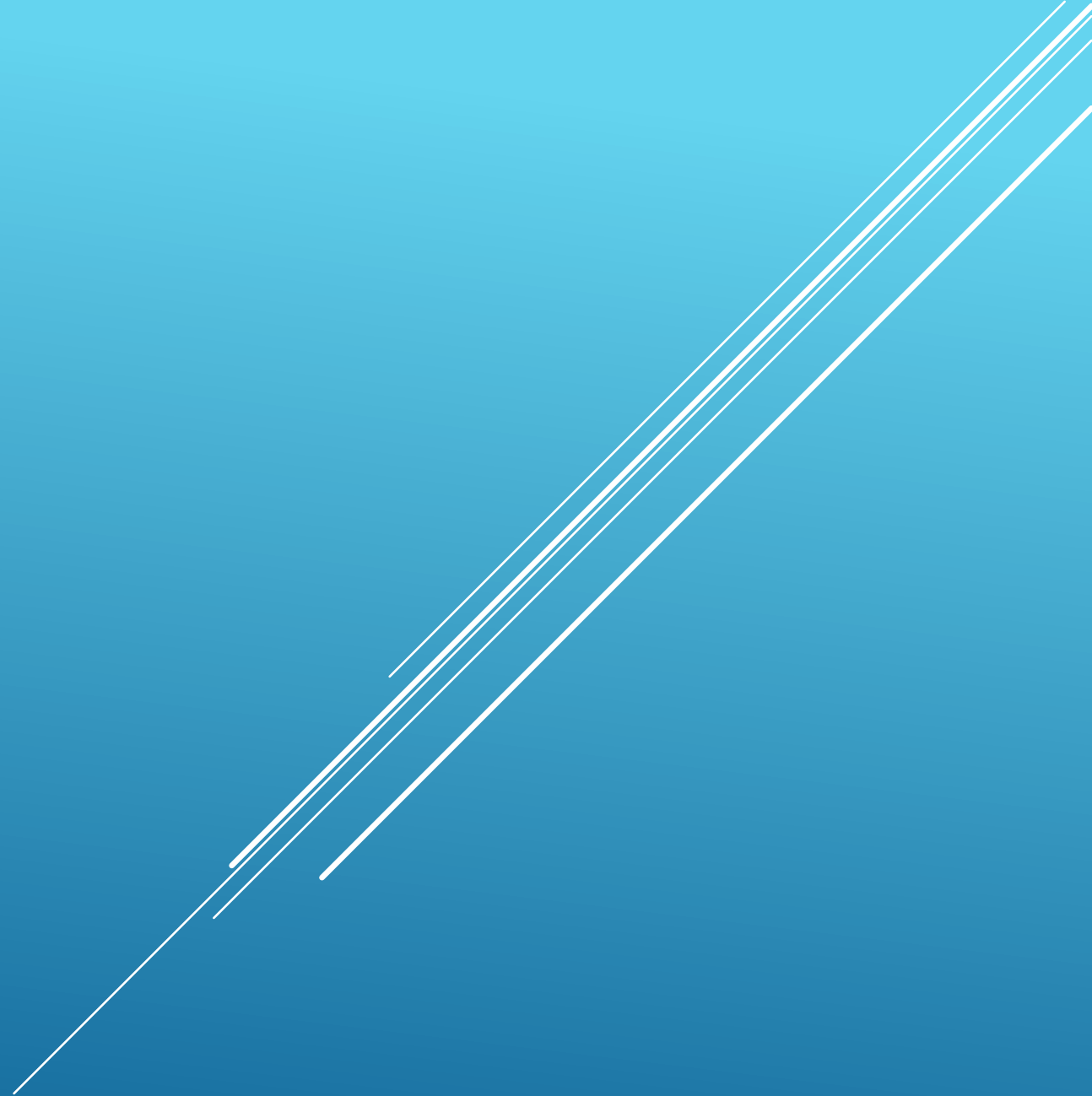


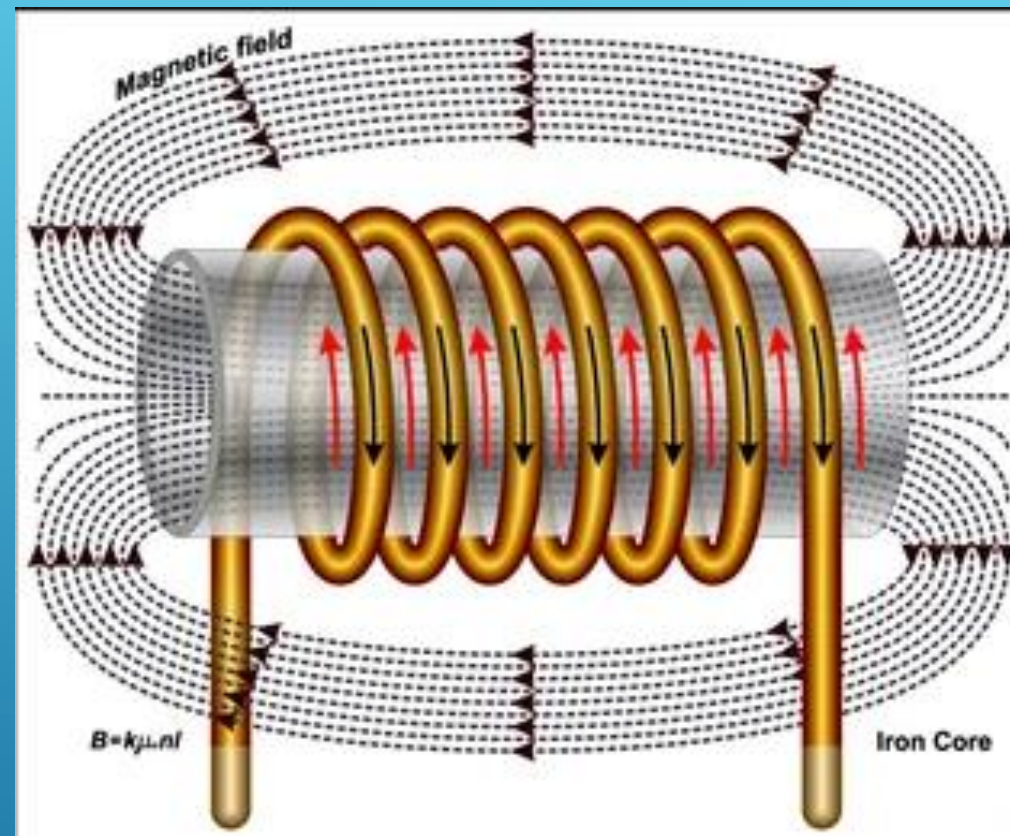
TÓPICO 3: HISTERESE



Se, em vez de corrente contínua, aplicar uma corrente alternada no fio da bobina, o material no interior da bobina será alternadamente magnetizado para a esquerda e para a direita, nesse desenho.

Como é a resposta do material à aplicação do campo alternado?

Surge a **histerese**.



HISTERESE

- ▶ Na Wikipedia em português:
- ▶ A **histerese** é a tendência de um sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou.
- ▶ A palavra "histerese" deriva do grego antigo *υστέρησις*, que significa 'retardo', que foi cunhada por J. Alfred Ewing em 1889.
- ▶ Na Wikipedia em inglês a definição é um pouco diferente:
- ▶ **Hysteresis** is the dependence of the state of a system on its history.
- ▶ For example, a magnet may have more than one possible magnetic moment in a given magnetic field, depending on how the field changed in the past.

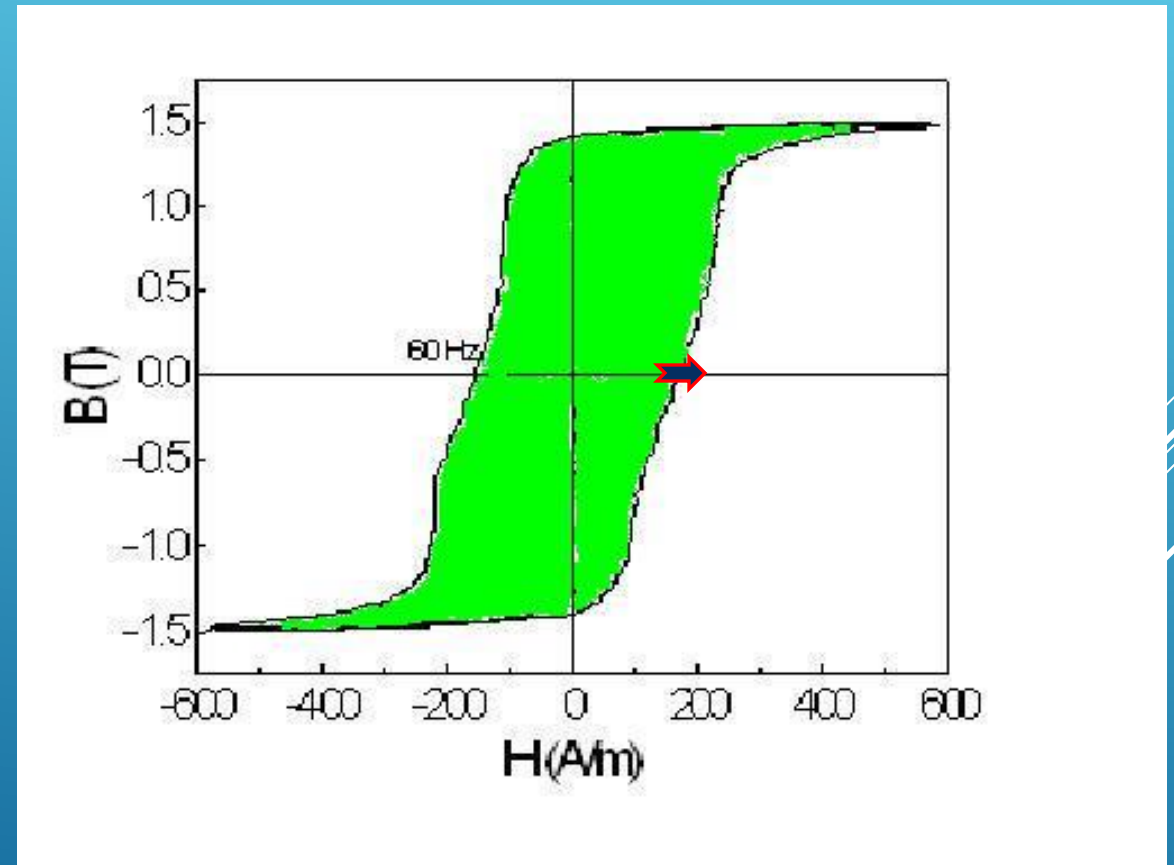
ALFRED EWING

- ▶ Nasceu em 1855, na Escócia, mesmo ano em que o Japão se abre para o Ocidente.
- ▶ Ewing estudou engenharia em Edimburg.
- ▶ Em 1878, com 23 anos, aceitou cargo de professor de engenharia em Tóquio. Ficou 5 anos, investigando inclusive magnetismo.
- ▶ Voltou para a Inglaterra e, em 1889 publicou o artigo *Time lag in the magnetization of iron*

Na revista Proceedings da Royal Society v.46, 269-86.

HISTERESE MAGNÉTICA

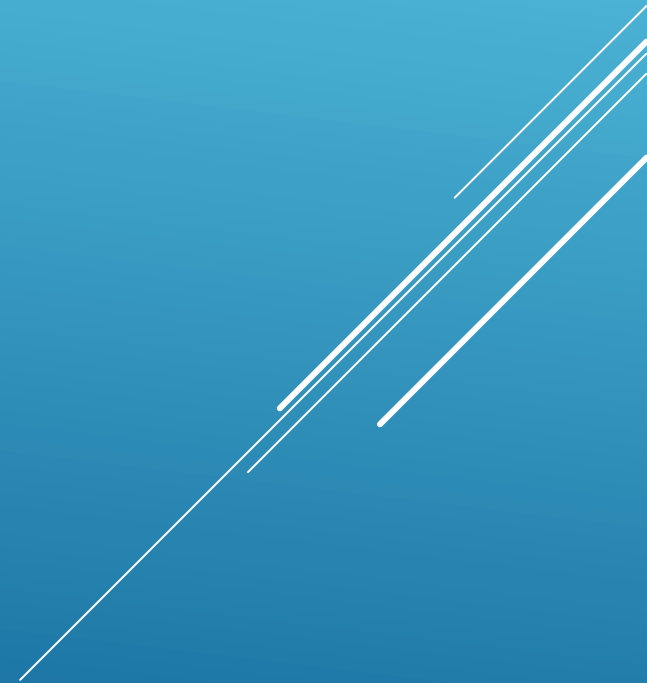
- ▶ Quando o aço é submetido a um campo magnético externo alternado, a sua magnetização não volta pelo mesmo caminho que foi: é a histerese magnética.
- ▶ A área dentro da curva corresponde à energia dissipada por ciclo.
- ▶ $W_h = B \cdot H = (\text{Vs/m}^2) \cdot (\text{A/m}) = \text{VAS/m}^3 = \text{J/m}^3$



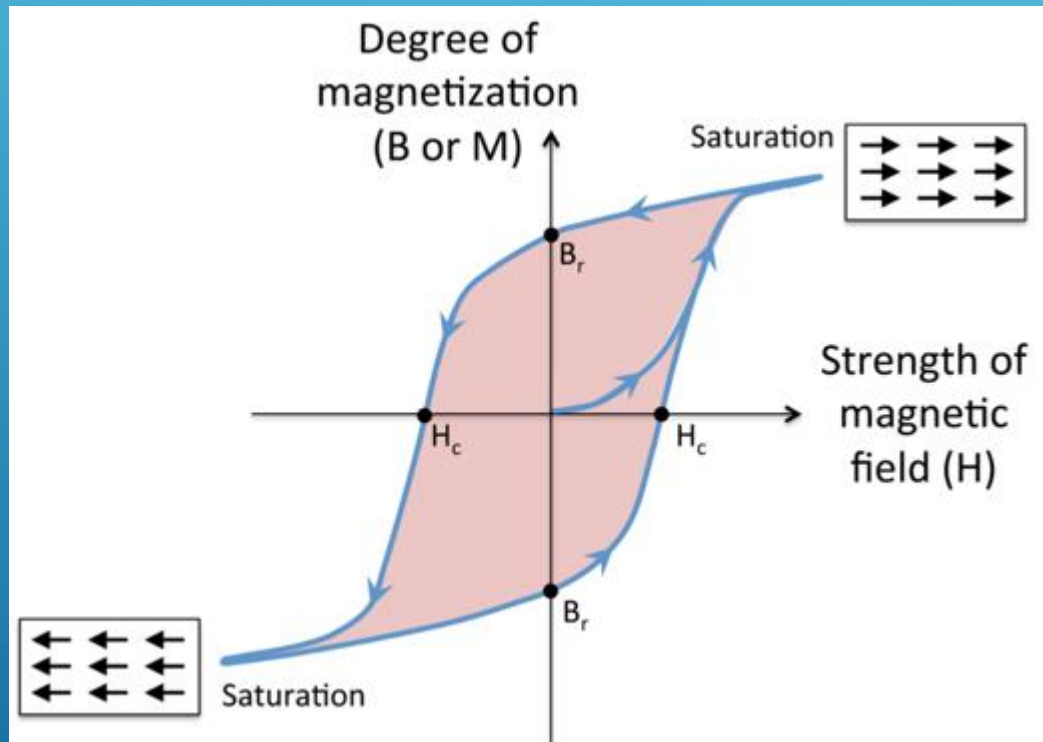
Dissipação de energia: o material esquenta ou gera ruído

Processos dissipativos

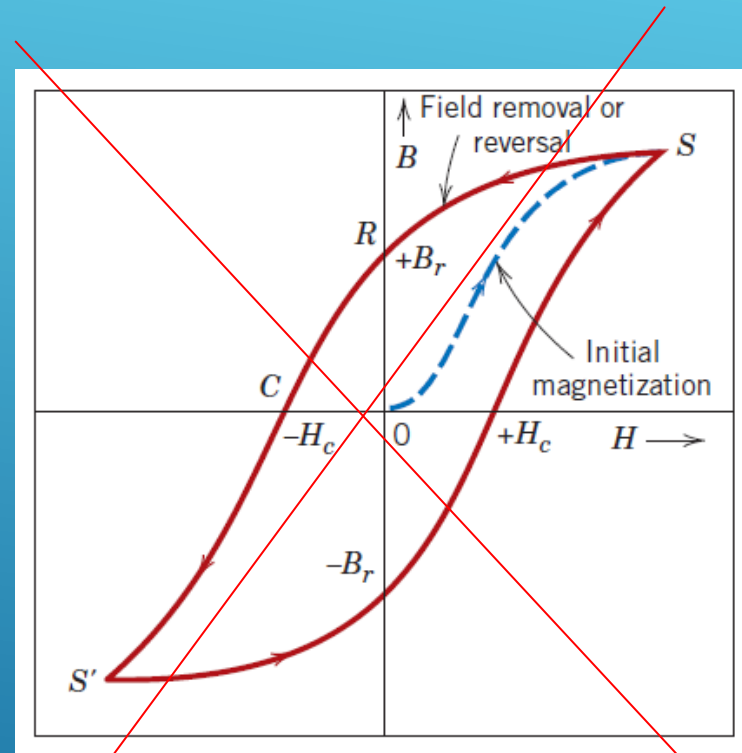
Atrito,
Movimento de discordâncias (Crystal dislocations)
Movimento de paredes de domínios
circulação de correntes elétricas “parasitas”



UM DETALHE: MAGNETIZAÇÃO E HISTERESE



Curva de histerese se junta à de magnetização



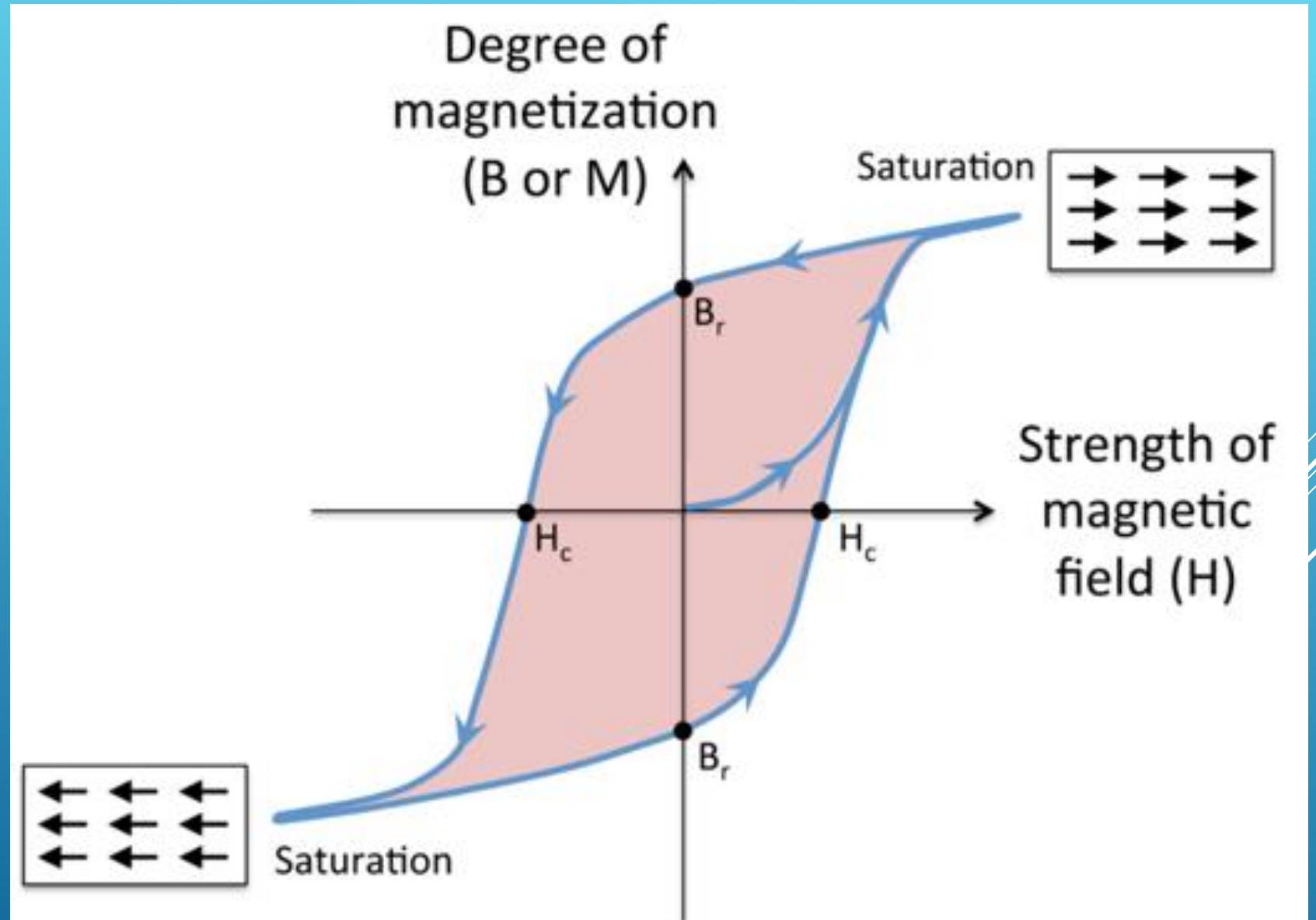
errado

Callister e muitos outros manuais

O campo coercivo, H_c , que é o campo necessário para trazer a polarização a zero mede a resistência à desmagnetização.

Para ímãs, queremos altos H_c

Para aços elétricos, queremos o menor H_c possível. Quanto menor o H_c , menor a área de histerese, menor a energia dissipada por ciclo.



