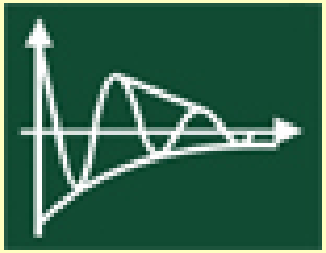
Nanomagnetismo

Parte 2

Escola do CBPF 2008



ftp://ftp2.biblioteca.cbpf.br/pub/apub/2006/mo/mo_zip/mo00206.pdf

Nanomagnetismo

Escola do CBPF – 2008

Alberto P. Guimarães
Renato A. Silva

1	• **Introdução**	14/07
2	• **Magnetismo de Pequenas Partículas**	15/07
3	• **Filmes Finos e Multicamadas**	16/07
4	• **Outros Sistemas de Baixa Dimensionalidade**	17/07
5	• **Propriedades de Transporte**	18/07

Interações em materiais magnéticos

- Energia total de um material ferromagnético

$$E_{total} = E_{ex} + E_{an} + E_{ms}$$

- Energia de troca

$$H = -2J\mathbf{S_i} \cdot \mathbf{S_j}$$

Na descrição clássica

$$E_{ex}^{pair} = -2J\mathbf{S_i} \cdot \mathbf{S_j} = -2JS^2 \cos\theta_{ij}$$

- Energia magnetostática

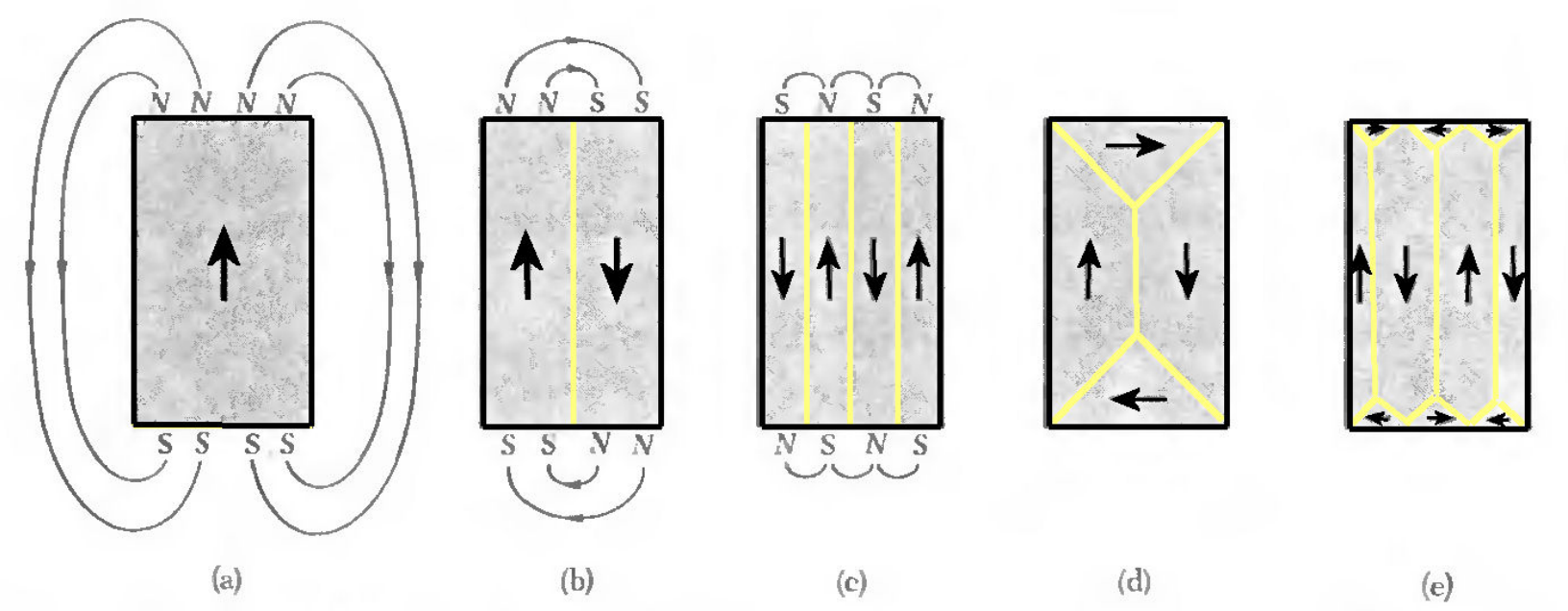
$$E_{ms} = -\frac{1}{2}\mu_0 \int_V \mathbf{H}_d^2 dV$$

- Energia anisotrópica

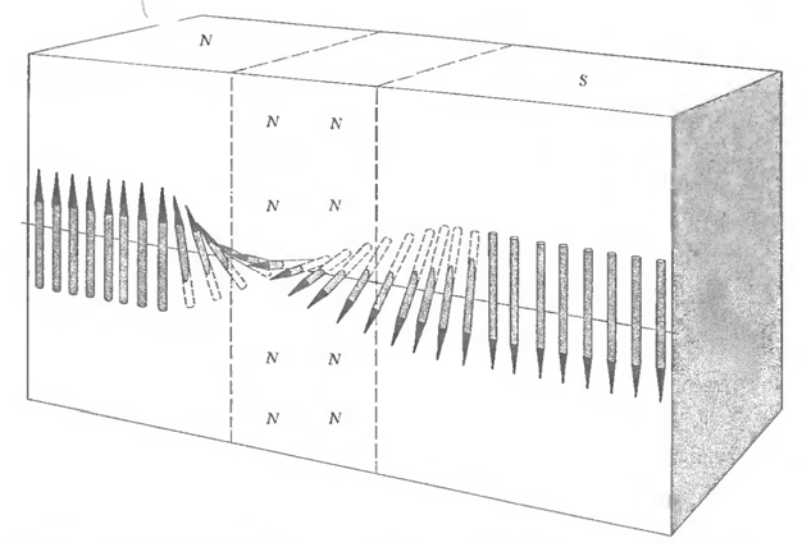
$$E_{an} = VK_1 \sin^2\theta + VK_2 \sin^2\theta$$

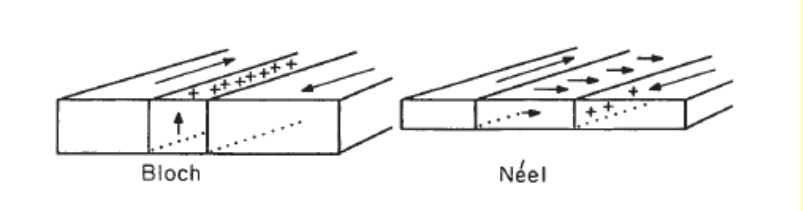
- Energia magnetoelástica e magnetoestrição

