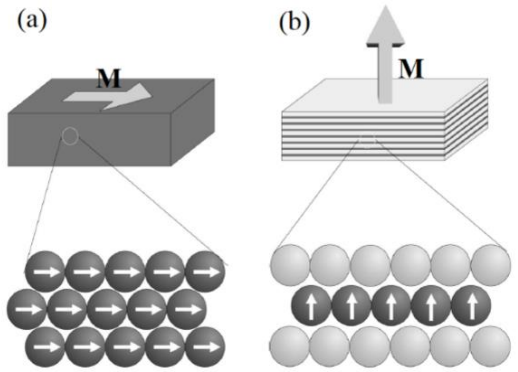
Programa de Capacitação Institucional (PCI)

CBPF

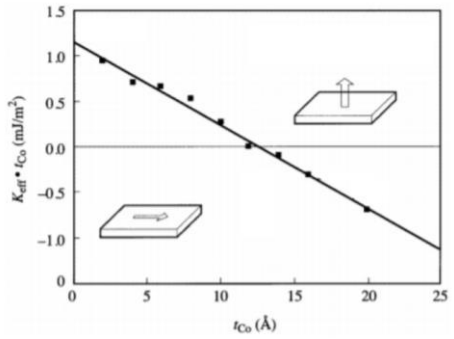
Obrigado pela atenção.

Efeitos interfaciais filmes finos ferromagneto/ metal pesado

Anisotropia magnética perpendicular (PMA)

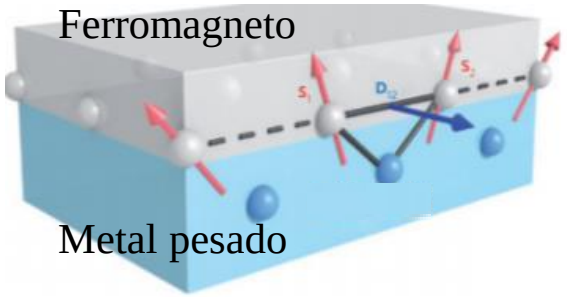


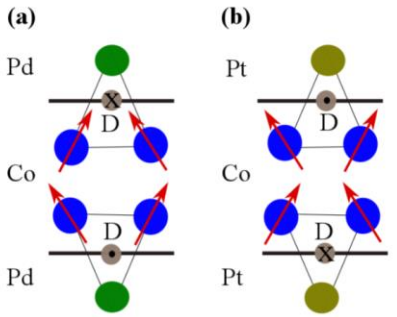
Metal pesado	Pt, Pd, Ta, W, Ir, Hf
Ferromagneto	Co, Fe, Ni
Metal pesado	Pt, Pd, Ta, W, Ir, Hf



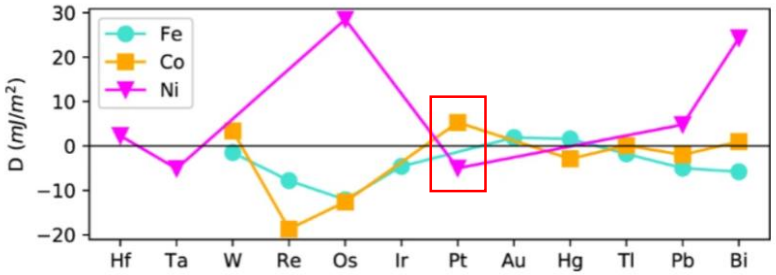
Guimarães, Edusp (2009)

Interação Dzyaloshinskii-Moriya (DMI)