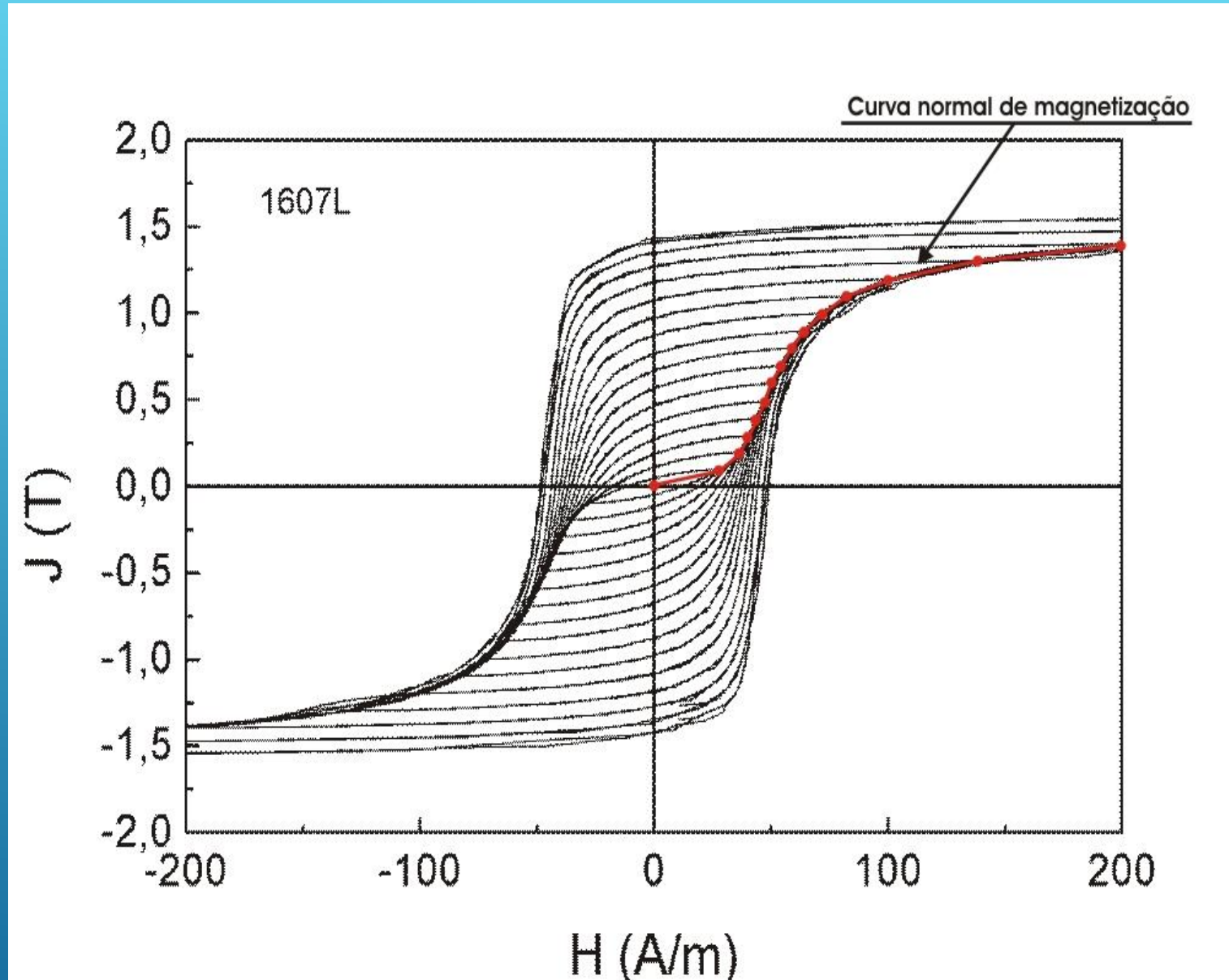
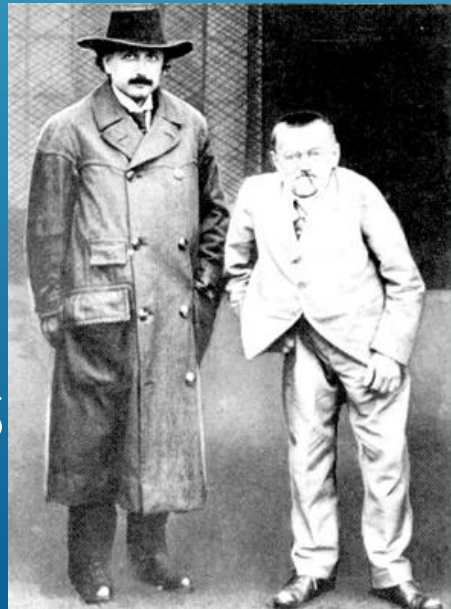
EFEITO DE B_{MAX}

Área da histerese cresce com B_{max}

Lei de Steinmetz (1892)

$$W_h = aB^{1,6}$$

Válida para muitos aços



Aço elétrico

EXPLICAÇÃO PARA O EXPOENTE 1,6 ?

- ▶ Durante o debate que seguiu a apresentação do trabalho de Steinmetz, em 1892, já surgiram ideias sobre a explicação. Propuseram que 1,6 seria $8/5$, ou seja deveria ser a combinação de algo que crescia com B^8 e algo que decrescia com B^5
- ▶ 130 anos se passaram, e ninguém trouxe uma boa explicação. Mais a frente discutiremos isso.

Na verdade esse crescimento com lei de potência tem limite, vale até da ordem de 1,5T.

Acima disso, a energia dissipada tende a diminuir o crescimento com o aumento de B_{max} .

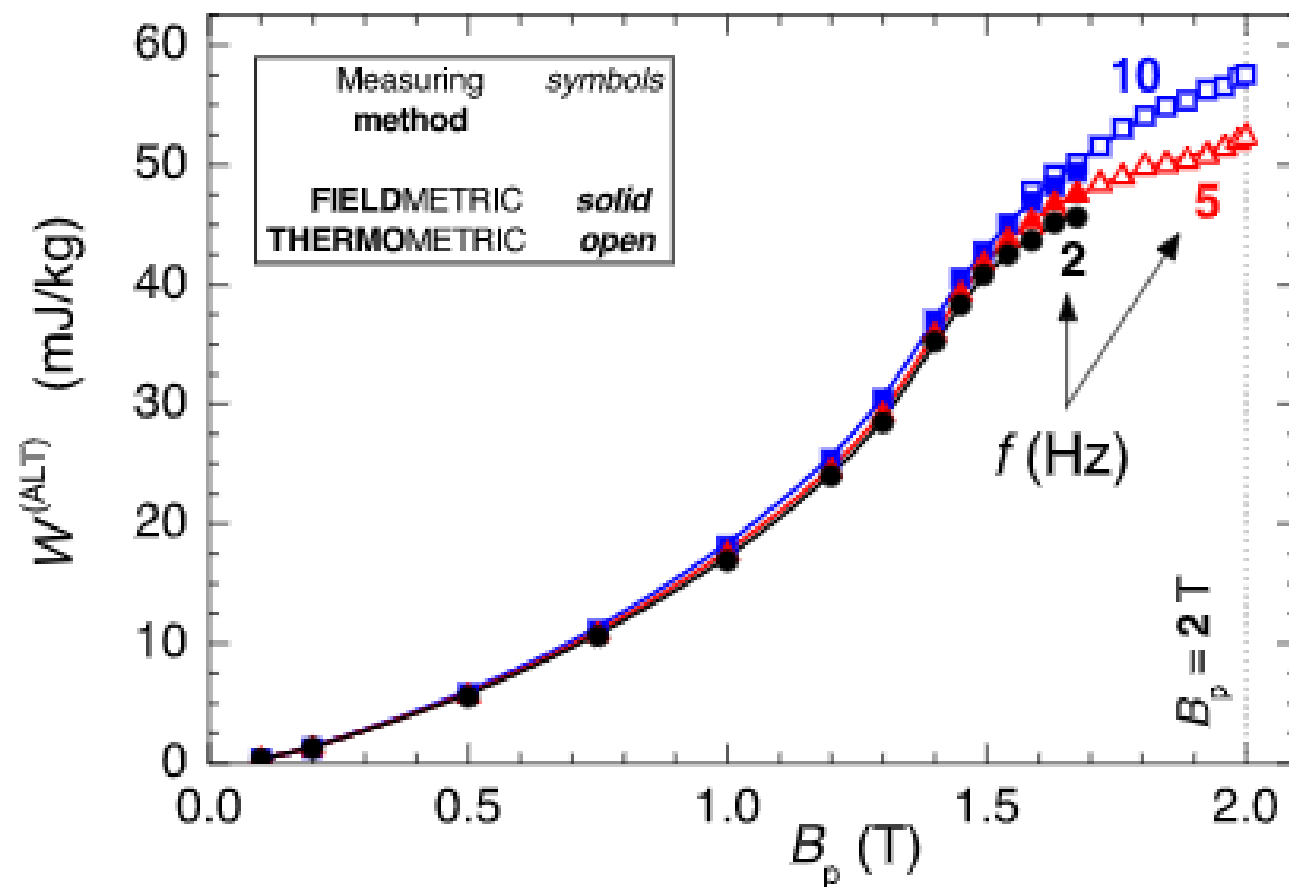
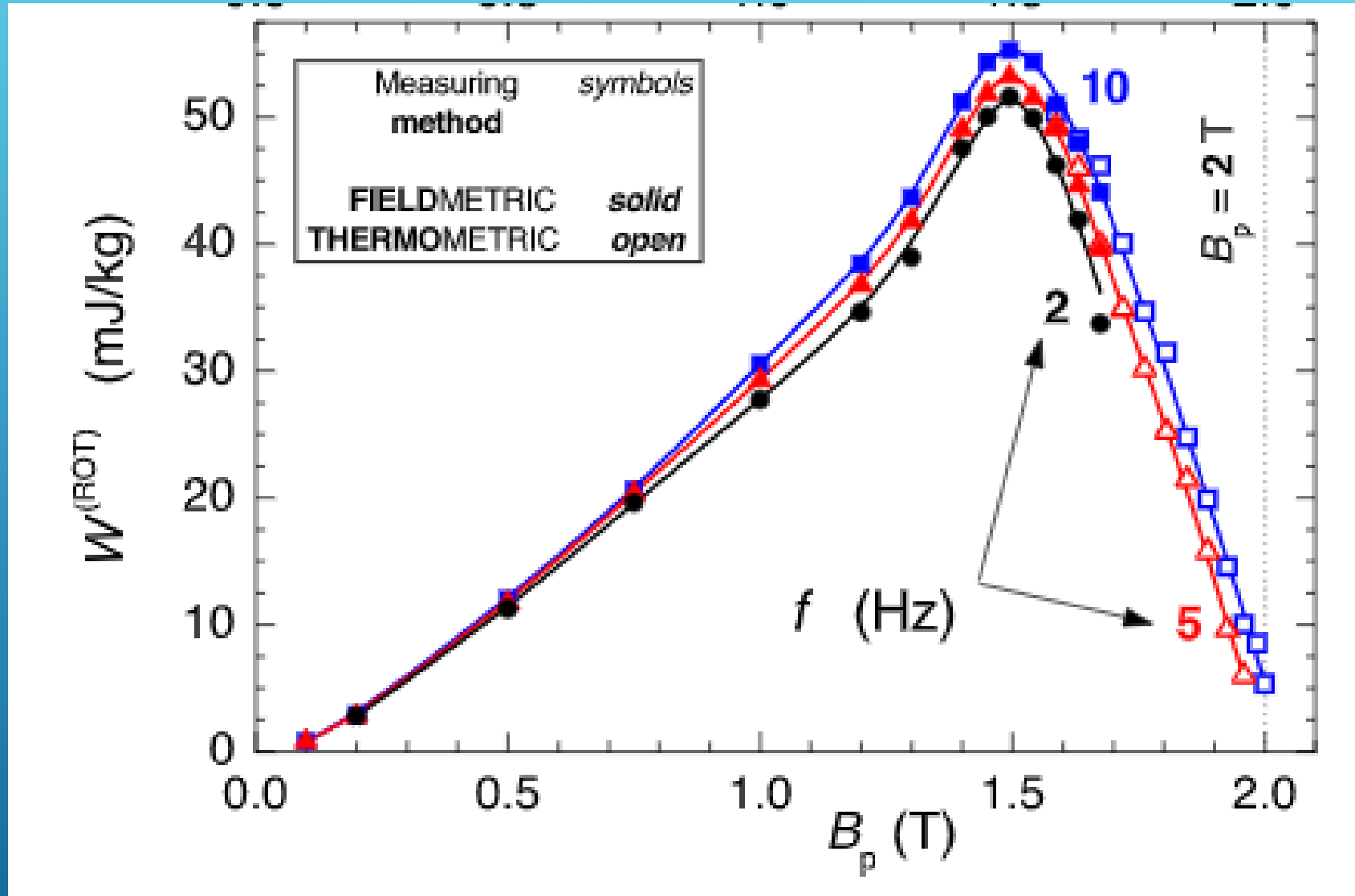


Fig. 1. Non-oriented Fe-(3.2 wt%)Si sheet. Energy loss versus peak induction under alternating sinusoidal flux in the frequency range 2 Hz–1 kHz. Note the overlapping induction region where both field-metric and thermometric measurements are performed.

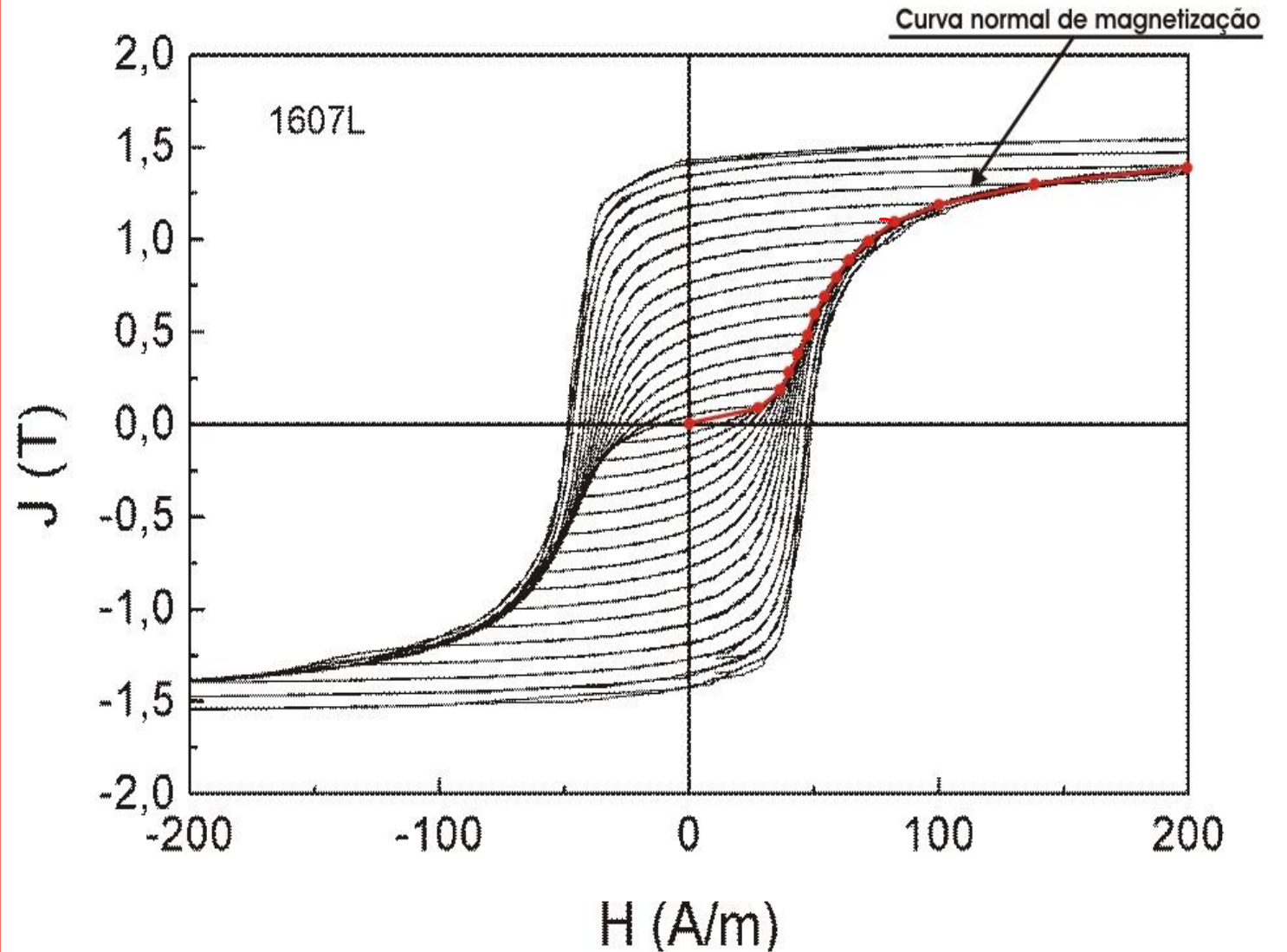
Perdas alternadas, ou unidirecionais

Perdas rotacionais passam por um máximo e tendem a zero quando B tende à saturação.

A rotação de domínios é reversível, não dissipa!



Note que a área de histerese, na região acima de 1,2T cresce apesar de que o campo coercivo não cresce muito.

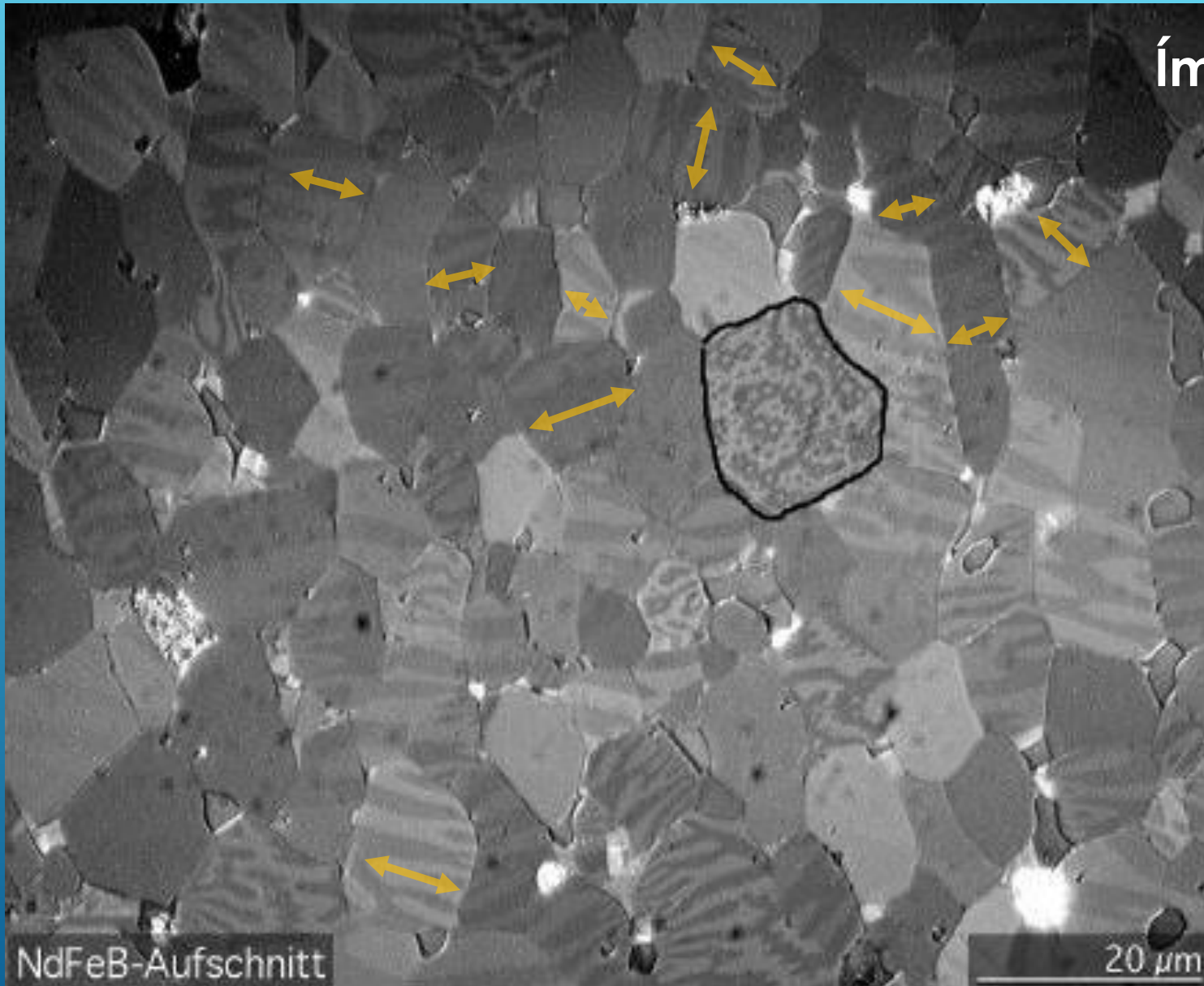


Mas o que controla o campo coercivo e a área de histerese?

Para entendermos isso, vale a pena começar olhando para um sistema mais simples, com anisotropia magnetocristalina uniaxial, ou seja, só com um eixo fácil, só com uma direção de magnetização espontânea (e não 3 como o aço elétrico).

É o caso dos ímãs de terras raras.