Domínios magnéticos



Paredes de domínio





Largura da parede → contribuição da energia de troca + anisotrópica

Magnetismo de pequenas partículas

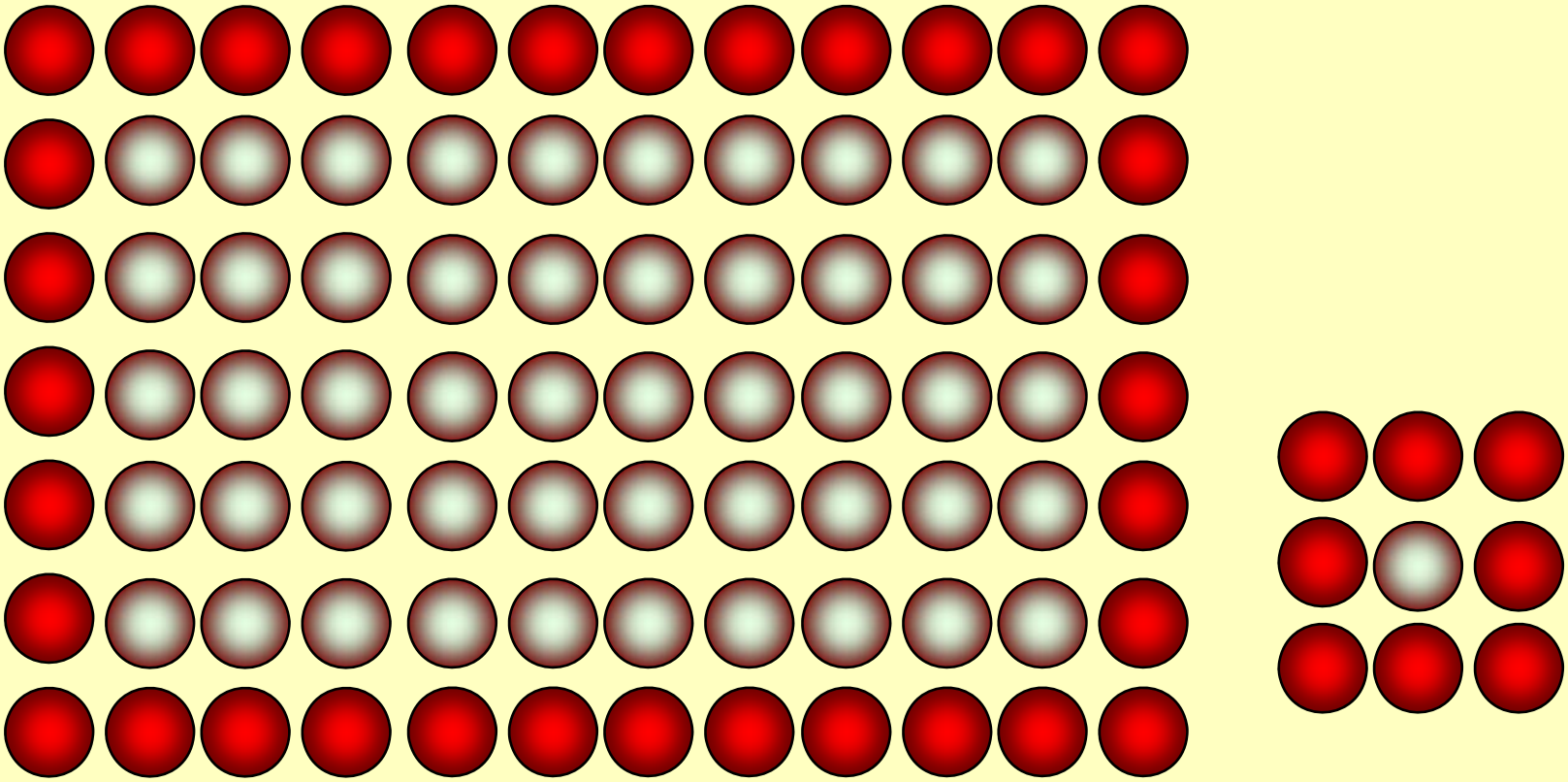
Coercividade de pequenas partículas

Superparamagnetismo

Modelo Stoner-Wohlfarth – Histerese

Modelo Stoner-Wohlfarth – Campo de Inversão

Proporção de átomos na superfície



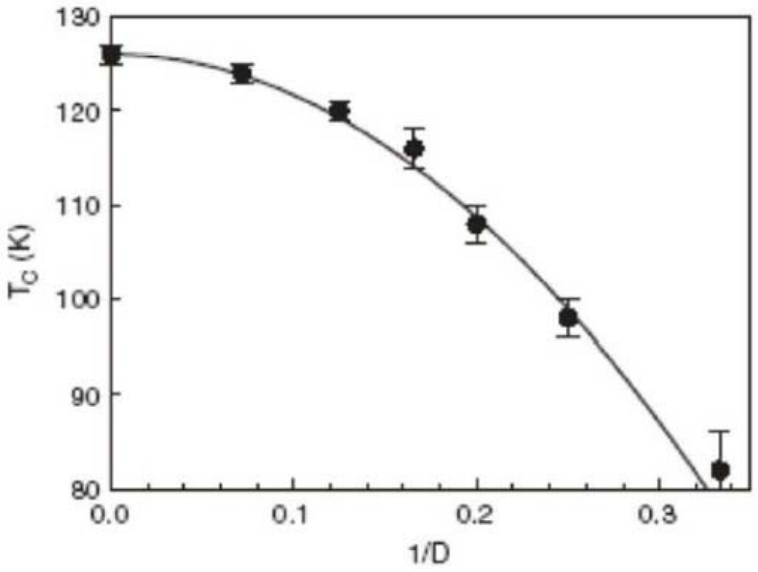
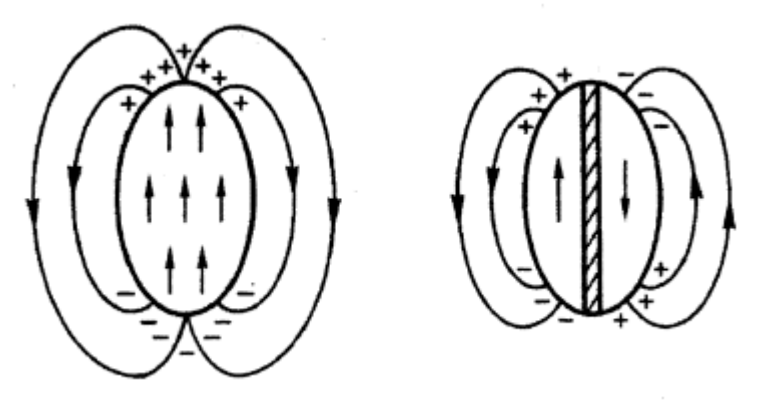


Figure 3.1 – Curie temperature of spherical maghemite particles (γ-Fe_2O_3) obtained by Monte Carlo simulation versus inverse diameter.