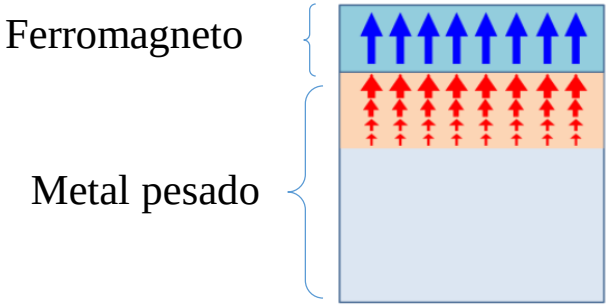


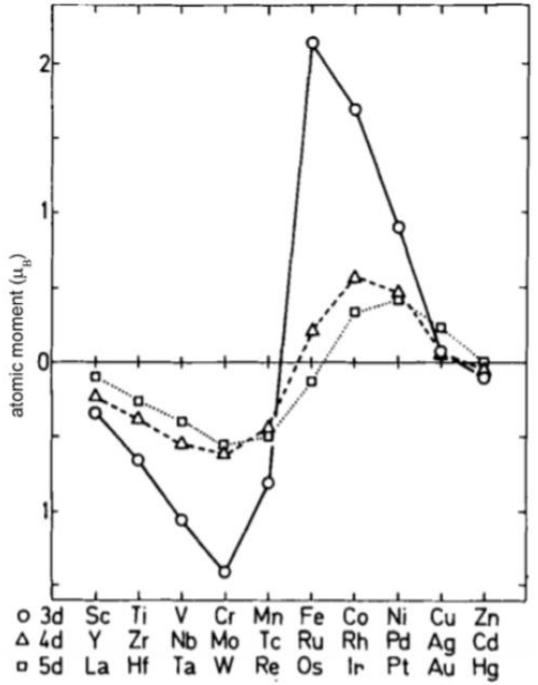
Dugato et . al. Appl. Phy. Lett. .(2019)



Computational Materials **688** (2020)

Efeito de proximidade magnético (MPE)

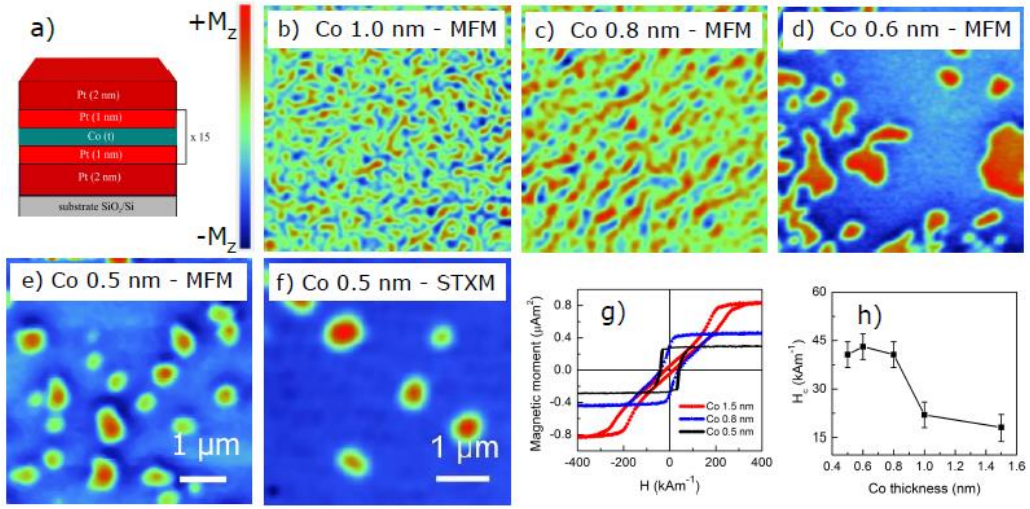


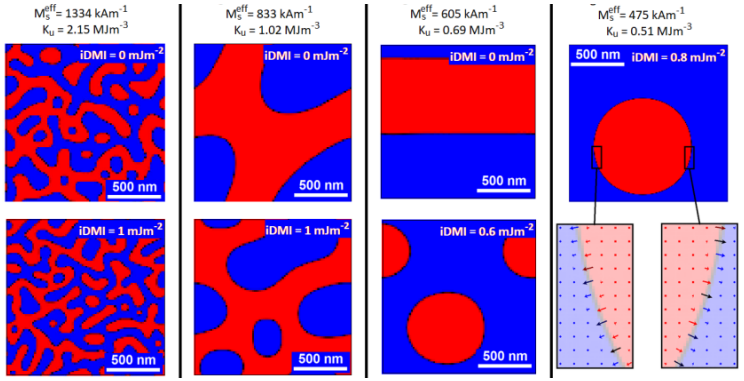


Akai et al. Hiperfine Interact **43** 253 (1998)

Domínios magnéticos e skyrmions em filmes finos

Multicamadas Pt/Co/Pt





Dugato, D. A. et al. Em revisão JMMM (2022).

* Os domínios magnéticos circulares são quirais.

Por que a 2.0 nm tem mais PMA?

A quebra de simetria por curvatura pode ser mais significativo para ela por ter um filme mais continuo. Os Co superiores passam a interagir mais quando aberto. Nas outras eles já estavam interagindo bastante.

>2nm não tem um filme perfeitamente plano!

Há um gradiente de espessura (2 nm) é bem no centro!

As esferas são rugosas;