Ímã isotrópico desmagnetizado:



1. Cada grão tem vários domínios.
2. Dentro de cada grão as paredes são paralelas: separam domínios de mesma direção, mas sentidos contrários.
3. As paredes são paralelas à direção espontânea de magnetização, que é uma direção cristalina [001] do cristal.
4. nota-se paredes de domínios em todas as direções
5. Ímã é isotrópico: pela direção das paredes se vê que existem cristais em todas as direções e portanto, domínios em todas as direções e sentidos.
6. No estado desmagnetizado, somatório vetorial dos momentos é zero.

No estado desmagnetizado, juntando todas as direções de M num só ponto, somatória da zero.

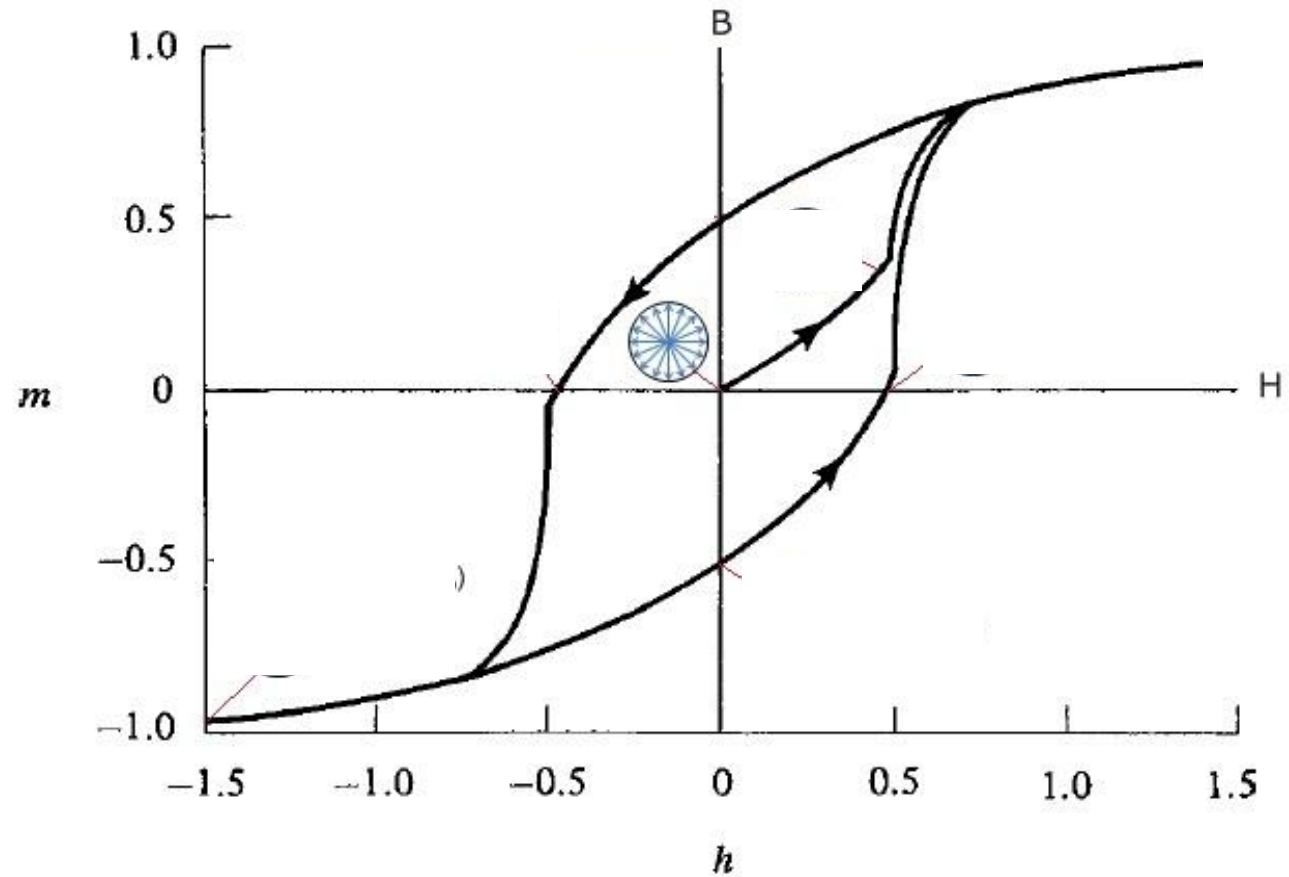


Fig. 9.37 Hysteresis loop of an assembly of noninteracting, randomly oriented, uniaxial single domain particles. [B. D. CULLITY]

Aplicando H na horizontal para a direita, os domínios que sentem o maior campo desmagnetizante são os que tem direção horizontal para a esquerda. Eles desaparecem por movimento de parede.

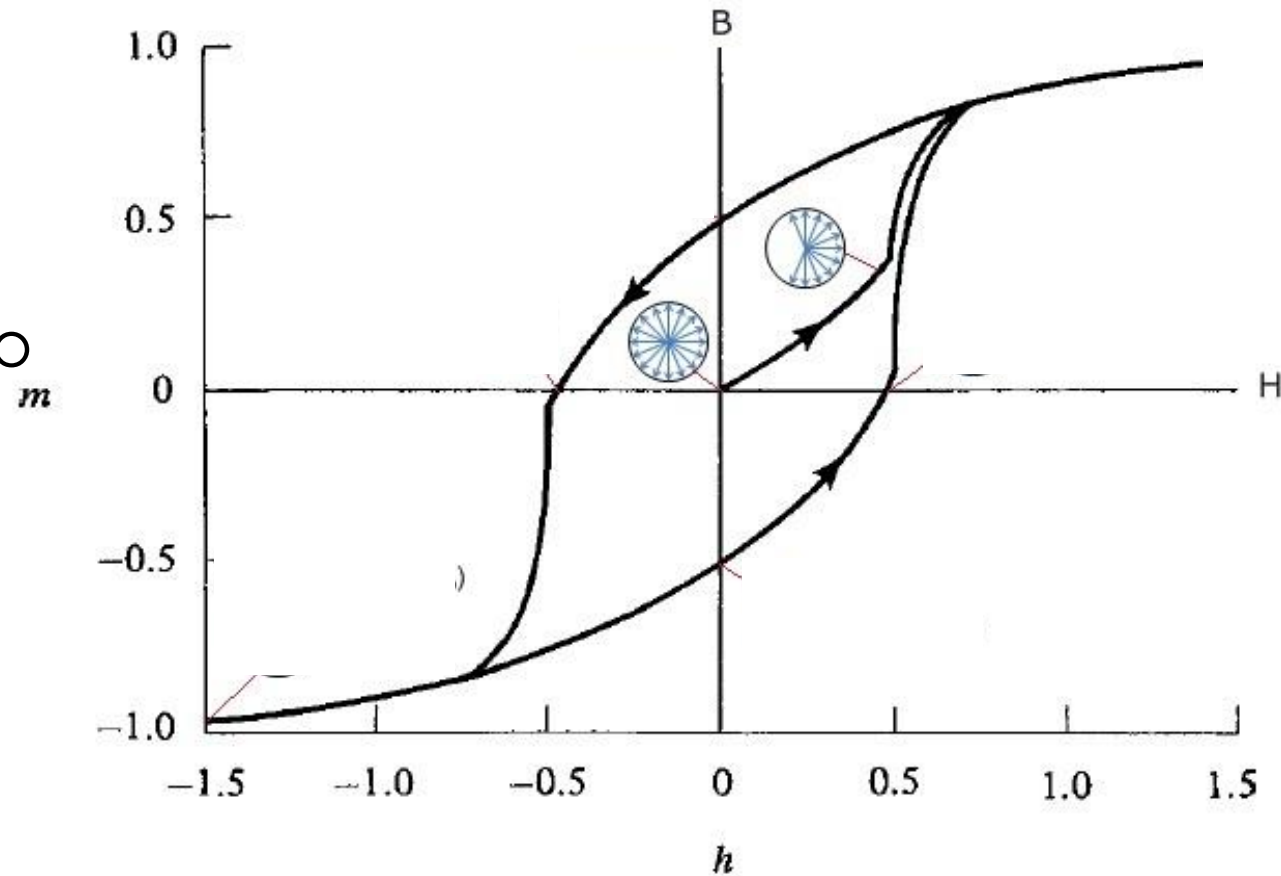


Fig. 9.37 Hysteresis loop of an assembly of noninteracting, randomly oriented, uniaxial single domain particles. [B. D. CULLITY]

A partir de certo ponto, cada grão só tem um domínio, orientado na direção de magnetização espontânea daquele cristal. A partir dali, B só cresce por **ROTAÇÃO DE DOMÍNIOS**

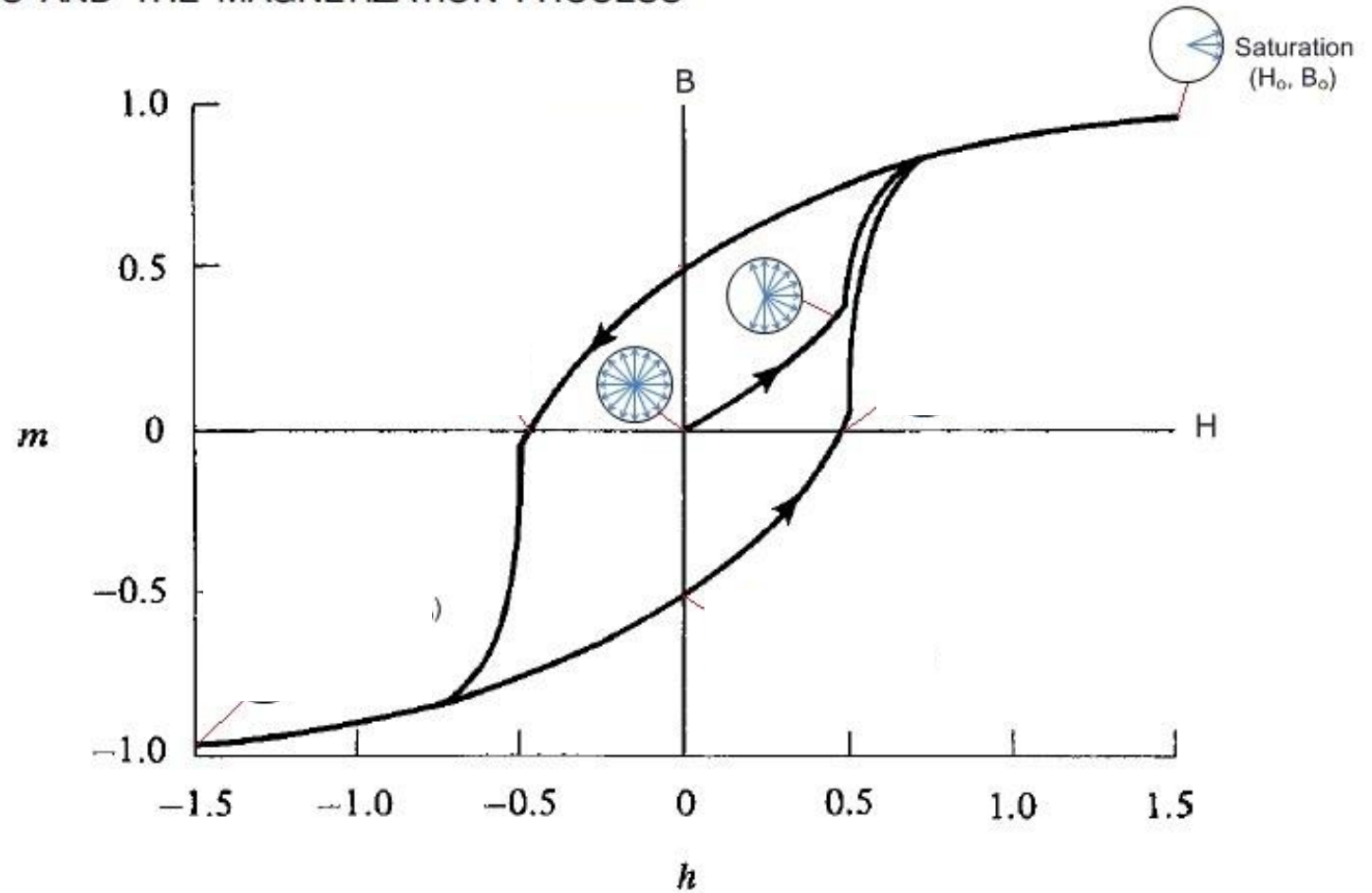


Fig. 9.37 Hysteresis loop of an assembly of noninteracting, randomly oriented, uniaxial single domain particles. [B. D. CULLITY]

Reduzindo H para zero, os domínios espontaneamente voltam para suas direções espontâneas, sobrando uma magnetização residual, a Remanência B_r

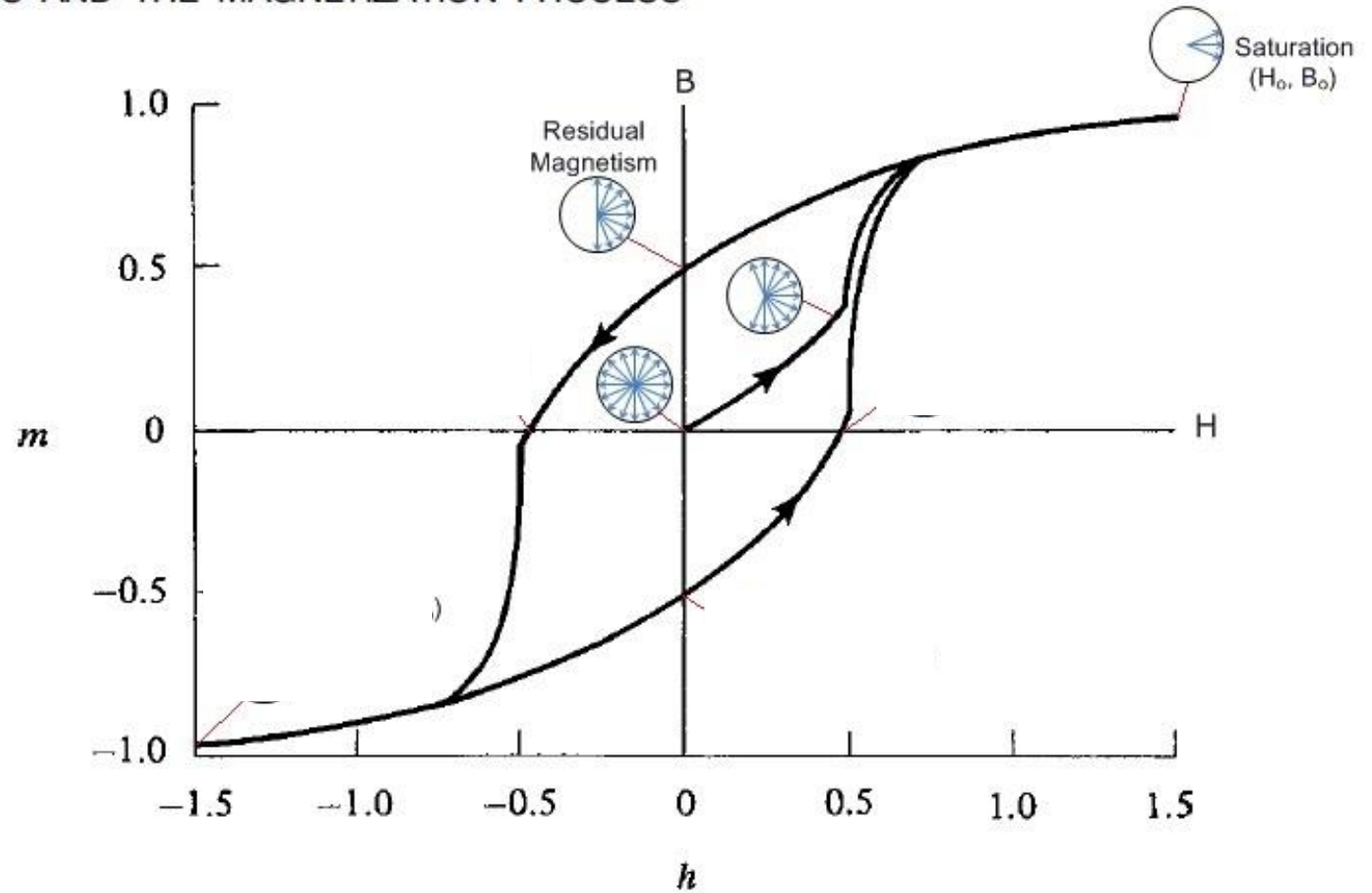
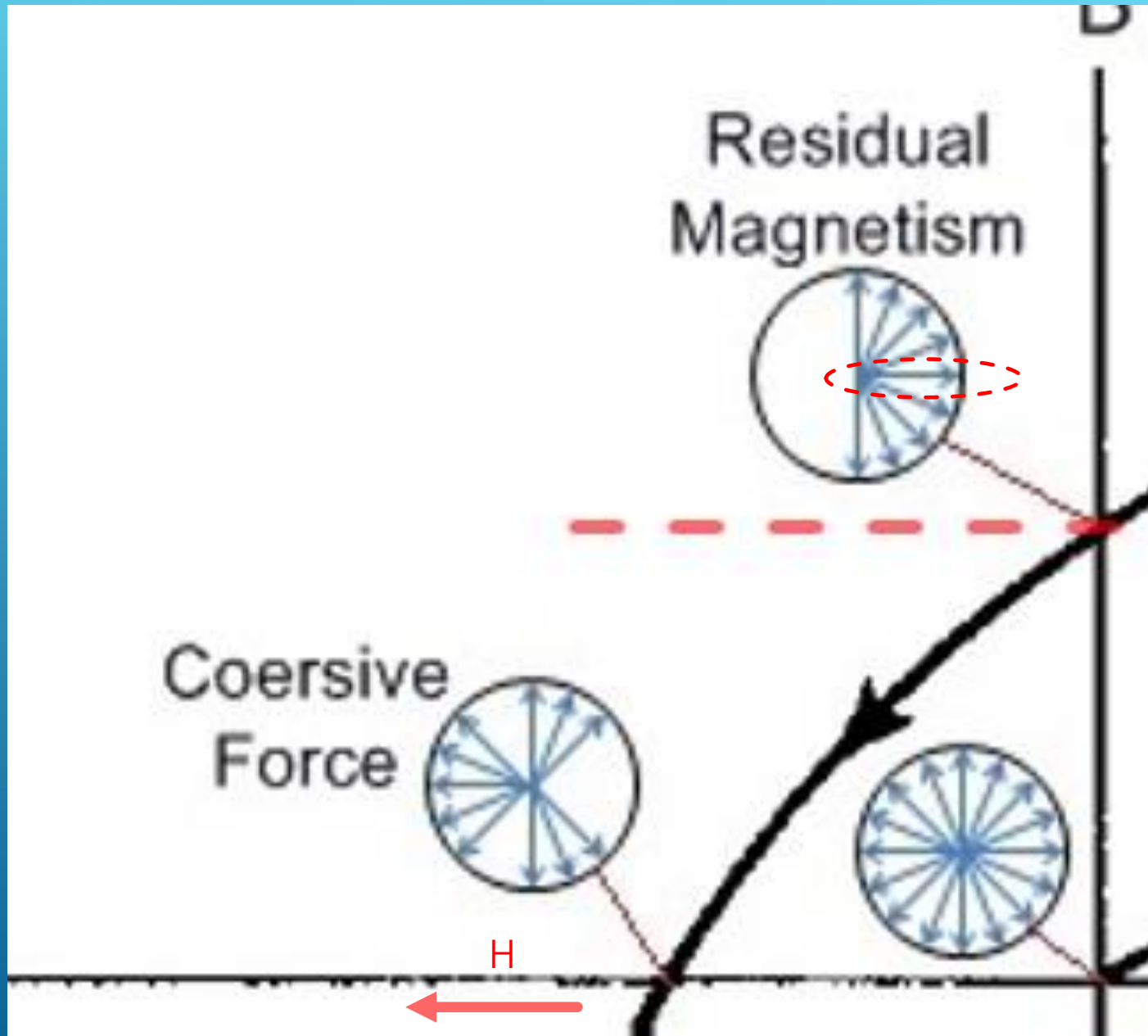


Fig. 9.37 Hysteresis loop of an assembly of noninteracting, randomly oriented, uniaxial single domain particles. [B. D. CULLITY]



Notar que “idealmente”, a remanência foi alcançada por rotação de domínios.

No 2º quadrante tem que acontecer a nucleação de domínios na direção contrária à original. Isso acontece em grãos em que a energia magnetostática é máxima.