T_c depende do diâmetro!

Diâmetro crítico – partícula monodomínio



$$D_{cr} = \frac{72\sqrt{AK}}{\mu_0 M_s^2}$$

Material	$\mu_0 M_s^2$ $(10^6 \mathrm{Jm}^{-3})$	D_{cr} (nm)
α-Fe	3.82	9.7
Co	2.54	55.5
Ni	0.31	22.6
Fe_3O_4	0.29	12.4
CrO_2	0.20	180
MnBi	0.45	480
$Nd_2Fe_{14}B$	2.06	210
$SmCo_5$	0.88	1170
Sm_2Fe_{17}	1.33	420
FePt	1.44	340
$BaFe_{12}O_{19}$	0.183	62

Kronmüller, Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials, vol 2 (2007) pg 703-741

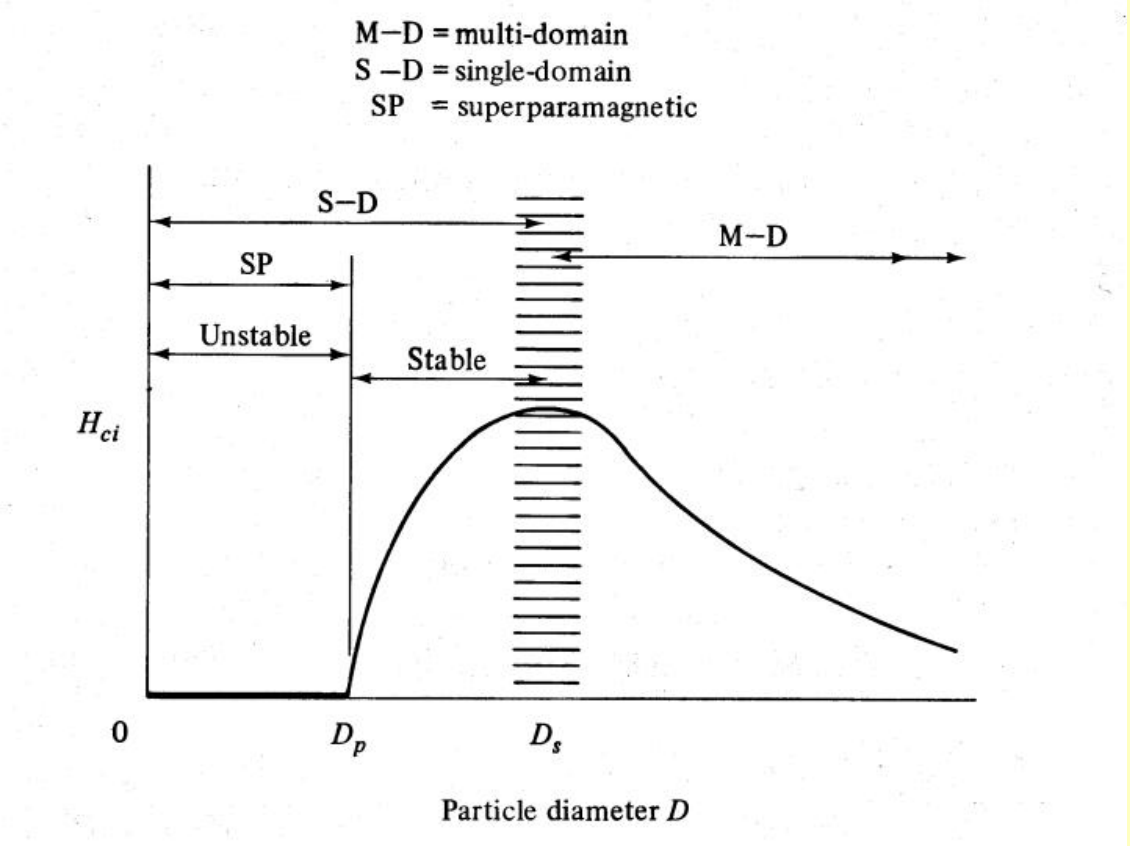
Comportamento magnético e tamanho de partículas

Três regimes:

a) Superparamagnético

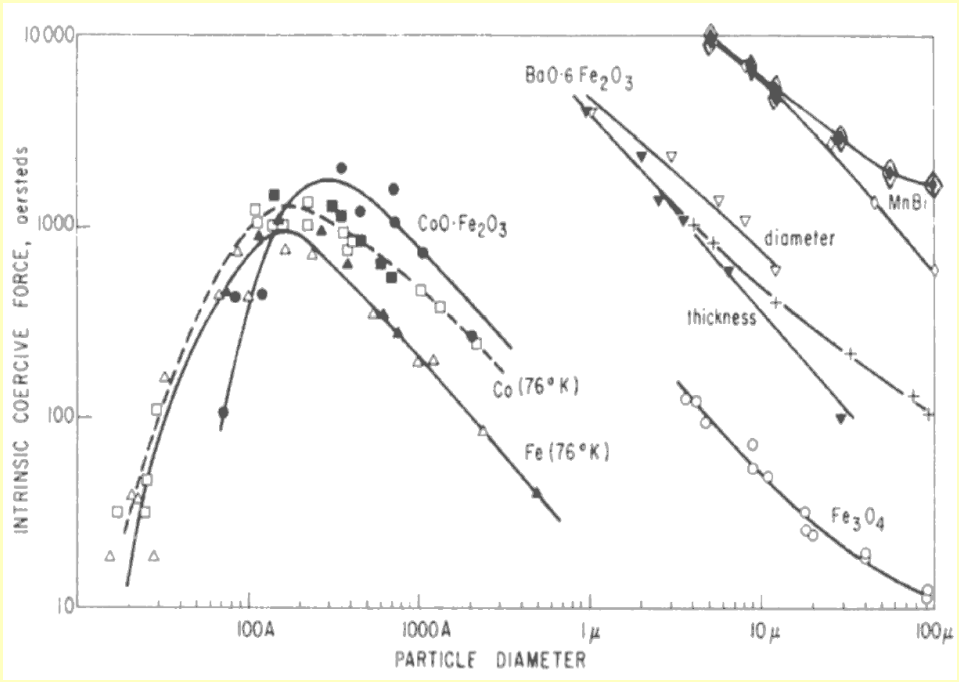
b) Monodomínio FM

c) Multidomínio

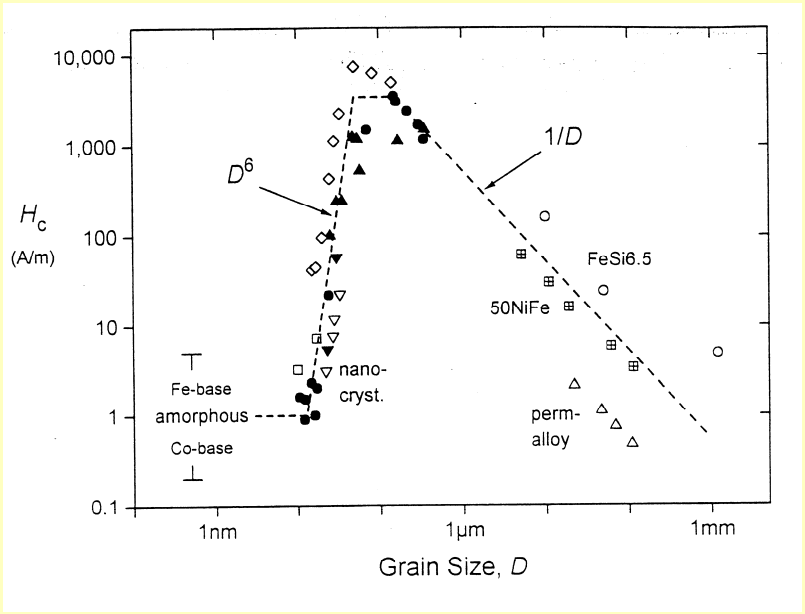


B.D. Cullity. Introduction to Magnetic Materials. Addison-Wesley, 1972.

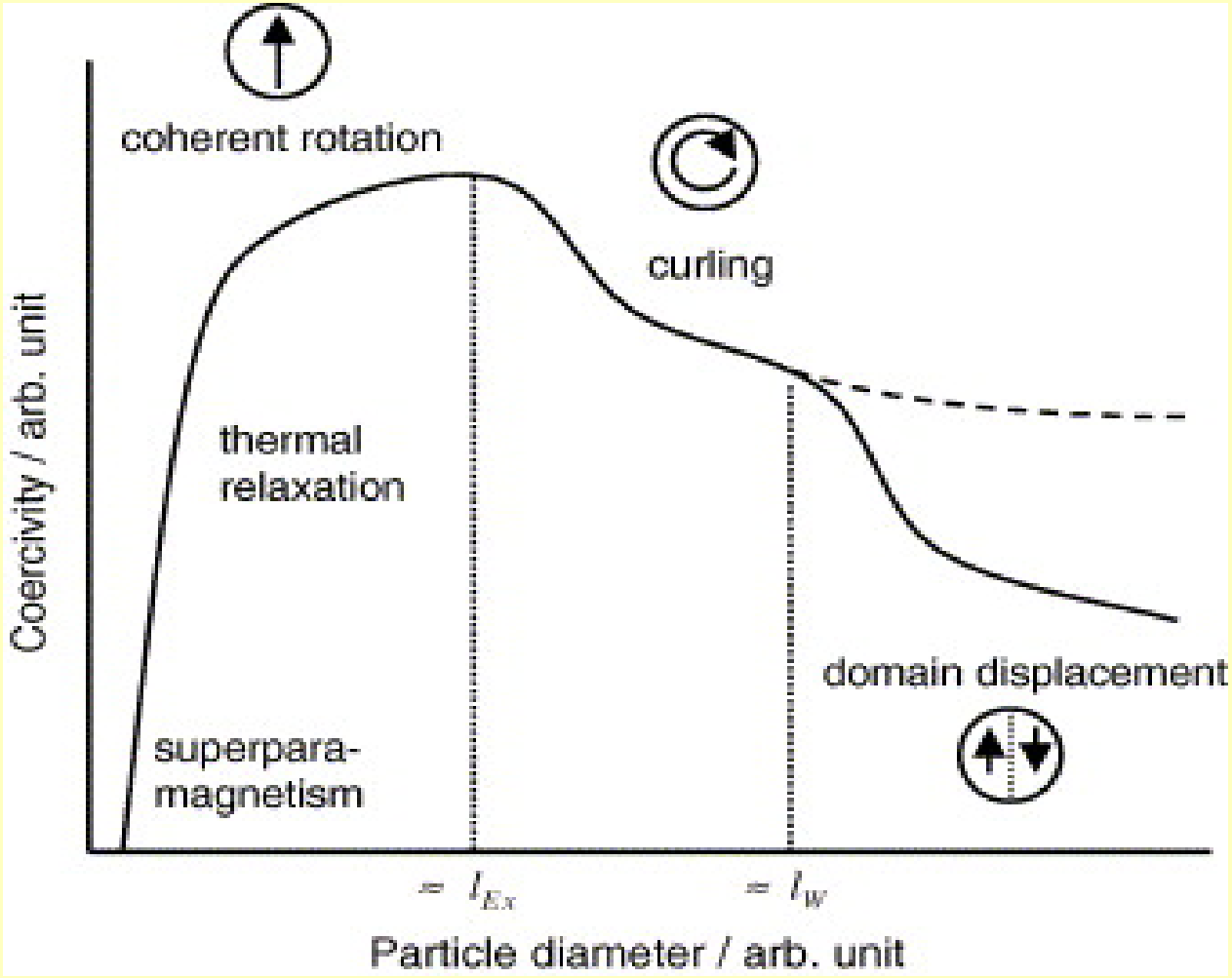
Coercividade em função do tamanho



F.E. Luborsky. High coercive materials – development of elongated particle magnets. J. Appl. Phys., 32:171S–183S, 1961.