HISTERESE E ESTRUTURA DE DOMÍNIOS

Anisotropia uniaxial

Mudanças na estrutura de domínios durante a magnetização, representada pela projeção dos vetores de magnetização de todos os domínios num só ponto

318 DOMAINS AND THE MAGNETIZATION PROCESS

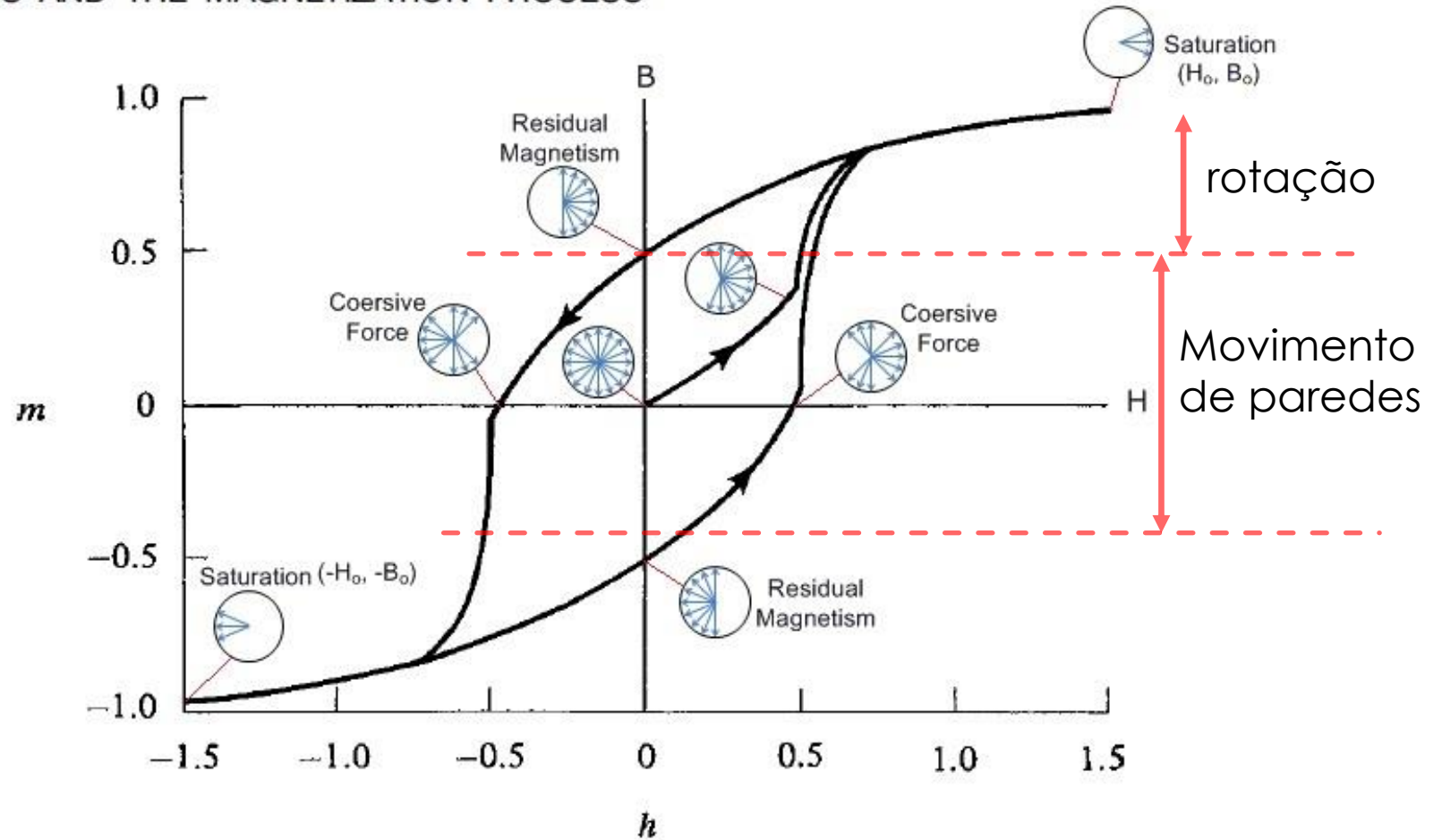


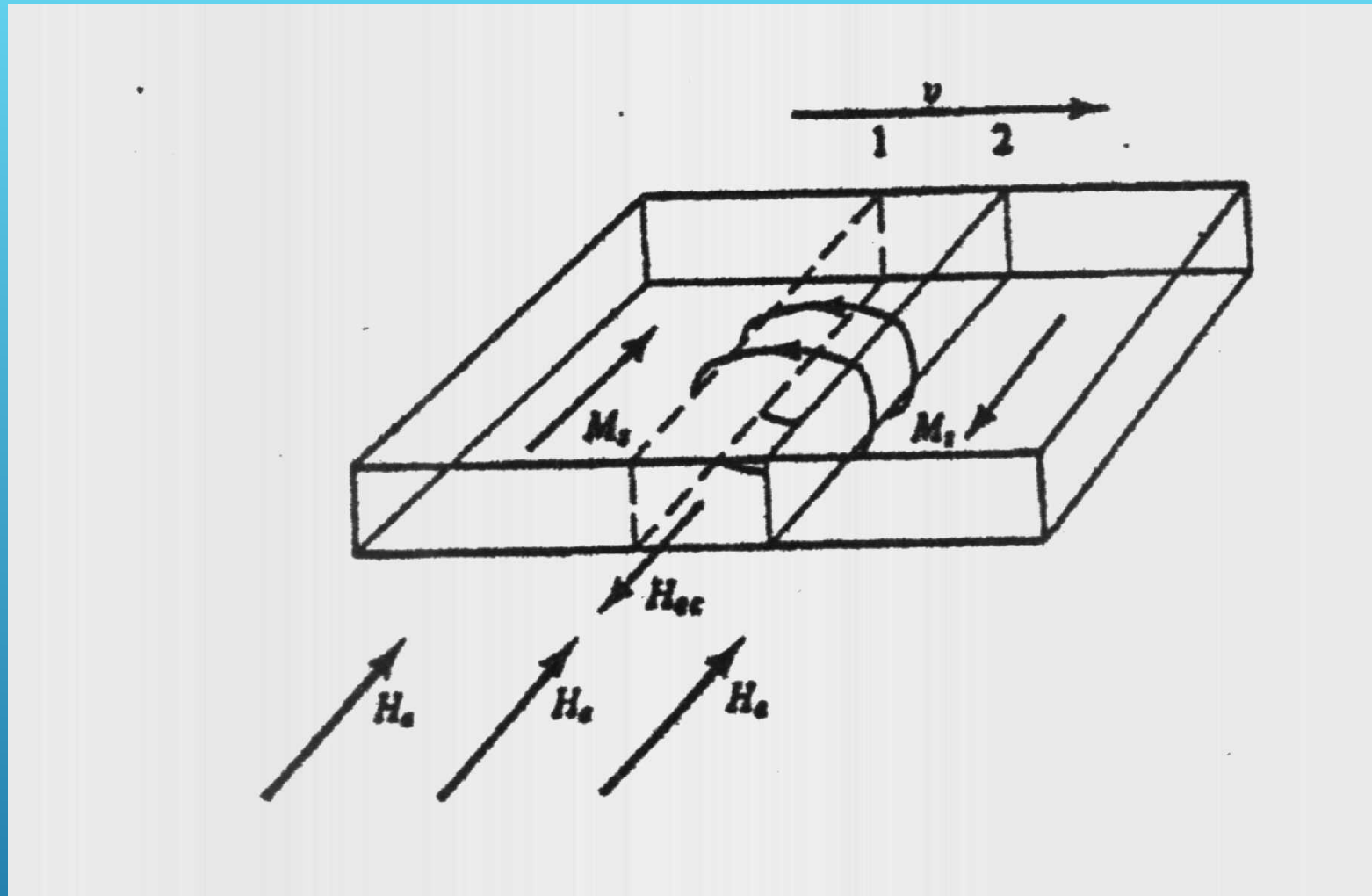
Fig. 9.37 Hysteresis loop of an assembly of noninteracting, randomly oriented, uniaxial single domain particles. [B. D. CULLITY]

Relembrando da última aula, o movimento de uma parede dissipa energia:

Quando a parede se move, acontece uma inversão da magnetização.

Quanto mais rápido isso acontecer, maior o dB/dt , e portanto, maior a ddp gerada em torno da parede, que gerará a circulação de uma corrente elétrica.

Pronto, tenho uma potência dissipada: $P = VI = V^2/R$ (J/s), ou seja, por Efeito Joule.



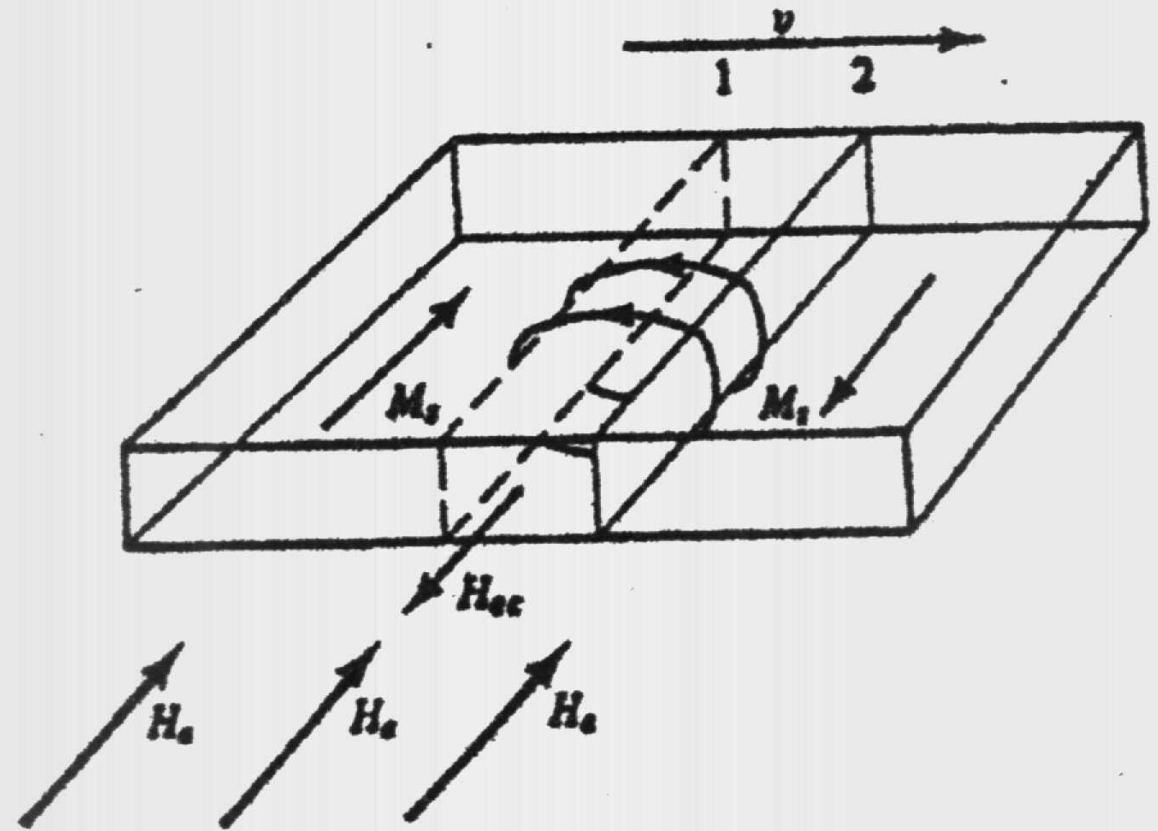
A potência dissipada se transforma em calor

Se a corrente elétrica parasita fosse o único mecanismo de dissipação de calor ($P = VI = V^2/R$), as cerâmicas magnéticas, que tem uma resistividade milhão de vezes maior que o aço, deveria dissipar muito menos energia.

Entretanto, para mesmas induções máximas, a perda histerética é semelhante!

E mesmo nos aços, a perda histerética (perda quase estática) praticamente não depende do teor de silício.

Não me refiro as perdas em frequência.

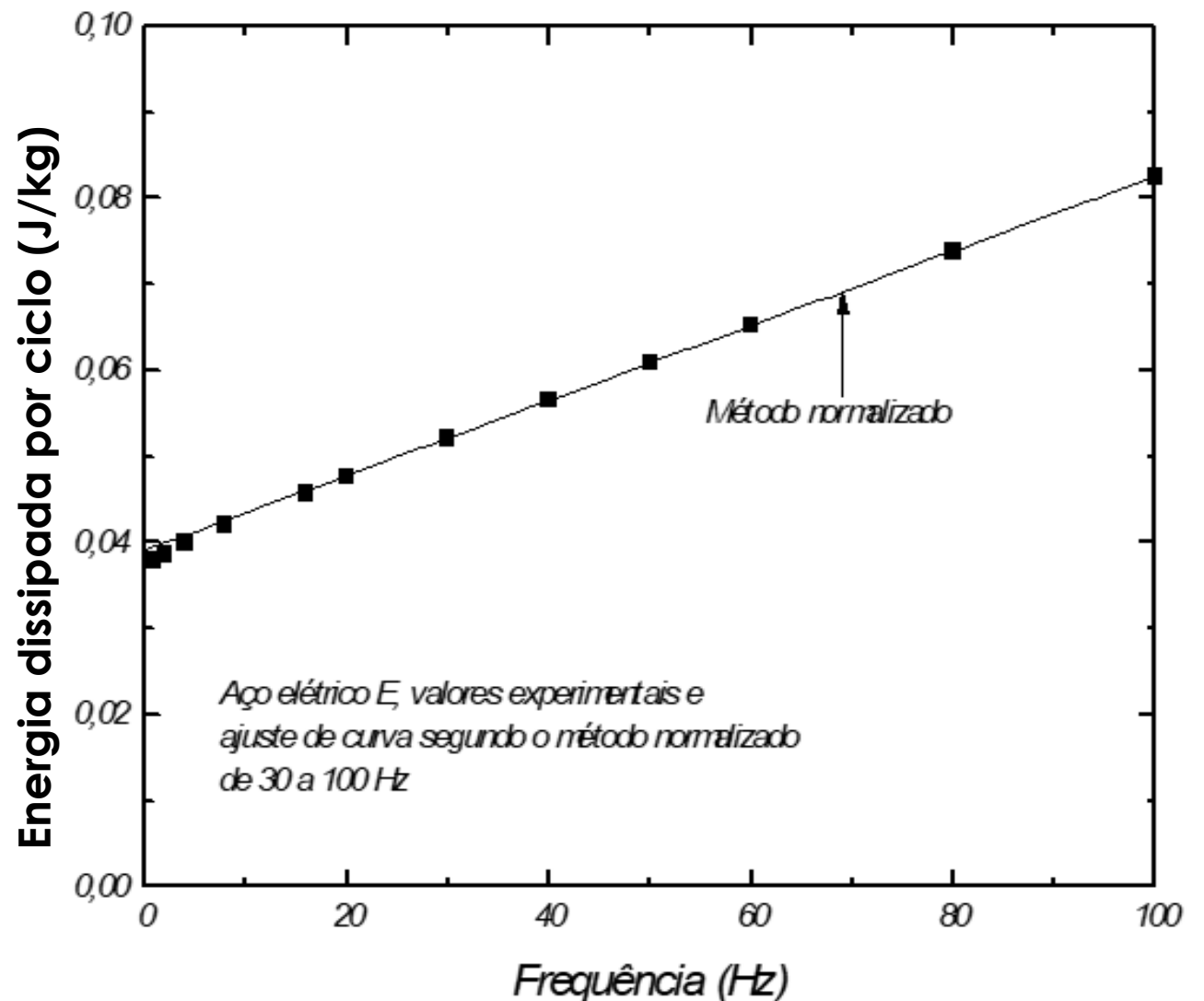


Mesmo quando se reduz a frequência de variação da indução a valores muito baixos, tipo mHz, ainda assim ocorre a histerese e dissipa-se energia.

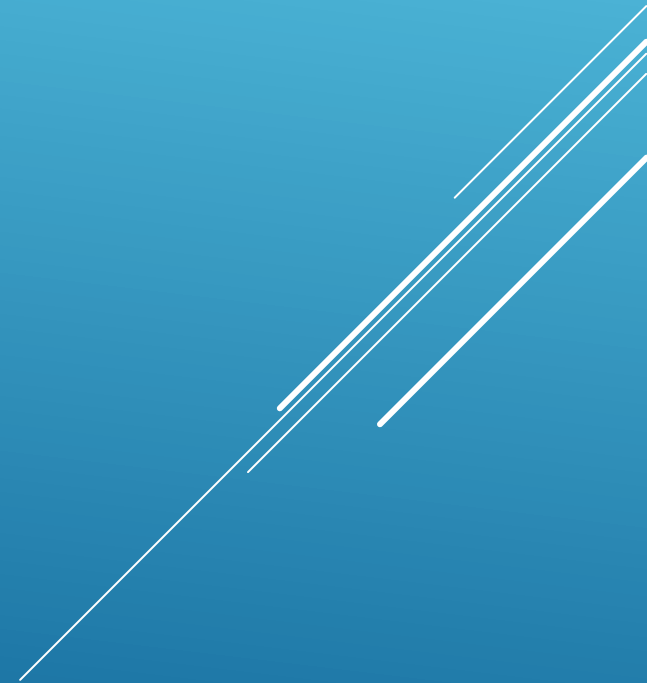
Como isso é possível?

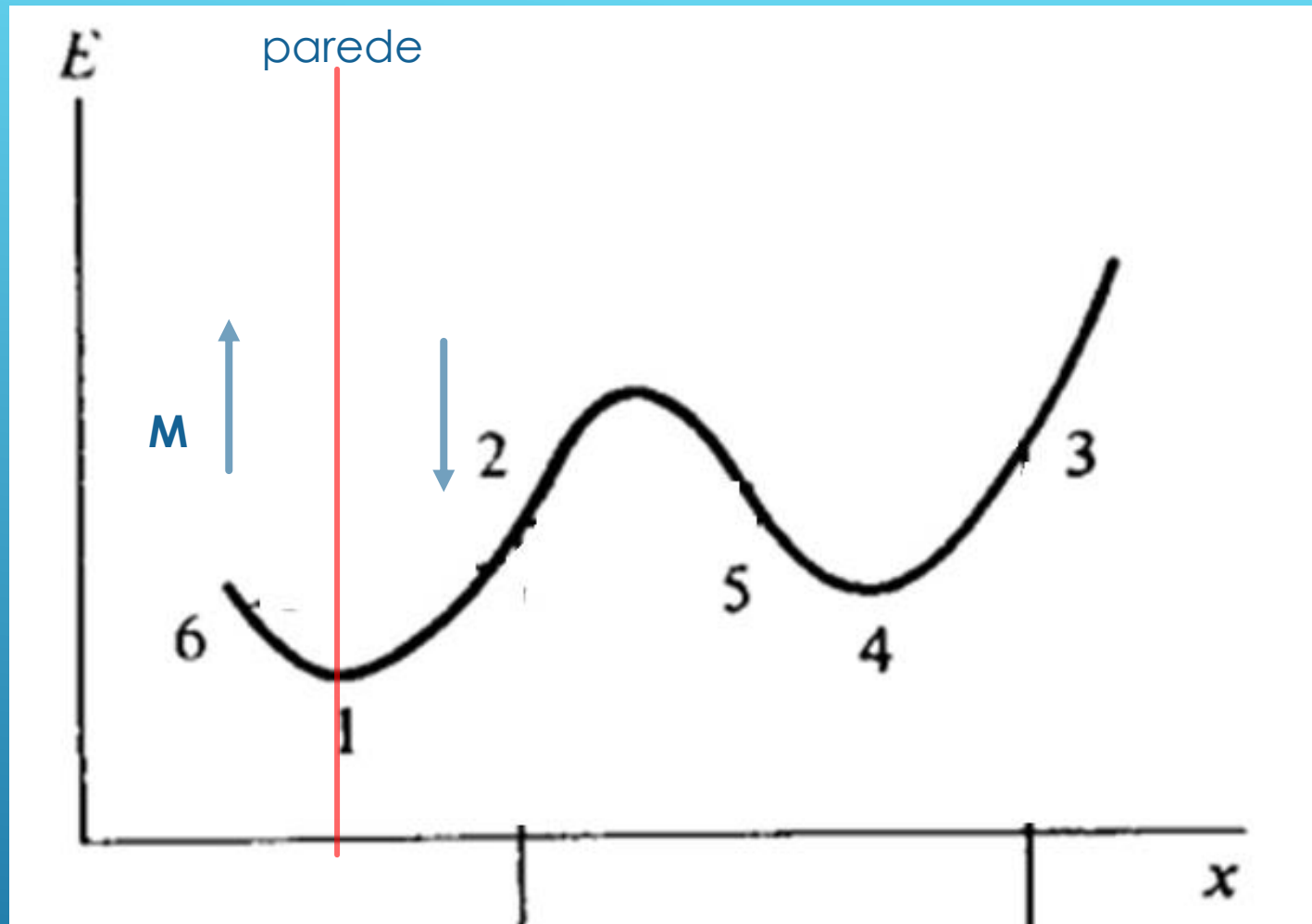
Um dos motivos é que mesmo quando a variação de B é infinitamente lenta, a velocidade de movimento das paredes não é infinitamente lenta!

Como assim?