(Herzer 1997)


coherent rotation
curling
thermal
relaxation
superpara-
magnetism
domain displacement
Coercivity / arb. unit
= l_{Ex}
= l_W
Particle diameter / arb. unit

Características nos três regimes

1) Superparamagnético (SPM): Não apresentam histerese (reversibilidade)

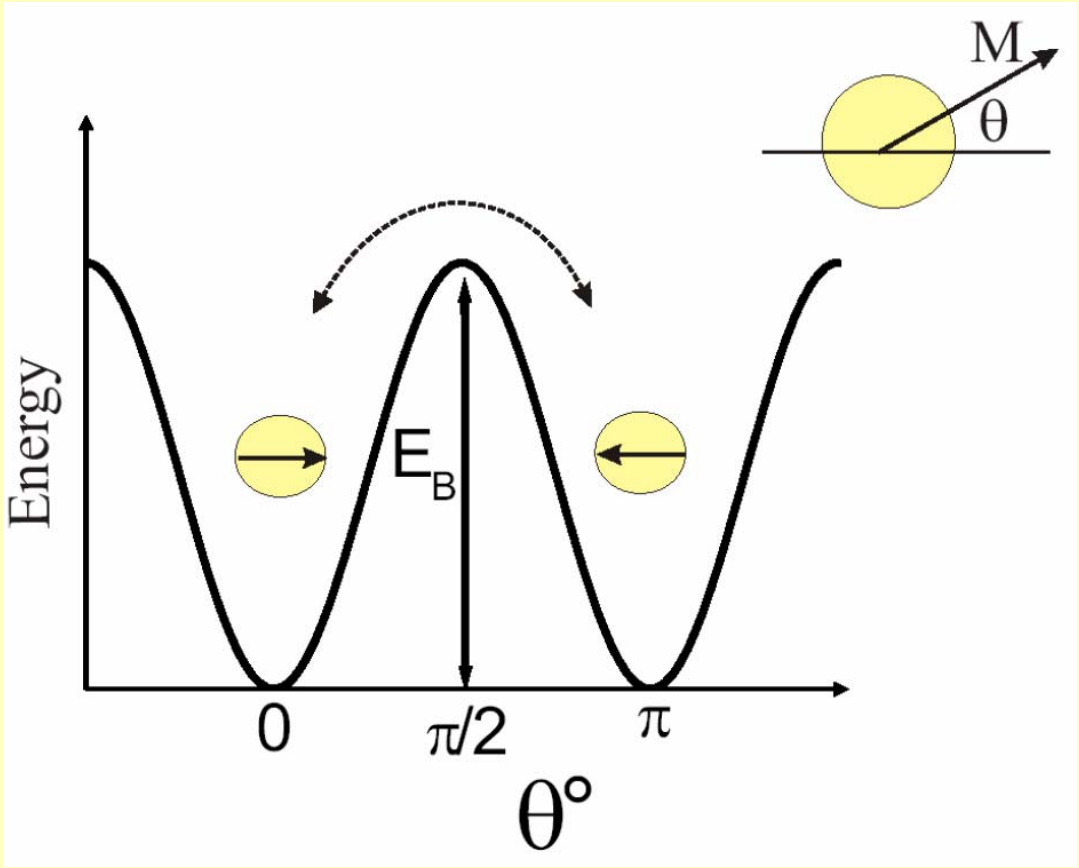
2) Monodomínio FM: Apresentam histerese (H_c e M_r não nulos)

3) Multidomínio FM:Apresentam histerese (H_c e M_r não nulos)

Superparamagnetismo

$$E_{an} = KV \sin^2 \theta$$

$$\Delta E = KV$$



Se $k_B T \geq KV$ reversão espontânea da magnetização!

Tempo de relaxação

$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{KV}{k_B T}\right)}$$

Tempo de relaxação

Diâmetro (nm)	τ(s)
6,8	10^{-1}
9,0	$3{,}2X10^{9}$= 100 anos

Comportamento depende do tempo de medida!

$$\begin{cases} \text{For} \quad \tau < t_m \quad \rightarrow \quad \text{superparamagnetic regime} \\ \text{For} \quad \tau > t_m \quad \rightarrow \quad \text{blocked regime (ferromagnet)} \end{cases}$$

Relaxação e tempo de medida

$$\begin{cases} \text{For} \quad \tau < t_m \quad \rightarrow \quad \text{superparamagnetic regime} \\ \text{For} \quad \tau > t_m \quad \rightarrow \quad \text{blocked regime (ferromagnet)} \end{cases}$$

$$\ln \tau = \ln \tau_0 + \frac{KV}{k_B T}$$

para $\quad t_m = 100 s \qquad \tau_0 = 10^{-9} s$

$$V_{cr}^{spm} \approx \frac{25 k_B T}{K} \qquad T_B \approx \frac{KV}{25 k_B}$$

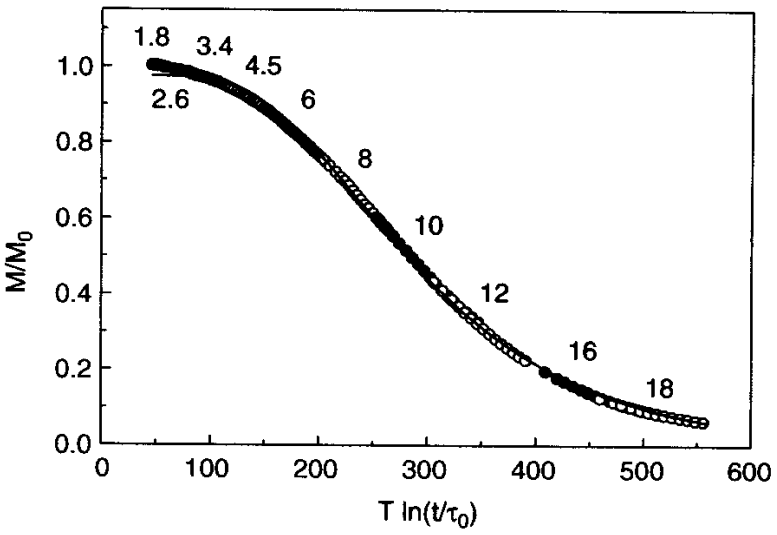
Relaxação e tempo de medida

$$\ln \tau = \ln \tau_0 + \frac{KV_{cr}}{kT_0}$$

Reescrevendo, e notando que KV=E (altura da barreira)

$$E_c(t,T) = kT \ln(t_m / \tau_0)$$

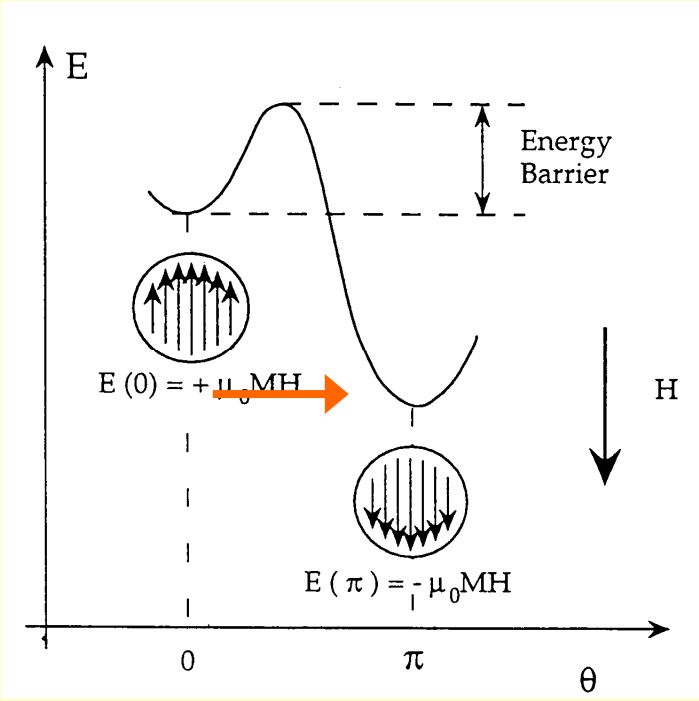
Desta equação resulta que as inversões com barreiras em energia em torno de E_c podem ser varridas ou com a temperatura ou com o tempo



Curvas de relaxação a diferentes T caindo sobre a mesma curva geral M(t) em função da variável T ln (t/τ_0) com $\tau_0=10^{-9}$ s.

X. Batlle e A. Labarta, 'Finite-size effects in fine particles: magnetic and transport properties', J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002) R15-R42

Tunelamento quântico macroscópico (TQM)



Costuma-se denotar T* a temperatura de transição entre os dois regimes: a temperatura na qual a taxa de TQM é igual à taxa de transição ativada termicamente

Sistemas reais com muitas partículas

1. Distribuição de tamanhos de partículas

2. Distribuição de alturas de barreiras (distribuição de K)

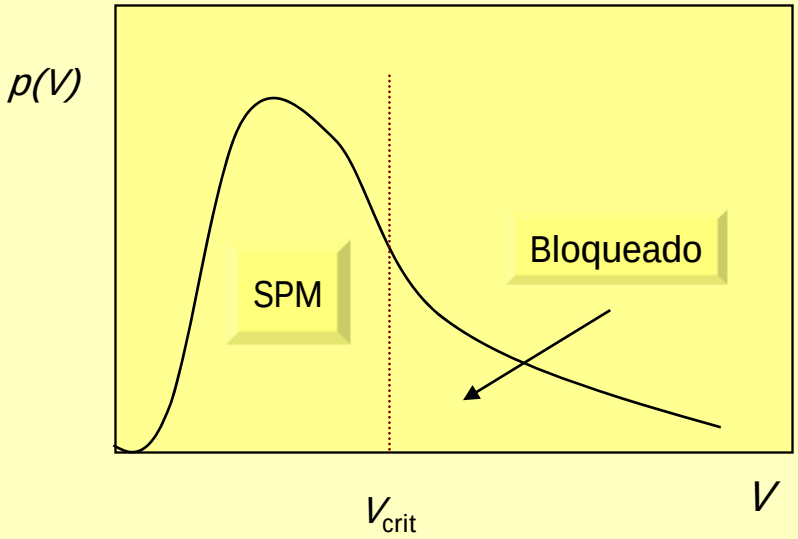
Sistema com muitas partículas: distribuição de tamanhos

Nas amostras com distribuição de tamanhos de grãos, coexistem os dois comportamentos (SPM e bloqueado)

Uma distribuição de volumes frequentemente encontrada é a distribuição log-normal, dada por

$$f(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma V}} \exp\left[-\frac{\ln^2(V/V_0)}{2\sigma^2} \right]$$

onde σ é o desvio padrão de ln(V) e V_0 é o valor do volume mais provável



As curvas de magnetização apresentam uma superposição das duas situações (SPM e bloqueado)

(Marcelo Knobel 2003)

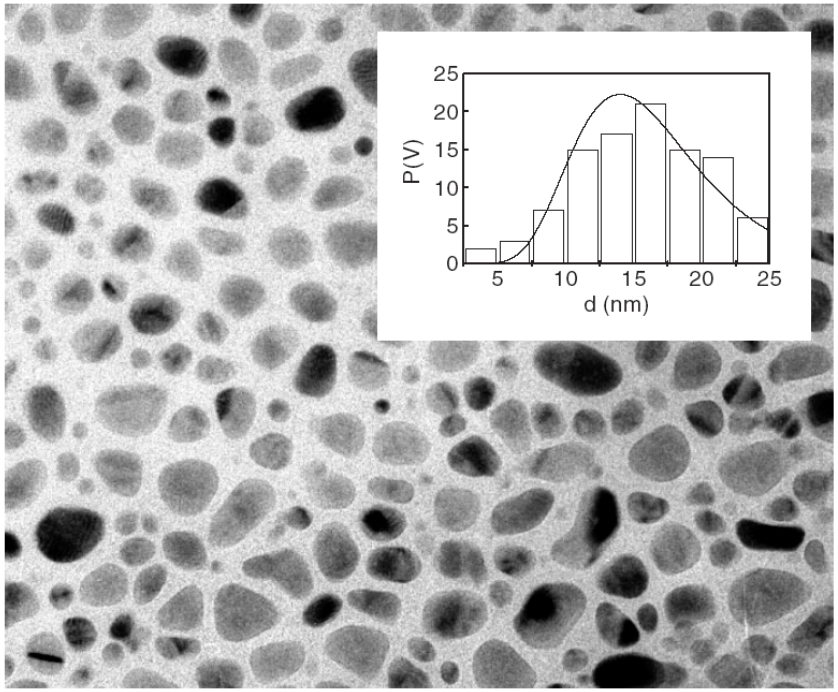


Figure 1. Bright-field TEM micrograph of Co particles dispersed in a Zr_2O_3 matrix. Inset shows the size distribution obtained from the TEM micrograph. The continuous line is a fit to a logarithmic-linear distribution.

Sistemas com muitas partículas: distribuição de alturas de barreiras I

A relaxação da magnetização fora do equilíbrio no caso de as barreiras não serem da mesma altura pode ser caracterizada por uma dependência de τ com a energia

$$\tau = \tau(E)$$

A relaxação da magnetização total é a soma

$$M(t) = M_1(0)e^{\frac{t}{\tau(E_1)}} + M_2(0)e^{\frac{t}{\tau(E_2)}} + \ldots = \sum M_i(0)e^{\frac{t}{\tau(E_i)}} = M(0)\sum f(E_i)e^{\frac{t}{\tau(E_i)}}$$

onde $f(E_i)$ é a fração da magnetização com energia de barreira E_i

$$f(E_i) = \frac{M_i(0)}{M(0)}$$

No limite contínuo

$$M(t) = M(0)\int_0^\infty f(E)e^{\frac{t}{\tau(E)}}dE$$

Sistemas com muitas partículas: distribuição de alturas de barreiras II

No limite contínuo

$$M(t) = M(0)\int_0^\infty f(E) e^{\frac{1}{\tau(E)}} dE$$

A integral pode ser aproximada por

$$M(t) \approx M(0)\left[1 - kT\, f(E_c) \ln\left(\frac{t}{\tau_0}\right)\right]$$

onde E_c é a energia média das barreiras relevante para a janela do experimento

X. Batlle e A. Labarta, 'Finite-size effects in fine particles: magnetic and transport properties', J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002) R15-R42