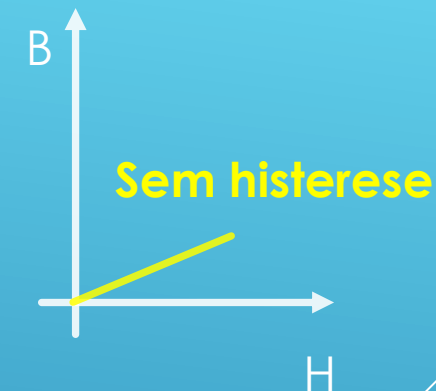
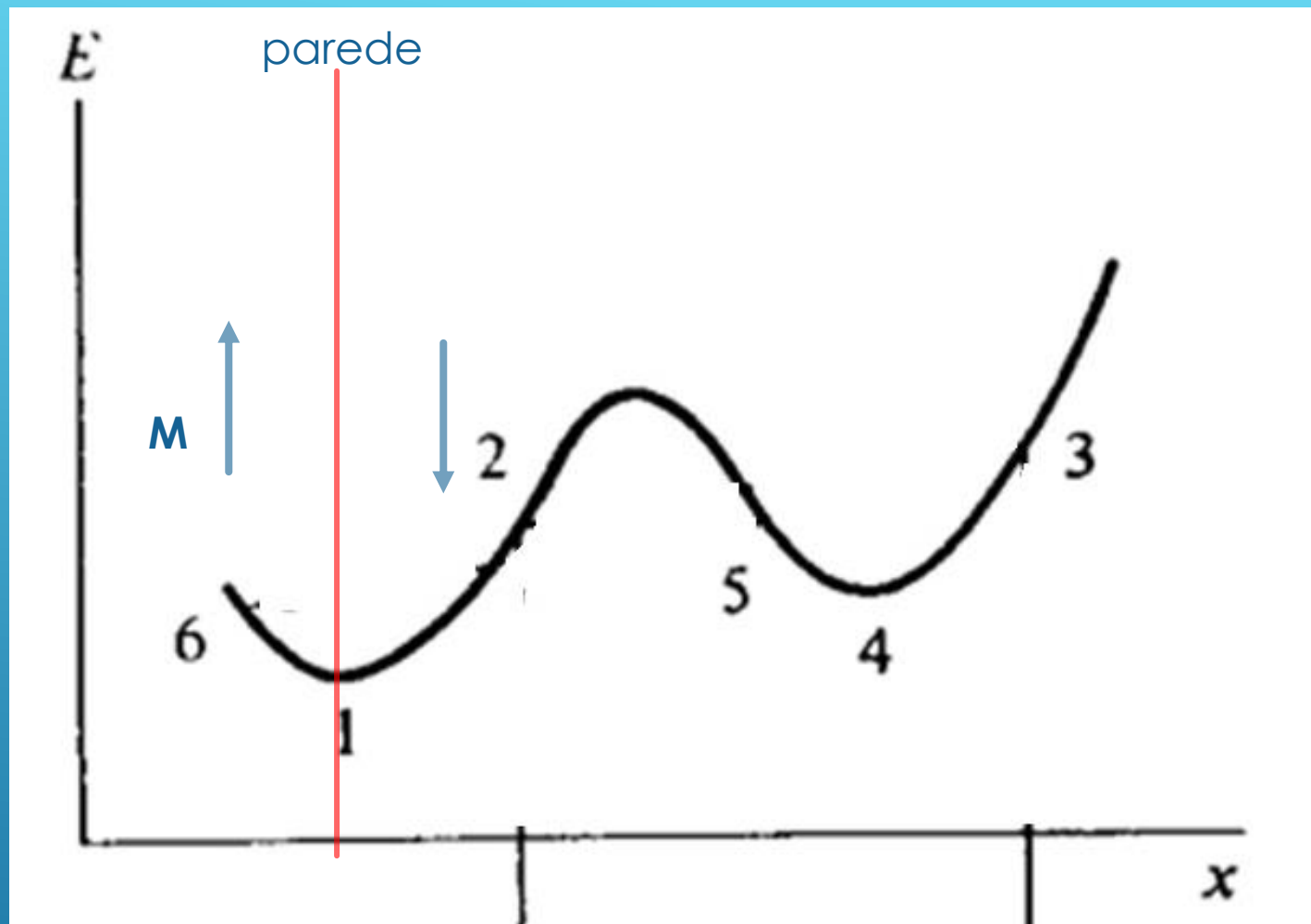


Retomando a aula dia 05/05

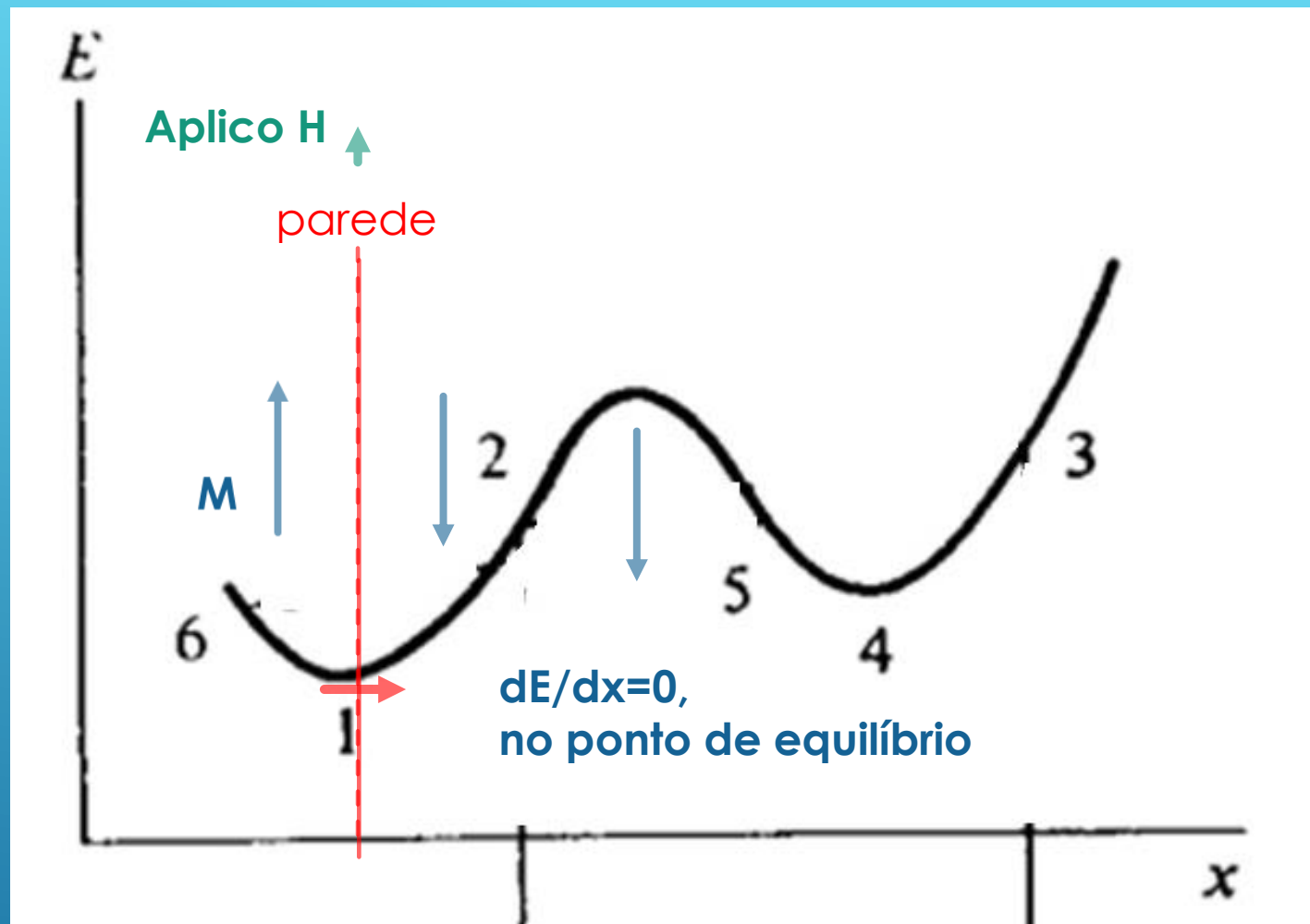




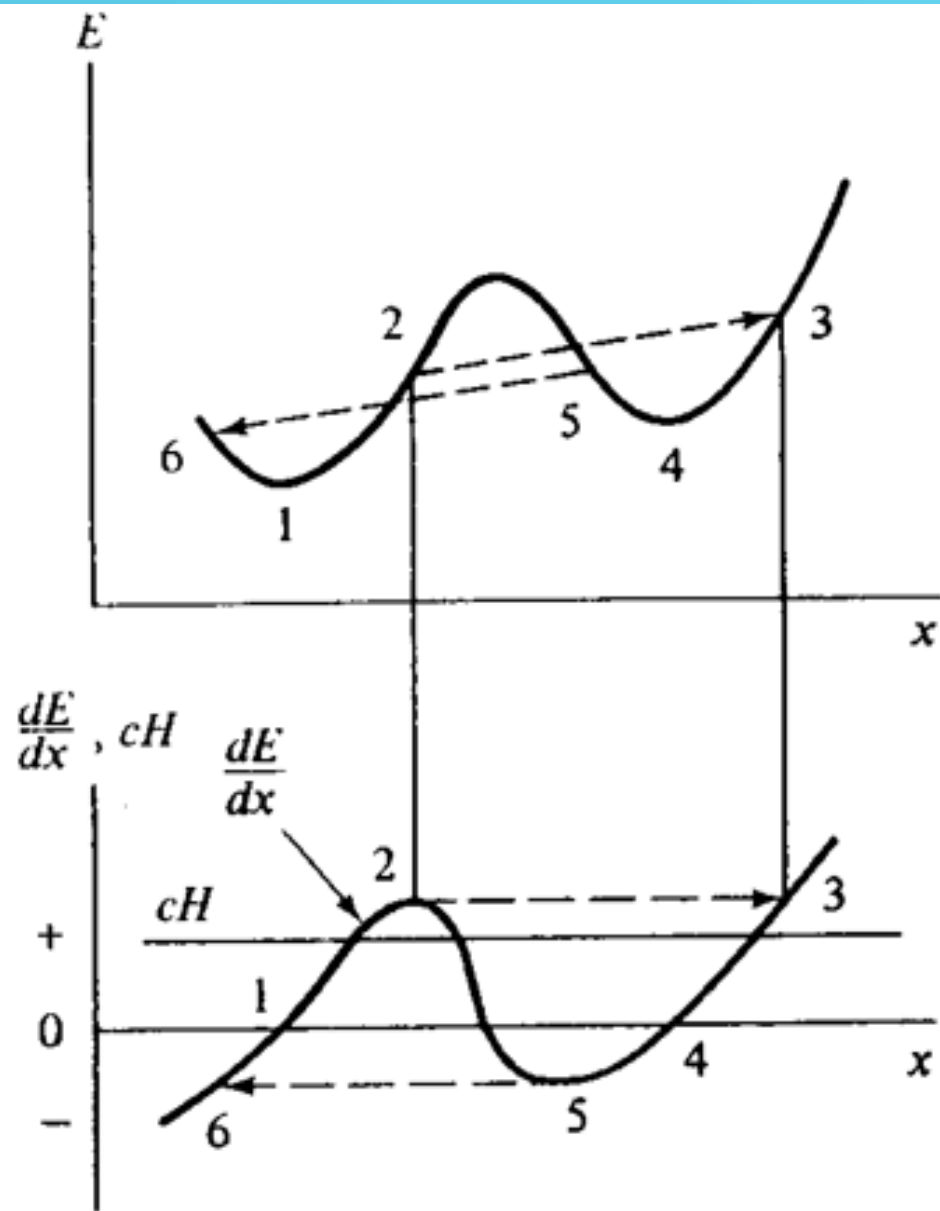
Quando $H=0$, as paredes ficam em posições de mínima energia.
Vamos fazer um gráfico de energia do sistema em função da posição espacial.
Neste desenho, inicialmente, o mínimo de energia existe quando a parede está no o ponto 1.



Quando aplico um valor pequeno de H , a parede se move um pouco para a direita até que a redução da energia magnetostática seja equilibrada pelo aumento da derivada da energia E do sistema. Se H for reduzido a zero, a parede volta para o ponto 1. Esse foi um movimento reversível da parede, e não dissipa energia. Não ocorreu histerese.



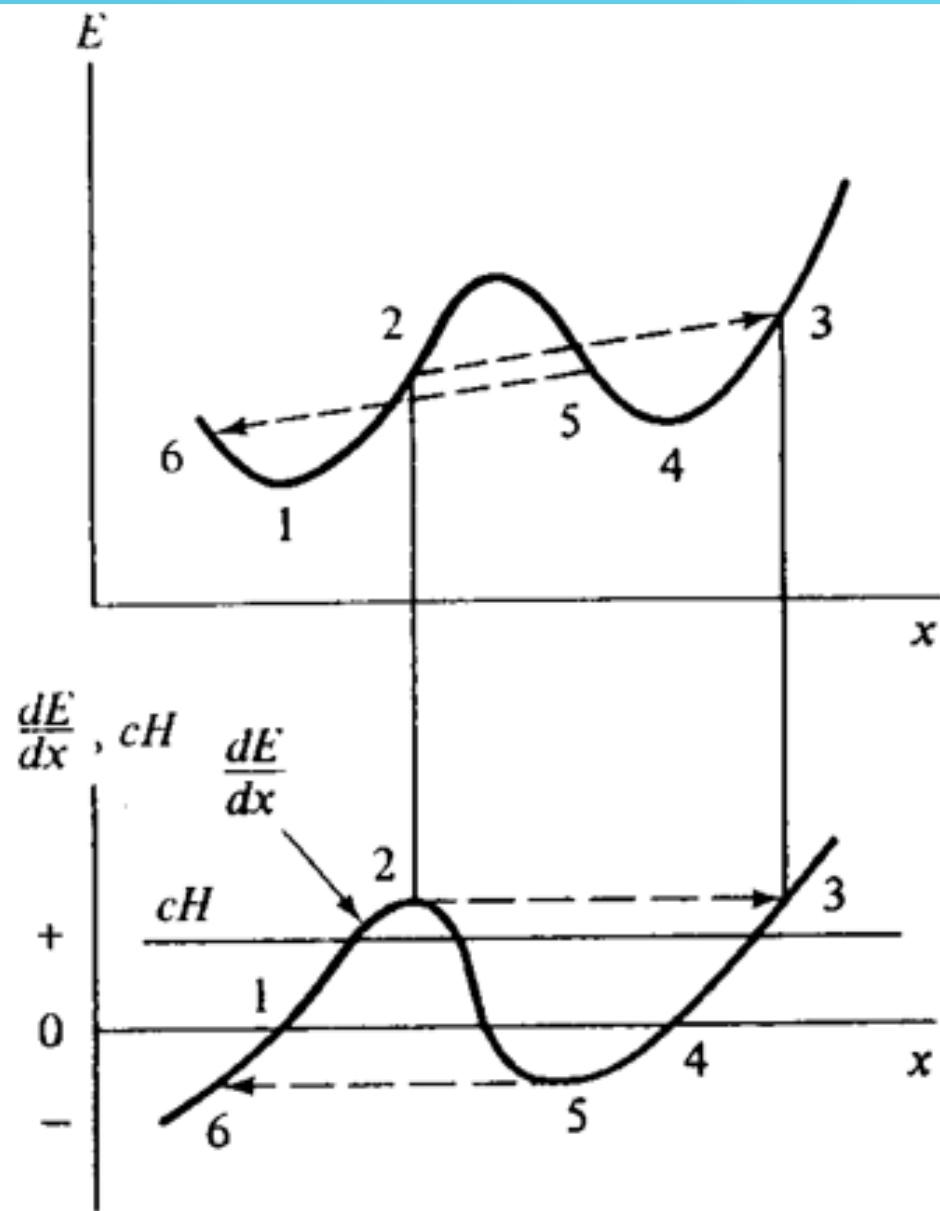
Como a derivada da energia com a distância é uma força, posso dizer que para tirar a parede do mínimo de energia, eu preciso aplicar uma força $H = dE/dx$



A partir do gráfico de $E(x)$
É possível construir um gráfico de dE/dx .

Os pontos 1 e 4 são mínimos de energia, a derivada é nula, sem aplicar $H (=dE/dx)$ a parede volta para esses pontos.

Aumentando H a parede se move até a derivada dE/dx ser mais forte que o H aplicado. Quando o aumento de H for suficiente para levar a parede até o ponto 2, que é um ponto de máxima derivada, nada impede a continuação do movimento da parede, ou melhor, o movimento será barrado quando a derivada maior o impeça. Aquele H aplicado foi capaz de levar a parede até o ponto 3.



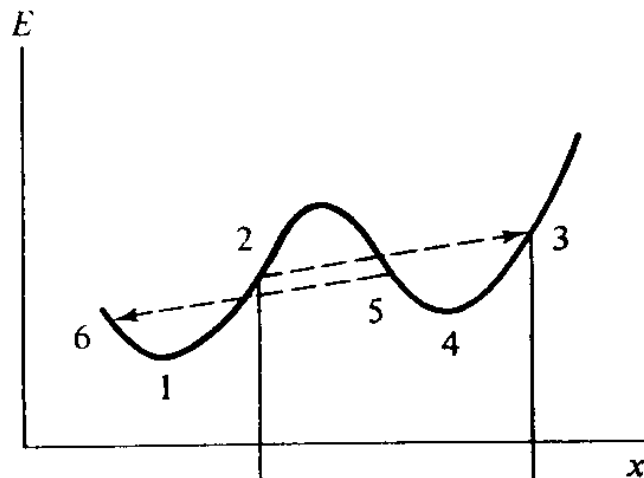
Se nesse ponto, H for diminuído até zero, a parede vai ao mínimo de energia mais próximo, que é o ponto 4. Não volta para 1, pois existe uma barreira de energia no caminho.

Se o campo for invertido, conforme aumenta H invertido a parede se move de 4 para 5.

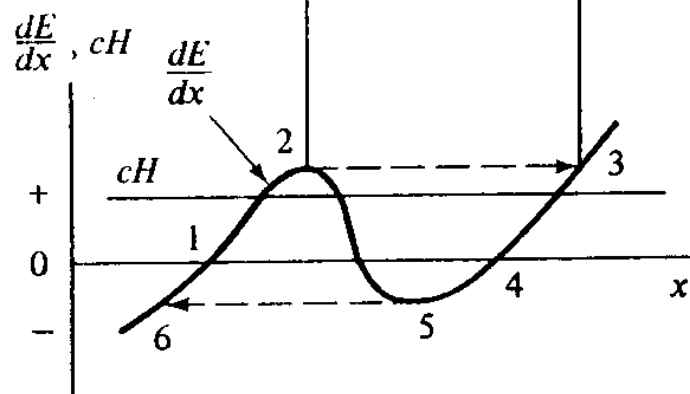
Como o ponto 5 é de derivada máxima negativa, se a H levou a parede até ali, a partir dali ela se move espontaneamente até o próximo ponto de derivada maior, que contém a parede, o ponto 6.

Se o campo for reduzido a zero, a parede volta ao ponto 1.

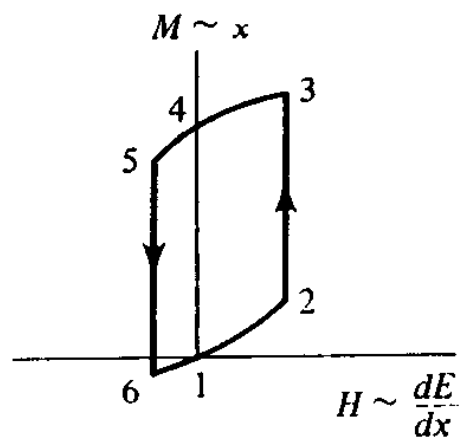
(a)



(b)



(c)



É possível construir a curva de histerese correspondente.

Se o ponto 1 é uma condição desmagnetizada, $M=0$.

Aplicando H , cresce M moderadamente até 2

Nesse ponto, sem precisar aumentar H , a parede se move até 3, e a magnetização cresce.

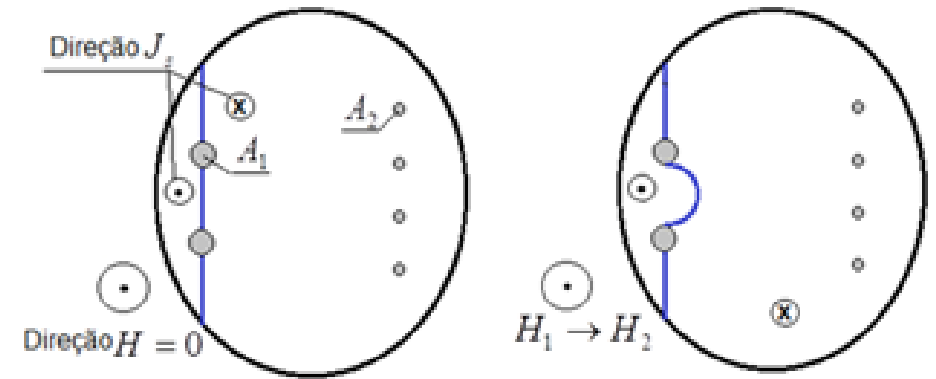
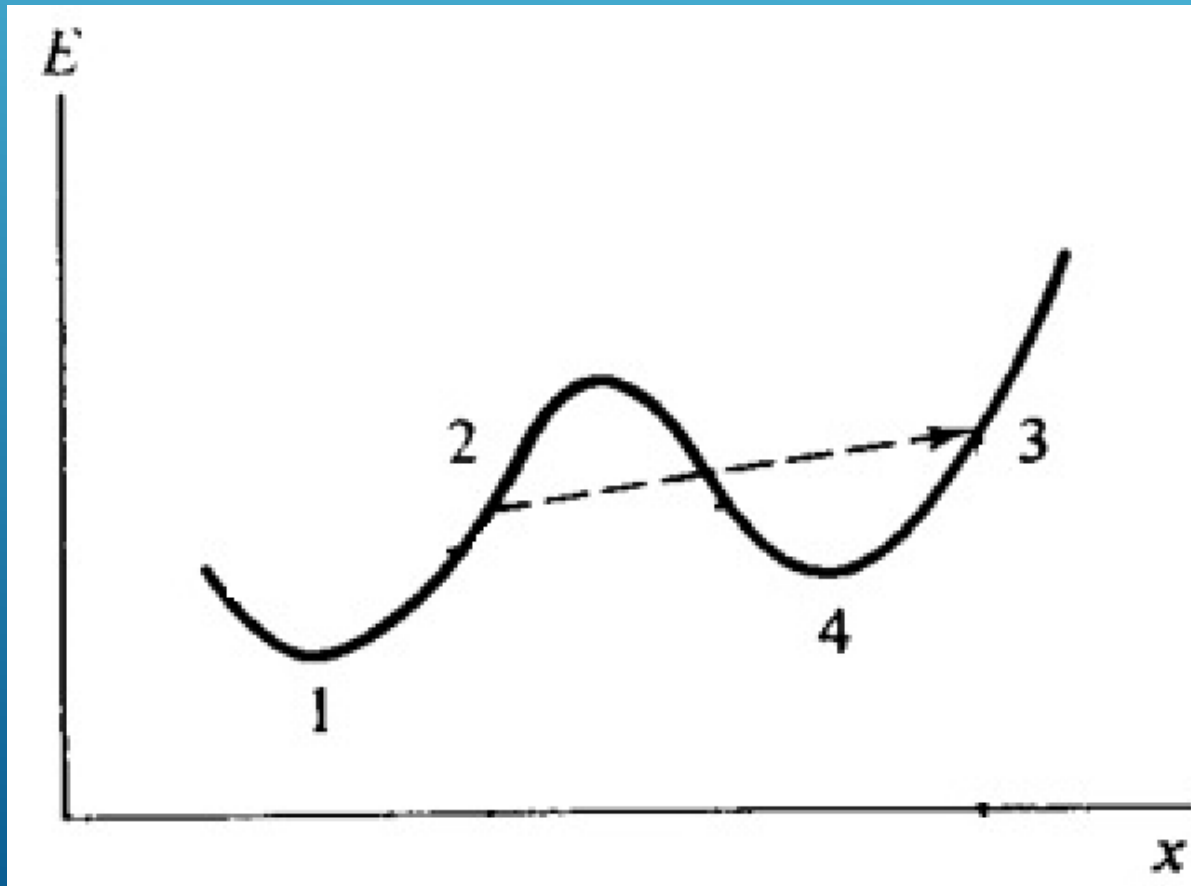
Se H for trazido a zero, a parede volta até ponto 4, M diminui um pouco.

Se H contrário crescente for aplicado, a parede se moverá de 4 até 5, reduzindo mais um pouco M .

Quando H for suficiente para chegar ao ponto 5, a parede se moverá espontaneamente, faz M passar por zero no ponto 1 e se moverá até o ponto 6, que é a derivada máxima negativa.

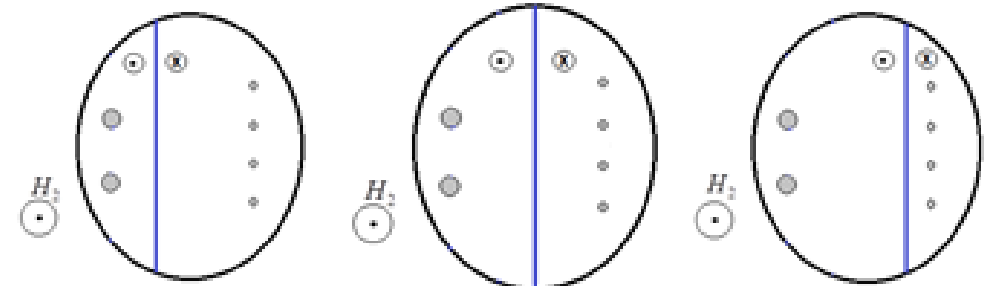
Se H for levado a zero, a parede volta ao ponto 1.

Na condição desmagnetizada, a parede inicialmente está num ponto de mínimo, ou seja, num poço de energia, ou seja, está presa a dois defeitos. O aumento de H fará a parede se livrar dos defeitos, mover-se até ser aprisionada por um poço mais fundo. Vamos retomar esse assunto, depois de apresentarmos os defeitos microestruturais dos materiais.

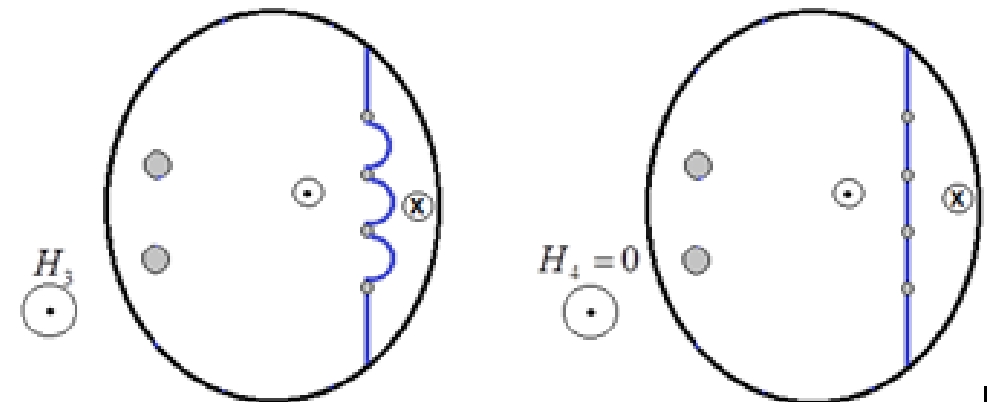


Ponto 1 na gráfica de exima

Ponto 2

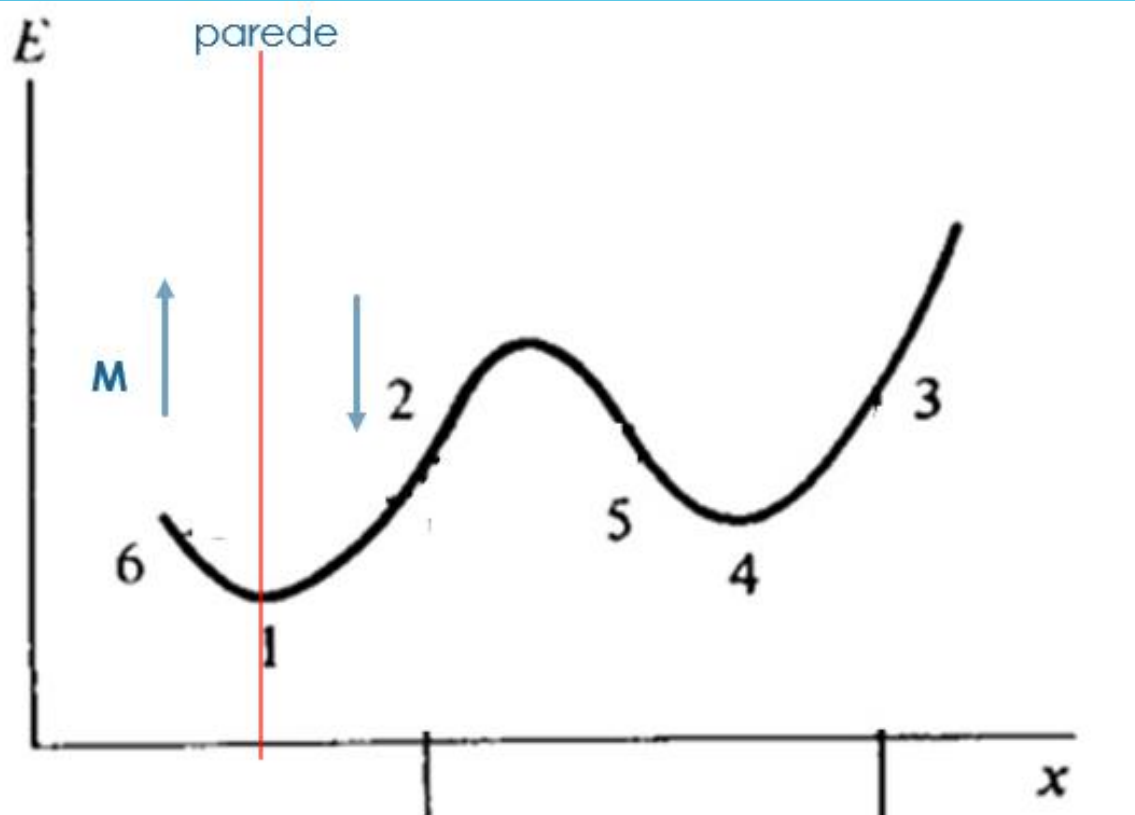


Ponto 2'



Ponto 3

Ponto 4

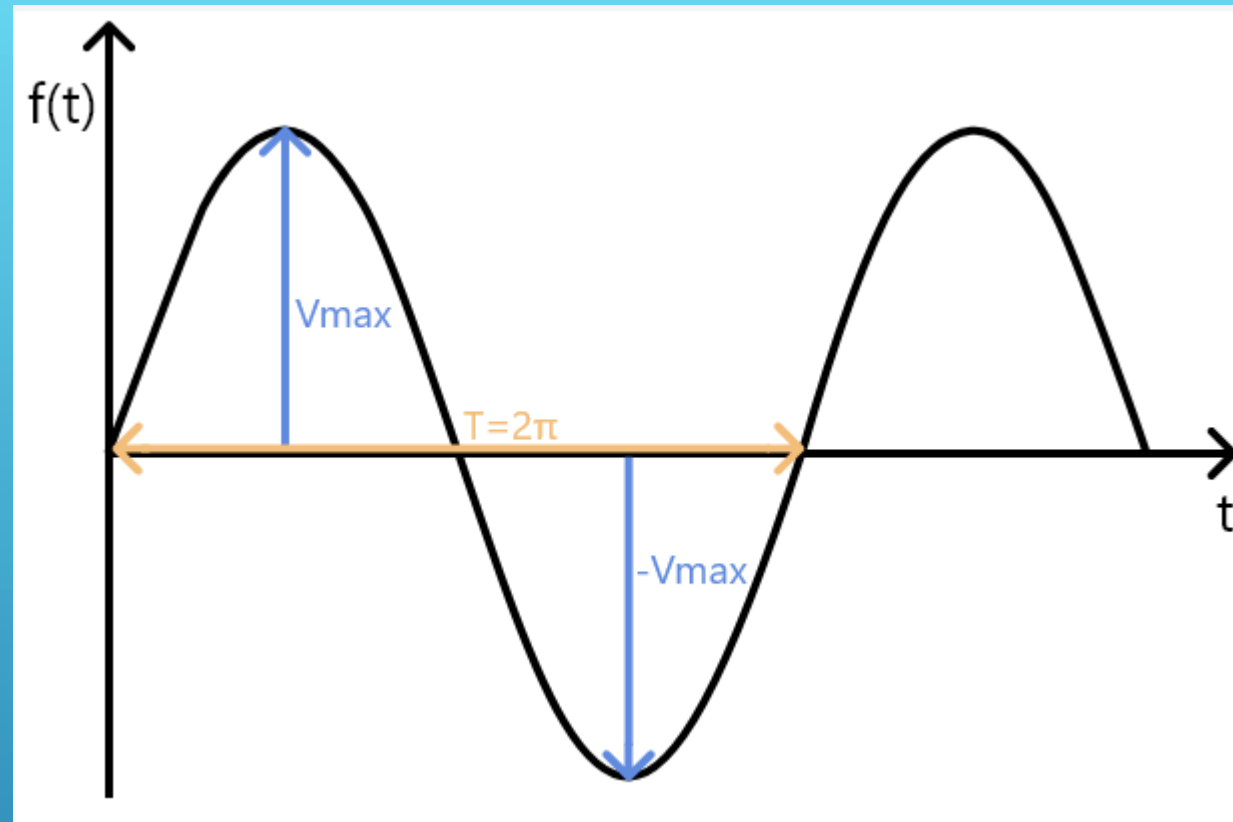


A velocidade com que a parede se move quando ela se livra da barreira depende do H que a fez vencer a barreira.

Então,
quanto mais profundas as barreiras de energia, maior o H necessário para vencê-las,
maior a velocidade com que a parede se move quando vence a barreira,
Maior será a energia dissipada.

As normas de medidas de perdas impõe que a variação de indução no tempo seja senoidal. Isso significa que o maior dB/dt ocorre quando B passa por zero, ou seja, no campo coercivo.

O campo coercivo, portanto, deve estar associado às maiores barreiras para movimentação das paredes.

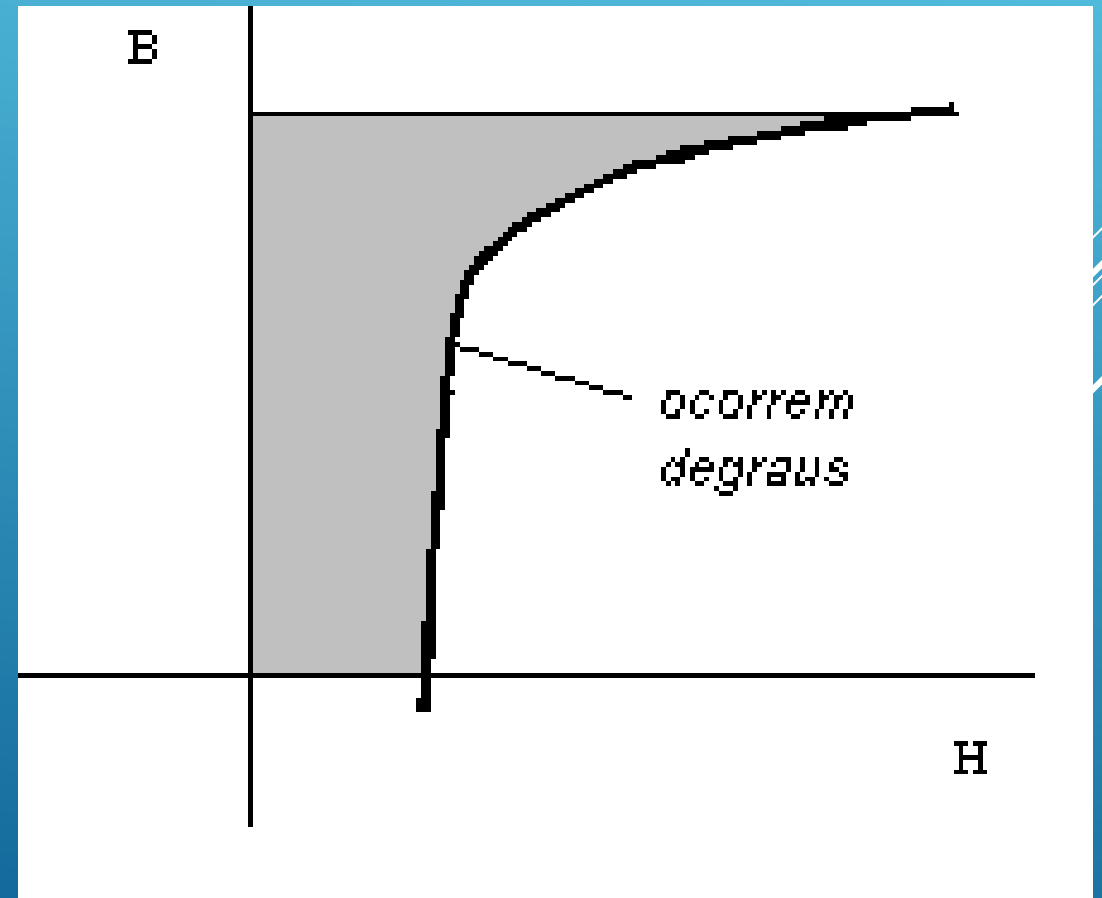


Se o processo de magnetização é sujeito a esses aprisionamentos e liberações súbitas das paredes, será que a variação da indução com o tempo é de fato bem lisa na tal senoide?

De fato não é. É toda cheia de pequenos “ruídos”, conhecidos como “Ruídos de Barkhausen”.

Pelo que vimos antes, espera-se que Os maiores saltos ocorram próximo ao campo coercivo.

Hum, é mais complexo.



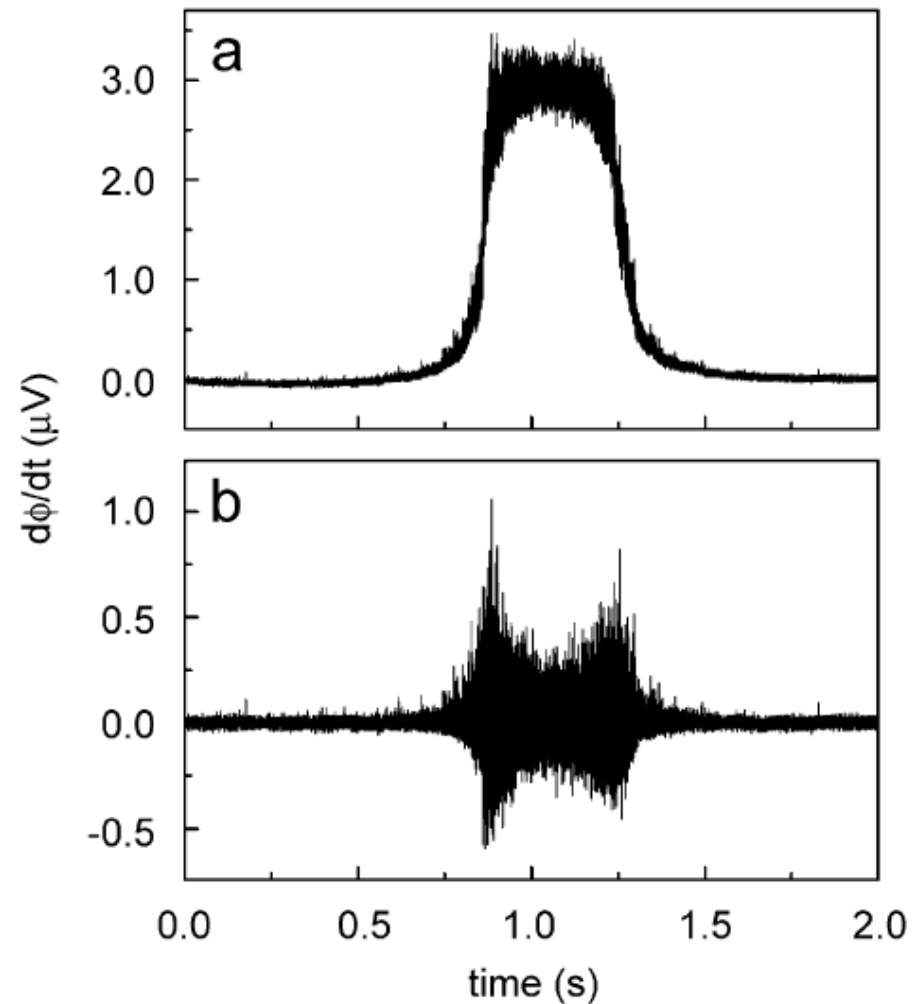
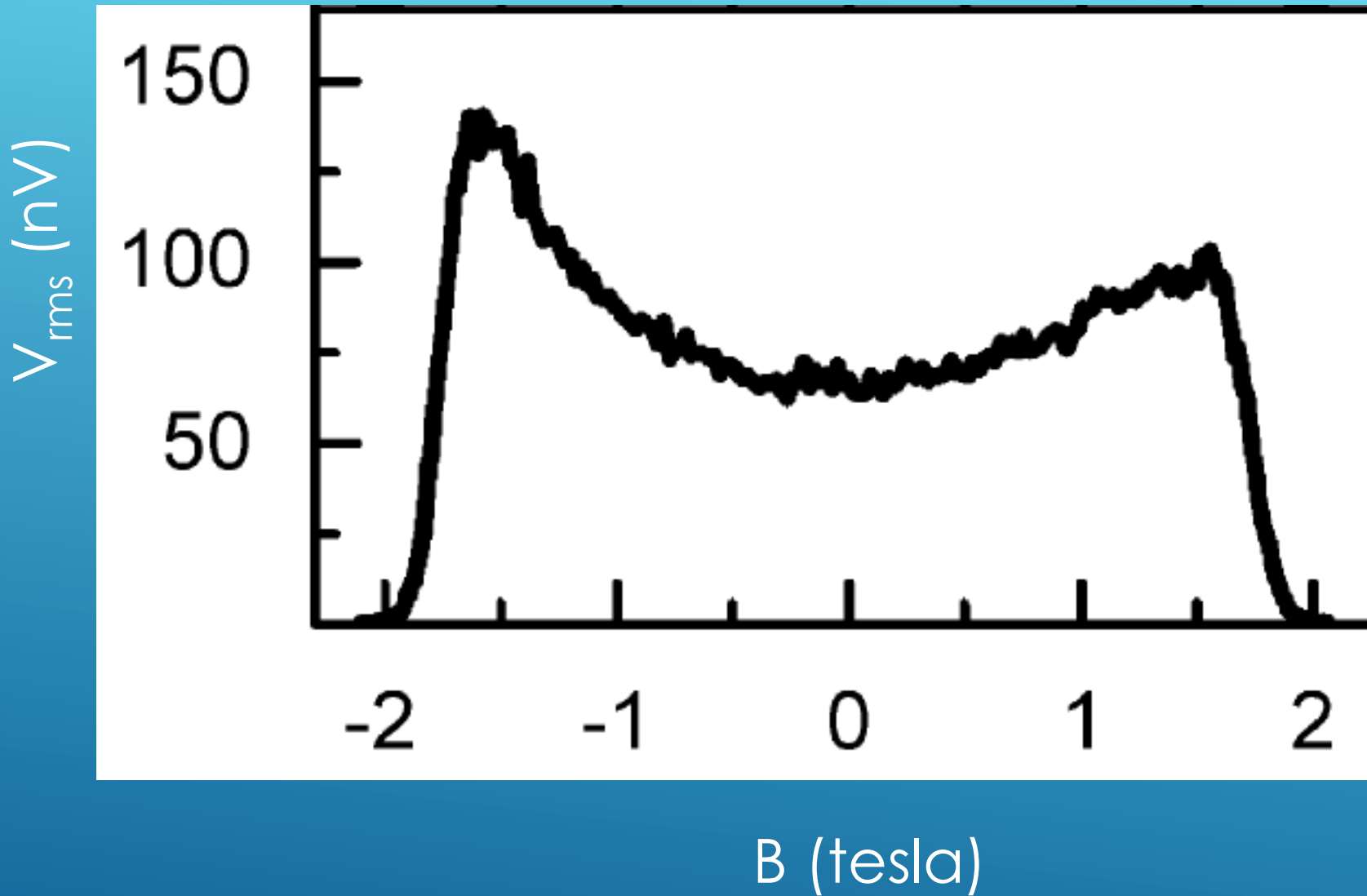


Fig. 3. (a) Time series of Barkhausen noise as measured in the sample 0°
 (b) Barkhausen noise signal obtained after discounting the base line
 obtained in the smoothing.