Viscosidade magnética

Como se observa a viscosidade magnética S

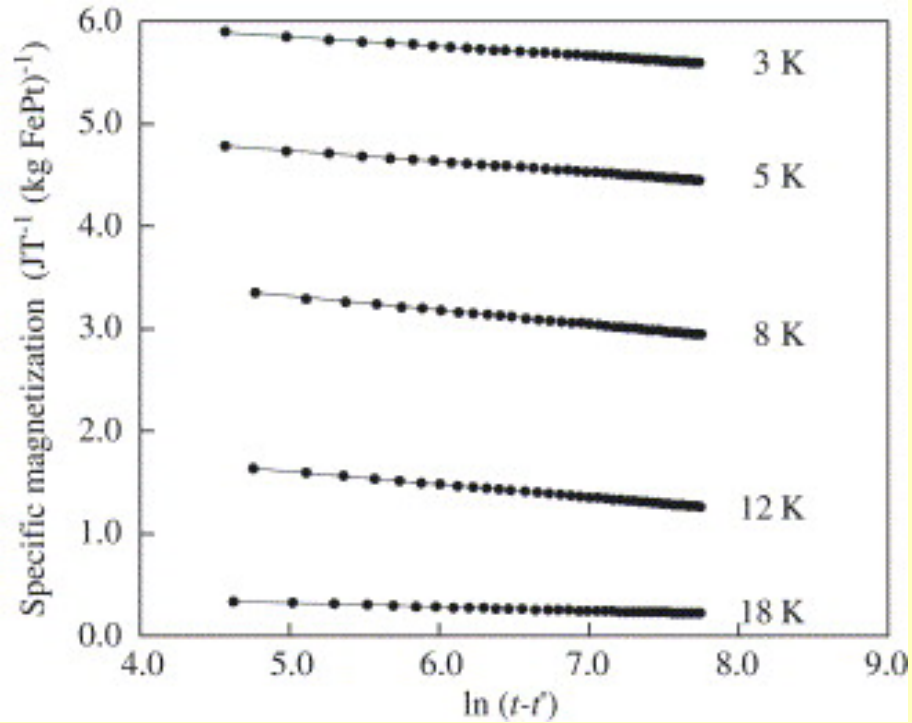
Definição:

$$S = -\frac{1}{M(0)}\frac{\partial M}{\partial(ln\ t)}$$

Da equação anterior de M(t):

$$S = -\frac{1}{M(0)}\frac{\partial M}{\partial(\ln t)} = f(E_c)kT$$

Daí podemos ver que à medida que E_c varia, a medida da viscosidade mapeia a distribuição de barreiras dada por $f(E_i)$



Relaxação da magnetização de nanopartículas de FePt em função de ln t, para diferentes temperaturas

N.T. Gorham, et al,Apparent magnetic energy-barrier distribution in FePt nanoparticles. J. Magn. Magn. Mat., 295:174–176, 2005.

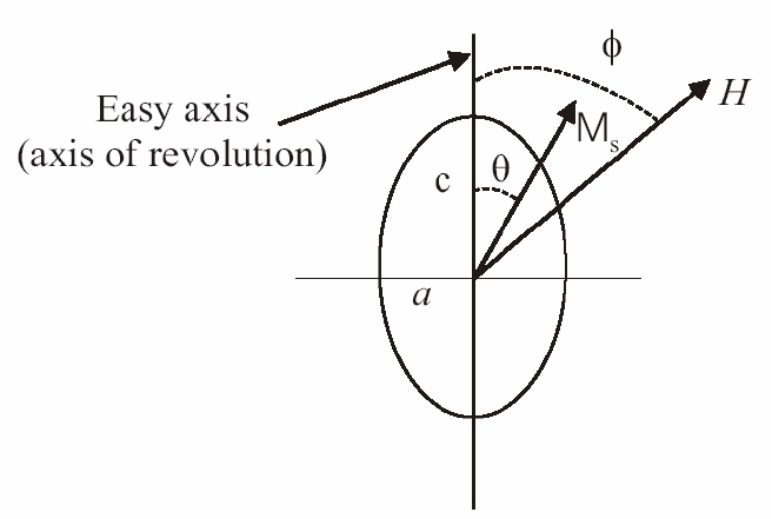
Modelo Stoner-Wohlfarth (rotação coerente)

Considerações:
- Partícula monodomínio
- Magnetização homogênea
- Eixo fácil ao longo de z
- Nenhuma interação entre as particulas

$$E = K\sin^2\theta - \mu_0 H M_s \cos(\phi - \theta)$$

$$\frac{dE}{d\theta} = 2K\sin\theta\cos\theta - \mu_0 H M_s \sin(\phi - \theta) = 0$$

$$M = M_s \cos(\phi - \theta)$$



Modelo de Stoner-Wohlfarth

$$\phi = 90^o$$

$$2K \sin\theta \cos\theta = \mu_0 H M_s \cos\theta$$

and $M = M_s \sin\theta$.