O ruído eletromagnético, medido como a variação da tensão elétrica, gerado num semiciclo, ou seja, de $-H$ a $+H$, ou seja, do 3º quadrante para o 4º e para o primeiro, dá um gráfico assim.

Magnetostriction, Barkhausen noise and magnetization processes in E110 grade non-oriented electrical steels

F. Bohn^{a,*}, A. Gündel^{a,b}, F.J.G. Landgraf^c, A.M. Severino^a, R.L. Sommer^d

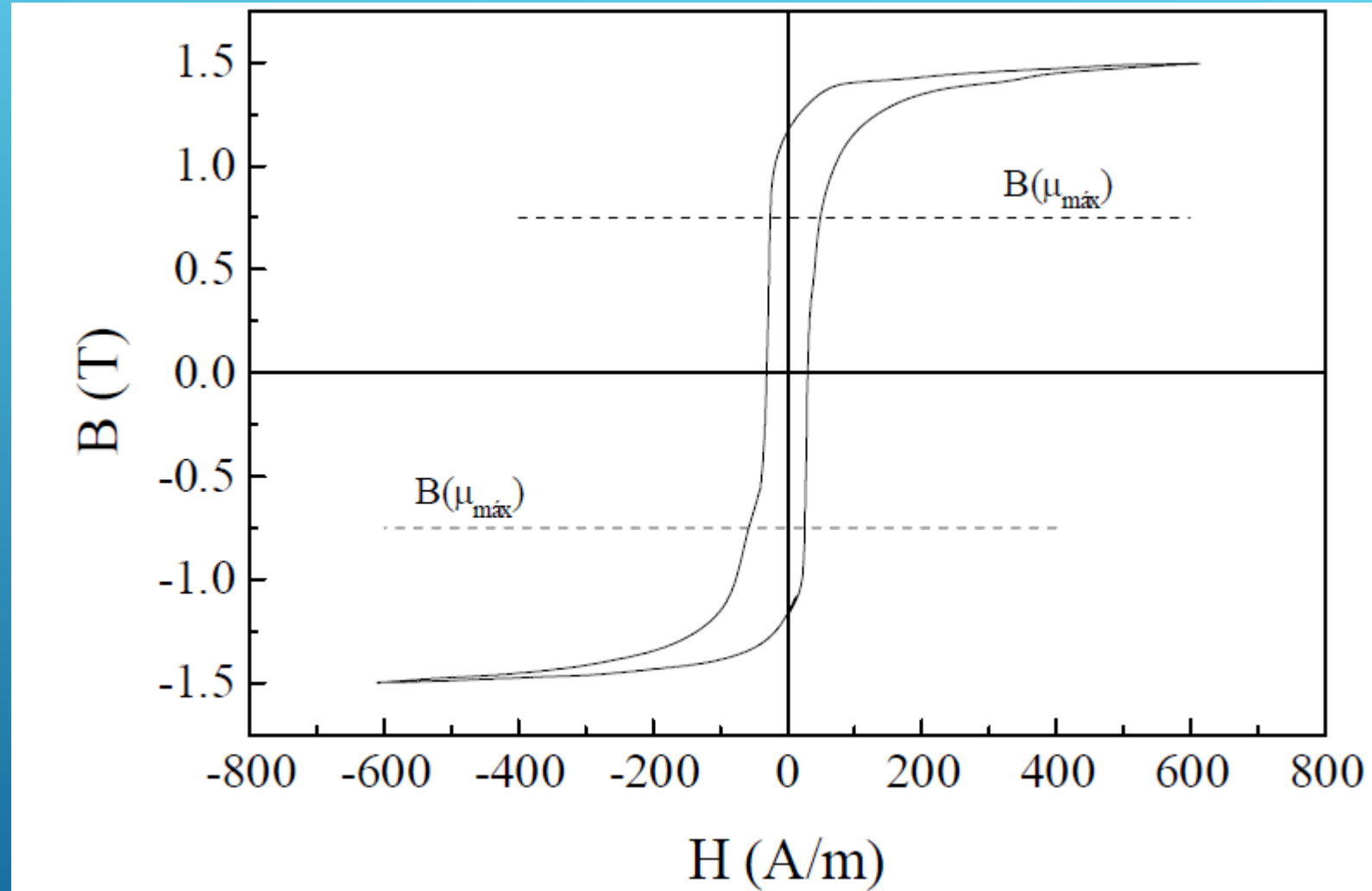


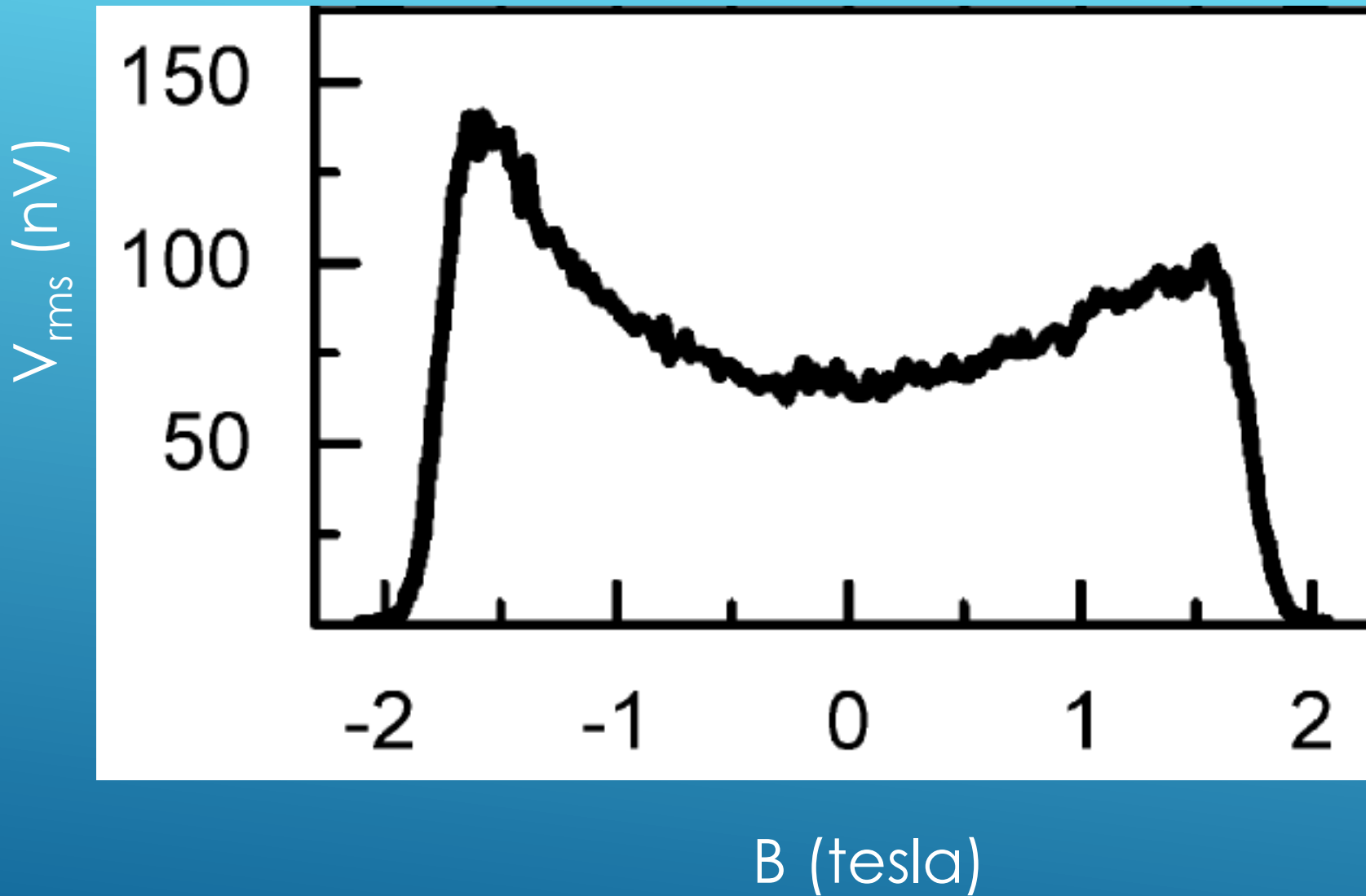
Esse resultado indica que as variações mais intensas/súbitas da magnetização ocorrem nas proximidades de 1,5 tesla, nos dois quadrantes

O que pode estar acontecendo em induções tão altas?

Se estamos vindo de $-H$ em direção a $+H$, ou seja, do 3º quadrante para o 4º e depois 1º quadrante, Já devemos estar na região em que cada grão é um domínio.

Então, o que deve ocorrer é a nucleação de domínios contrários, perto de $-1,5T$, e aniquilação desses domínios, perto de $+1,5T$.

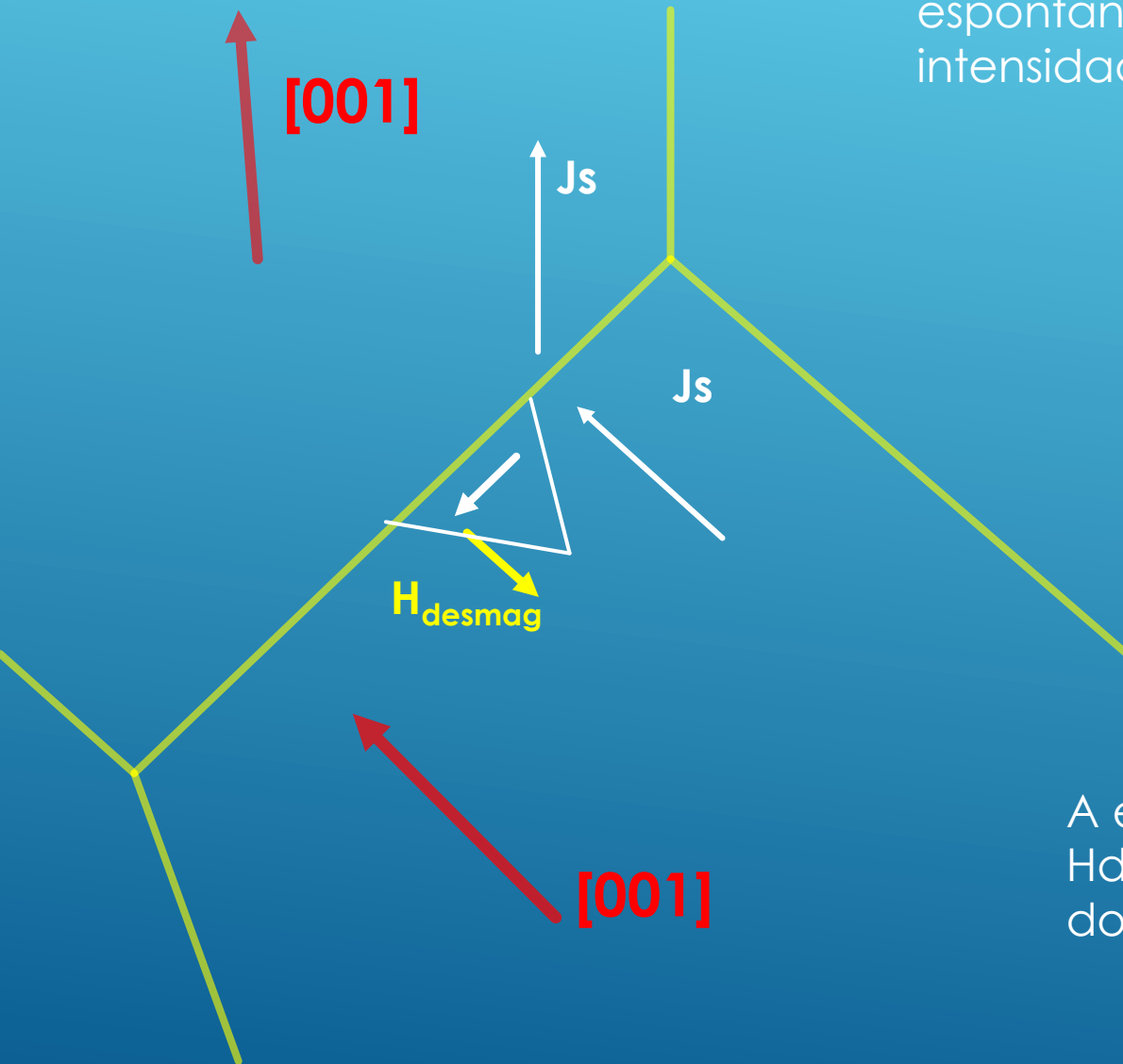




Ou seja, a maior intensidade de ruído ocorre na **nucleação de domínios**, caindo na região do H_c , e voltando a subir próximo a +1,5T, região em que devem estar acontecendo a **aniquilação de domínios**.

Nucleação de domínios no contorno de grão entre dois grãos desalinhados

Na condição desmagnetizada, J_s fica alinhado na direção espontânea em cada grão, e o vetor J_s tem mesma intensidade nos dois grãos.



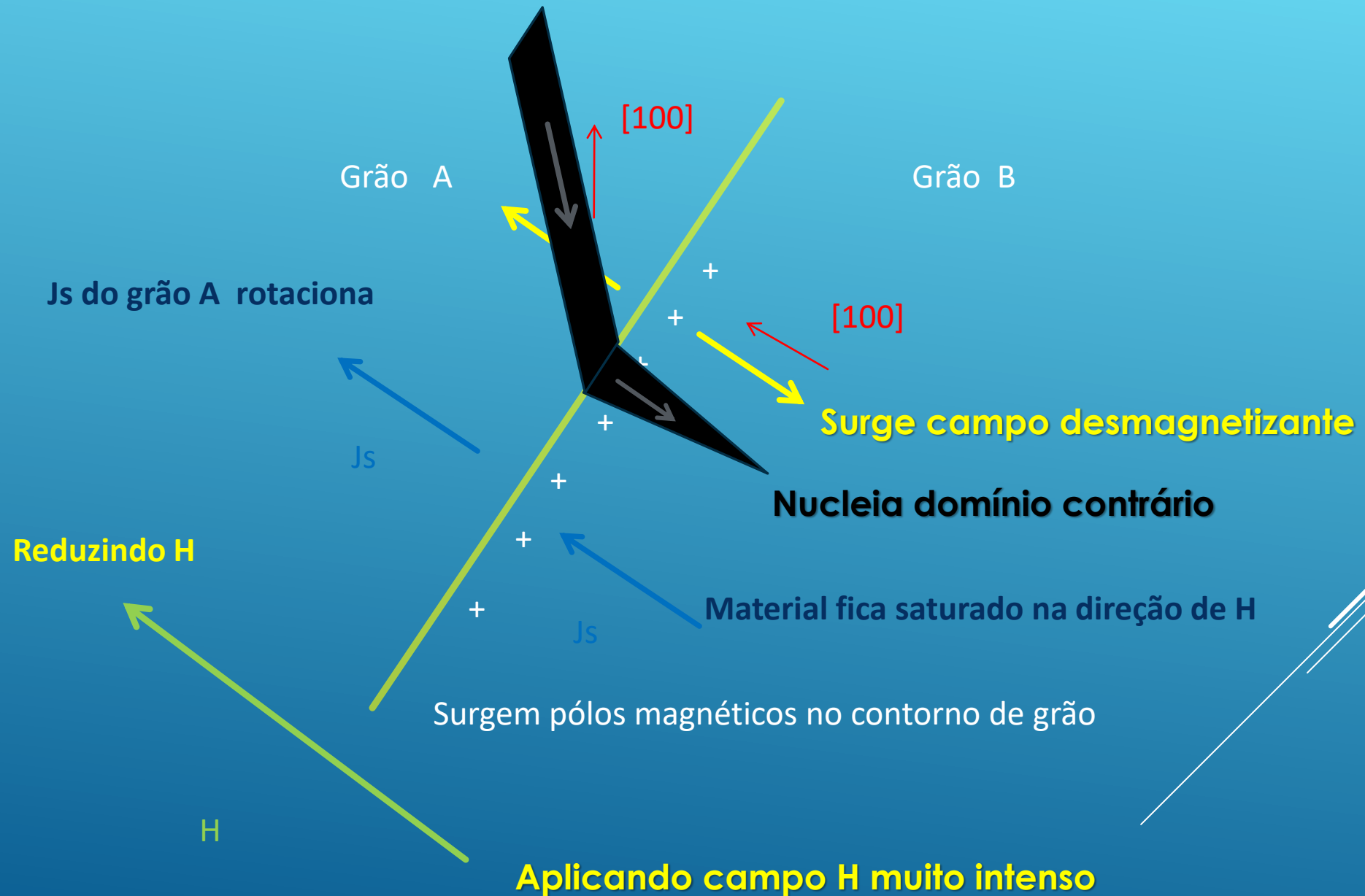
As equações de Maxwell exigem que a componente de B na direção normal à interface deve ser contínua, ou seja

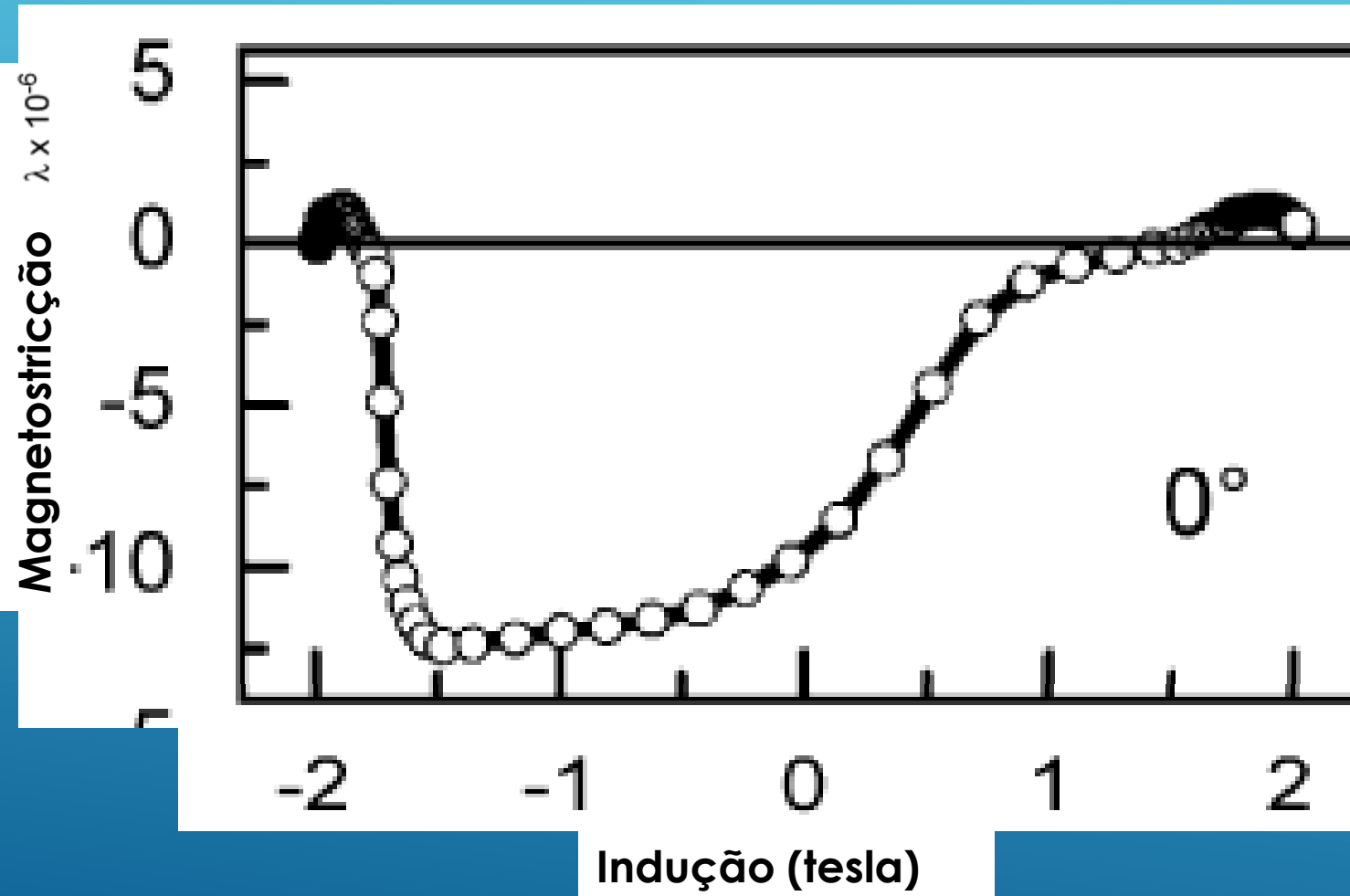
$$(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) \cdot \mathbf{n}_{12} = 0$$

Como a projeção de J_s na direção normal é menor no grão de cima, e como $B = \mu_0 H + J$, Então surge um campo desmagnetizante H_{desmag} no grão de baixo, para reduzir B .

A energia magnetostática criada pela oposição entre H_{desmag} e J_s pode ser reduzida se for criado um domínio com parede de 90° no grão de baixo.