$$M/M_s = m$$

$$m = \mu_0 H \left(M_s/2K\right).$$

$$\sin\theta\cos\theta - h\sin\left(\phi-\theta\right) = 0,$$

$$m = \cos\left(\phi-\theta\right).$$

$$h = H/H_k$$

$$H_k = 2K_u/M_s$$

Modelo de Stoner-Wohlfarth

$$(\phi = 0)$$

$$\sin\theta\cos\theta - h\sin(\phi - \theta) = 0,$$

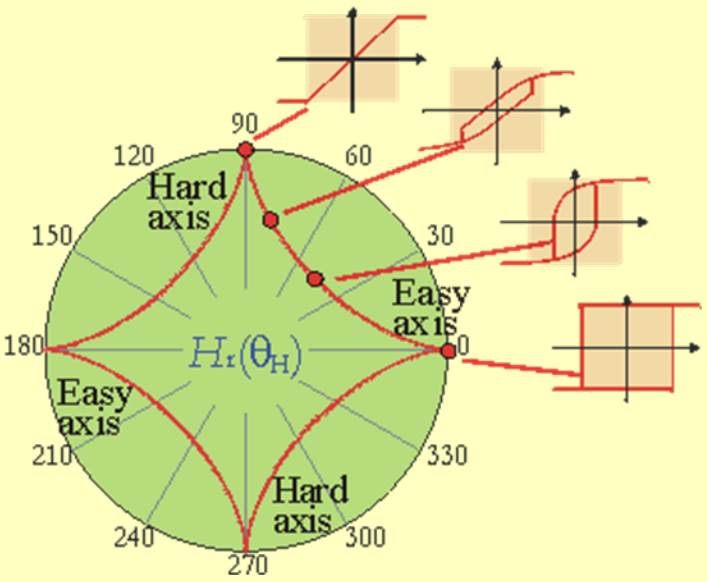
$$m = \cos(\phi - \theta).$$

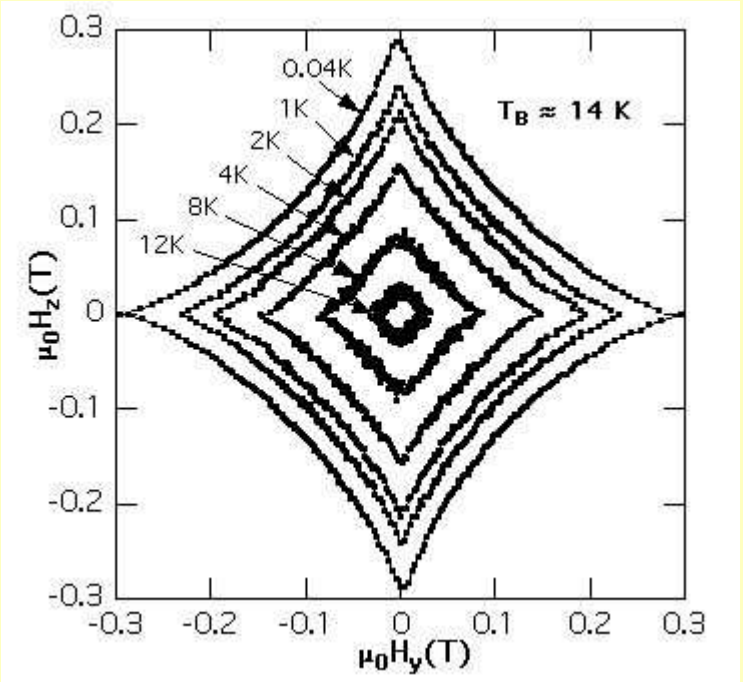
$$\tan\theta = -2\tan^{1/3}\phi$$

$$\frac{1}{2K_u}\frac{d^2E}{d\theta^2} = \cos^2\theta - \sin^2\theta + h\cos(\phi - \theta)$$

$$H_{inv} = \frac{H_k}{\left(\sin^{2/3}\phi + \cos^{2/3}\phi\right)^{3/2}}$$

Astróide de Stoner-Wohlfarth





Altura da barreira de energia

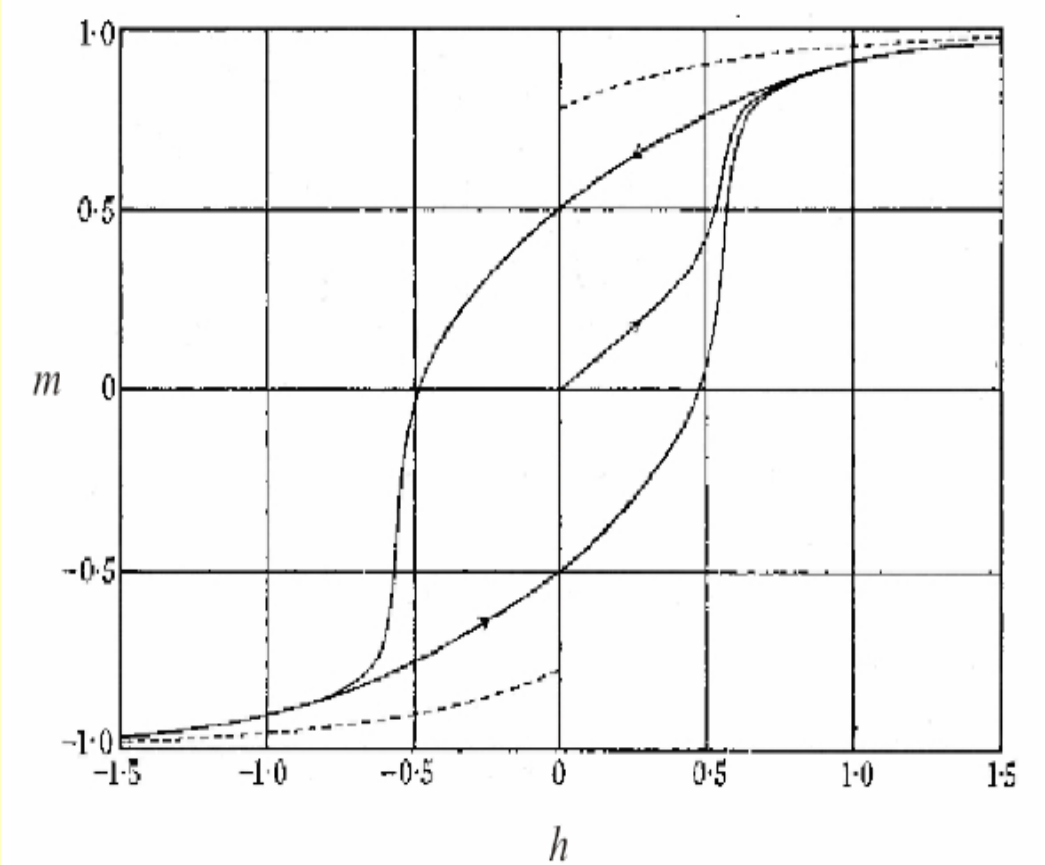
$(\phi = 0)$

$$\theta_{equili} = 0, \quad \theta_{equili2} = \pm\pi, \quad \theta_{equili3} = \arccos\left(-\mu_0 M_S H / 2KV\right)$$

$$\Delta E = E_{\max}\left(\theta = \arccos\frac{H}{H_N}\right) - E_{\min}\left(\theta = 0\right)$$

$$\Delta E = K_1 V\left(1 - \frac{H}{H_N}\right)^2$$

Conjunto de partículas orientadas aleatoriamente



Bibliografia

X. Batlle e A. Labarta, 'Finite-size effects in fine particles: magnetic and transport properties', J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002) R15-R42.

B.D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley, Reading, 1972.

A.P. Guimarães, Magnetism and Magnetic Resonance in Solids, John Wiley, Nova York, 1998.

S. Onishi, A.J. Freeman and M. Weinert, Phys. Rev. B28 (1983) 6741.

Fim