Nucleação de domínios no 3º quadrante





A magnetostricção mede a expansão ou contração do material, **relativa a movimentação de paredes de 90°**

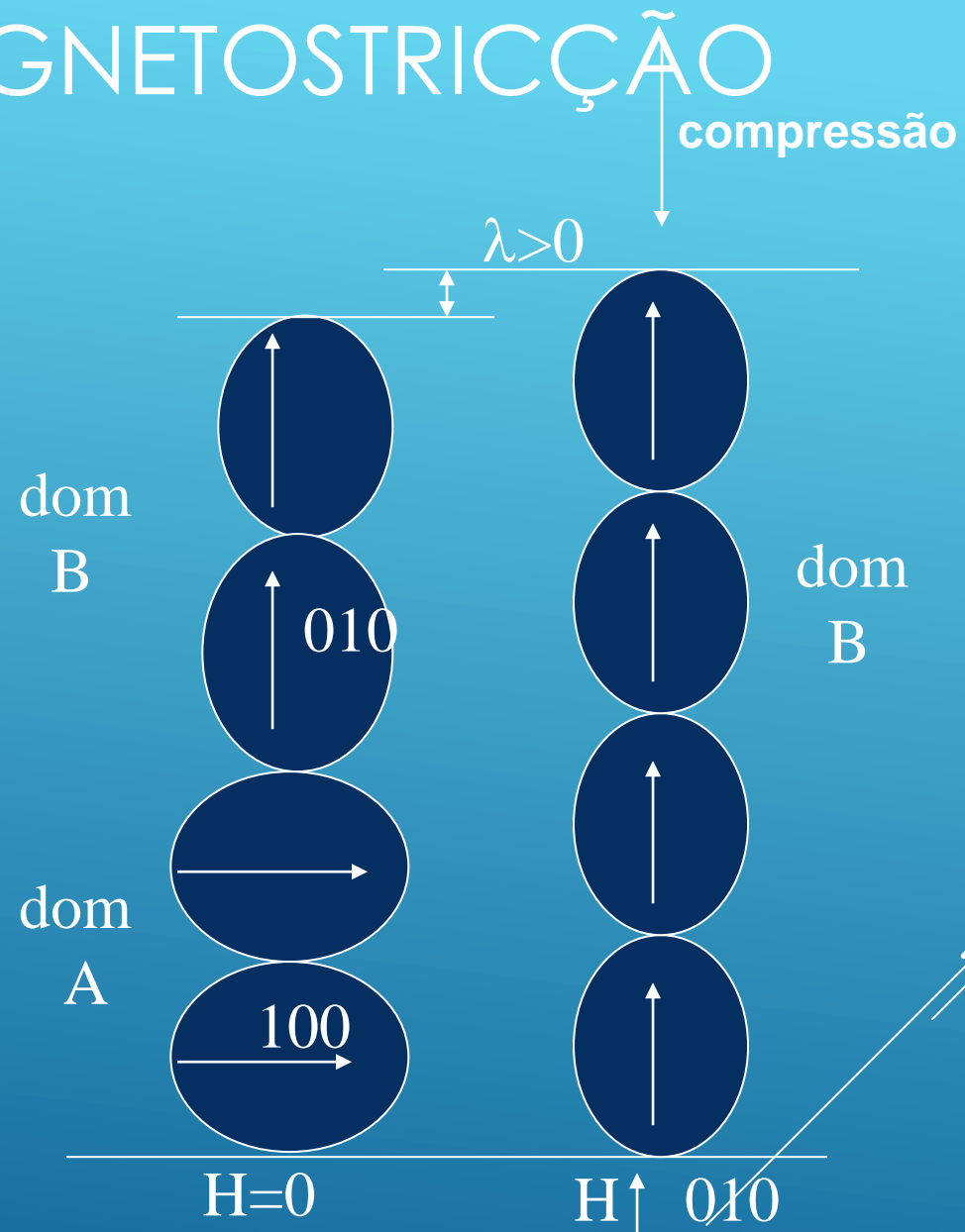
Zerando a dimensão na posição $B = -2\text{T}$, observa-se inicialmente uma pequena expansão, seguida de uma grande contração na região do pico de Barkhausen.

Entre -1,5 e 0 tesla, ou seja, até o campo coercivo, poucas alterações.

Entre 0 e +1,0T, gradual retorno ao comprimento inicial.

relembrando: MAGNETOSTRICÇÃO

- ▶ Ferro não é CCC!
- ▶ Podemos supor que o átomo de Fe é oval, e não esférico.
- ▶ Estrutura fica tetragonal,
- ▶ Mas é apenas 1.00001 maior na direção de magnetização.
- ▶ Quando magnetizado, aumenta de comprimento na direção do campo.
- ▶ Só alteração de domínios a 90° causa magnetostricção
- **É simétrico: aplicação de tensão altera magnetização!**



Nucleação de domínio e dissipação

Vimos que a rotação de domínios é não dissipativa...Se a variação da direção for infinitamente lenta.

Se a criação do domínio for súbita, rápida, ocorrerá dissipação. Será que a dissipação é apenas por movimento rápido da parede, Ou seja, pela corrente parasita que circula em torno da parede em movimento?

Há quem creia que sim.

Mas energia pode ser dissipada por outras formas além do efeito Joule ($Q=RI^2t$) Por exemplo, por emissão de ruído da magnetostricção.

Andando na rua percebemos um ruído, quando nos aproximamos de um transformador.

O ruído é de 120Hz.

Uma das causas do ruído é a variação de tamanho das chapas do transformador, causado pela magnetostricção. A chapa aumenta de tamanho quando magnetizada num sentido e no outro, ó que acontece 120 vezes por segundo.

A emissão de ruído é uma forma de dissipar energia.



resumindo

Remanência é a Indução residual quando, depois de magnetizado, o campo retorna a zero.

Campo coercivo é o campo necessário para desmagnetizar o material.

Ao ser magnetizado alternadamente, o material dissipa energia devido à histerese.

O valor da energia dissipada cresce com a indução máxima atingida na histerese.

A energia é dissipada por correntes elétricas parasitas que circulam em torno da parede de domínio em movimento. Essa não é a única fonte de dissipação de energia.

Energia também é dissipada na nucleação e aniquilação de domínios.

Um aspecto que ficou faltando na aula 2: as propriedades intrínsecas e as extrínsecas

Certas propriedades dependem só da composição química, e não dependem dos defeitos microestruturais como tamanho de grão, discordâncias (deslocações), textura cristalográfica. São as **propriedades intrínsecas**.

A Polarização de Saturação J_s ,
as constantes de anisotropia magnetocristalina K_1, K_2
A magnetostricção de saturação λ_s

As **propriedades extrínsecas** variam com os defeitos microestruturais:
Campo coercivo, área de histerese, permeabilidade

Ímãs (*Permanent Magnets*)

Existem várias composições químicas de ímãs:

Ferrita de bário: $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$

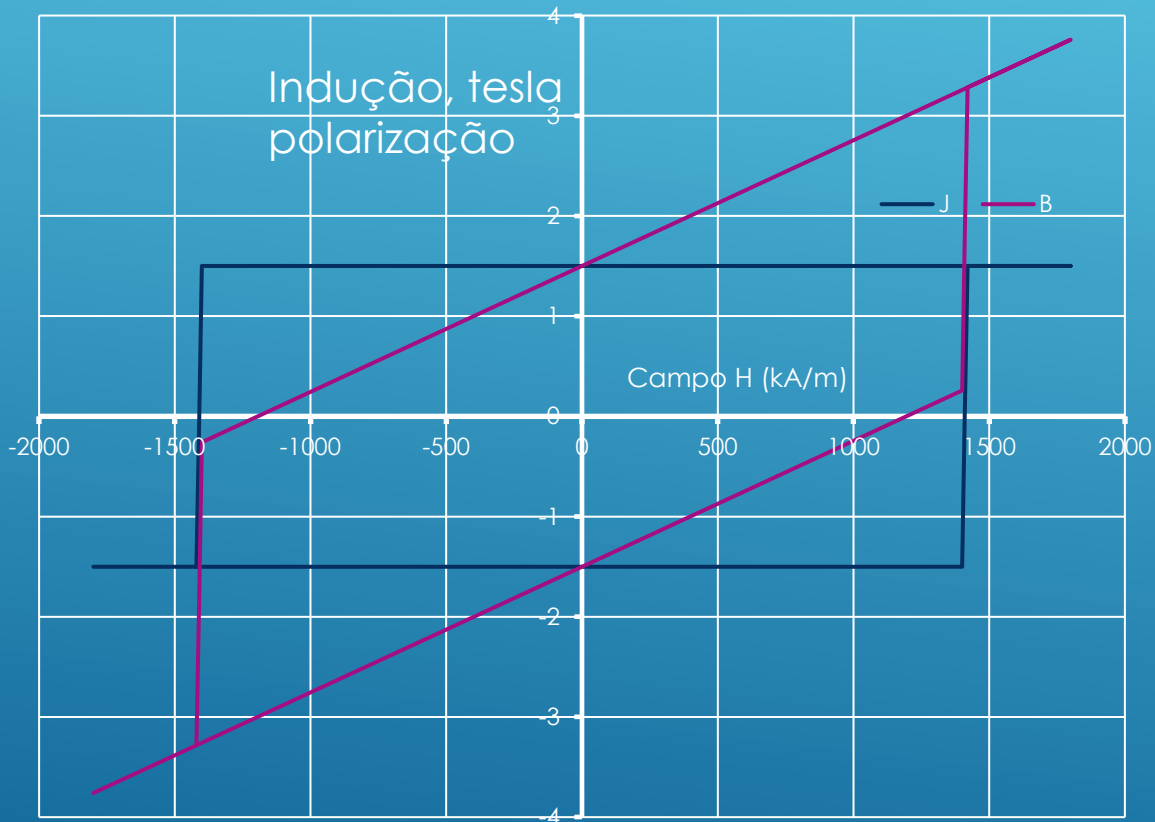
Superímãs de terras raras

Samário –Cobalto: SmCo_5 e $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

Neodímio-ferro-boro: $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

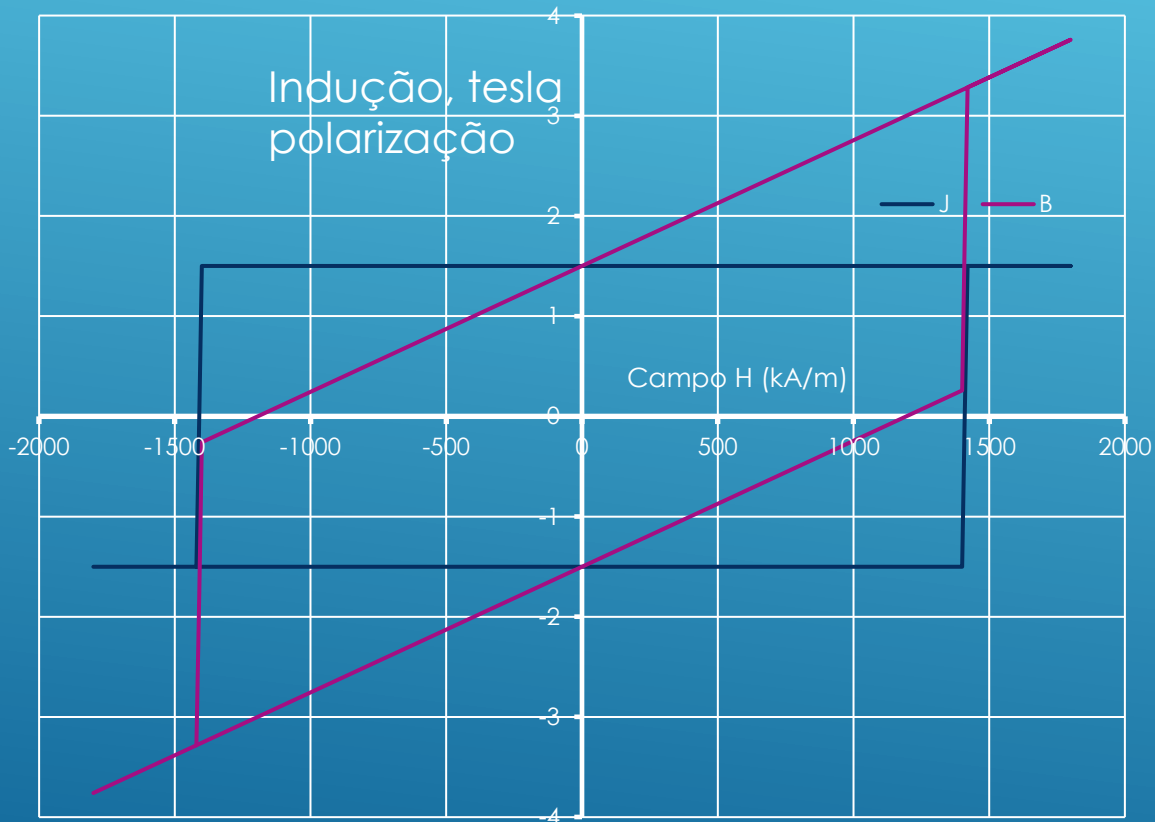
Alnico: liga Fe-Al-Ni-Co

A CURVA DE HISTERESE DO ÍMÃ ANISOTRÓPICO IDEAL



- ▶ Como campo coercivo dos ímãs é muito alto, para magnetiza-lo preciso de campo muito alto.
- ▶ Curva $B \times H$ é muito diferente da curva $J \times H$
- ▶ exemplo do gráfico é de um ímã do tipo Neodímio-ferro-boro

A CURVA DE HISTERESE DO ÍMÃ ANISOTRÓPICO IDEAL



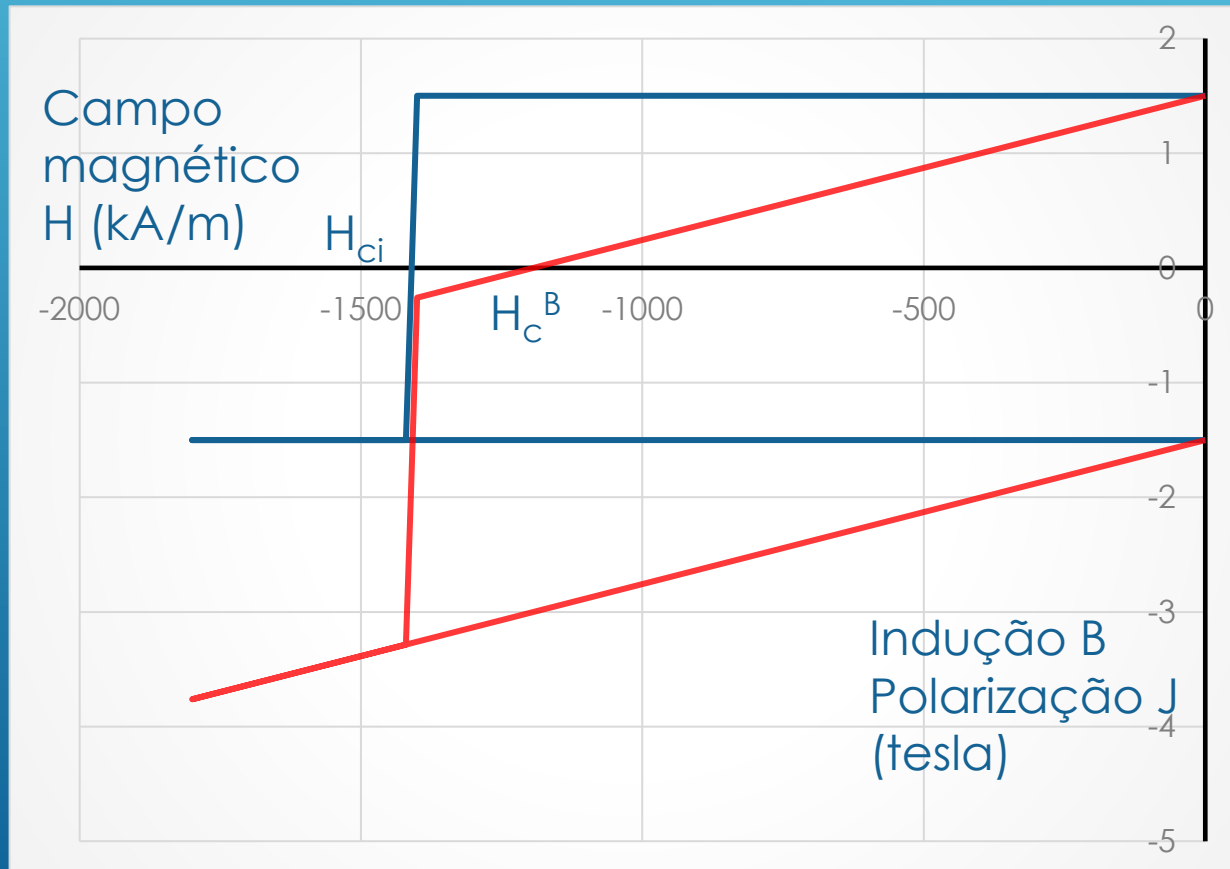
- ▶ Um ímã ideal tem

$$J_R = J_S$$

- ▶ O segundo quadrante é retangular, ficando J constante até atingir H_{ci} .

O exemplo do gráfico é de um ímã do tipo Neodímio-ferro-boro

O SEGUNDO QUADRANTE



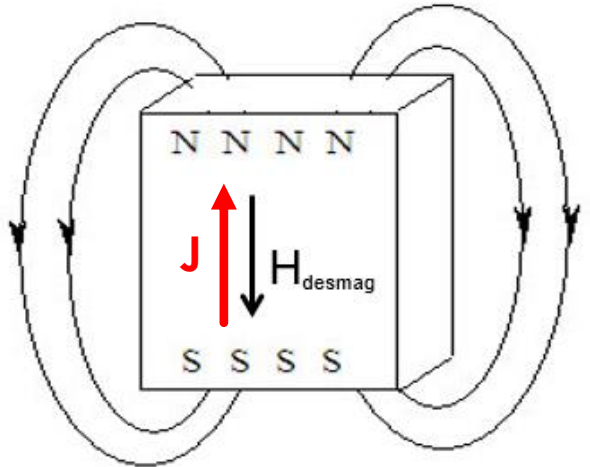
$H_{ci} = H_C^J$ campo coercivo intrínseco

H_c^B campo coercivo da curva $B \times H$

O QUE FAZ UM BOM ÍMÃ

- ▶ Um **alto campo coercivo**, que depende da energia de anisotropia magnetocristalina, ou seja, é o K_1
- ▶ Uma **alta remanência**, ou seja, um alto valor da polarização de saturação J_s
- ▶ Que suas propriedades variem pouco com a T
- ▶ Um **baixo custo**, ou seja, composição e processo de fabricação.

ENERGIA ACUMULADA NUM ÍMÃ



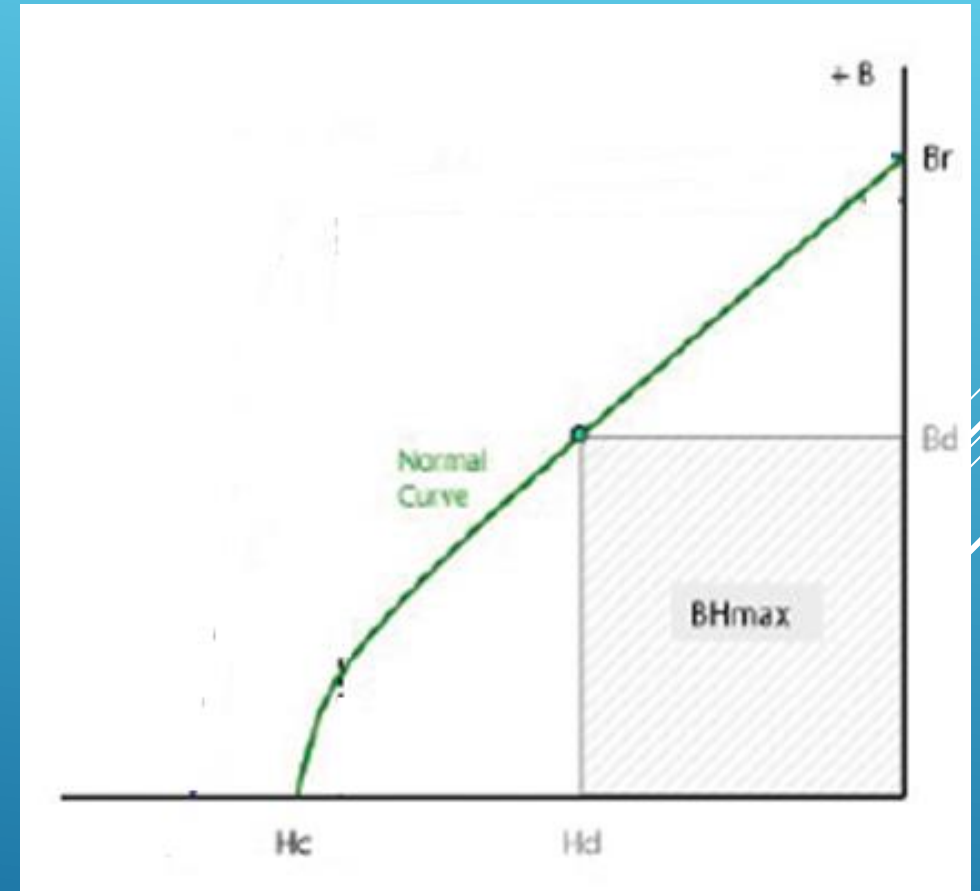
Um ímã em circuito aberto aplica em si mesmo um campo desmagnetizante.

A Energia Magnetostática é $E_{ms} = - H B \cos \theta$.
Se $\theta=180^\circ$ então Energia = $H_d B_d$

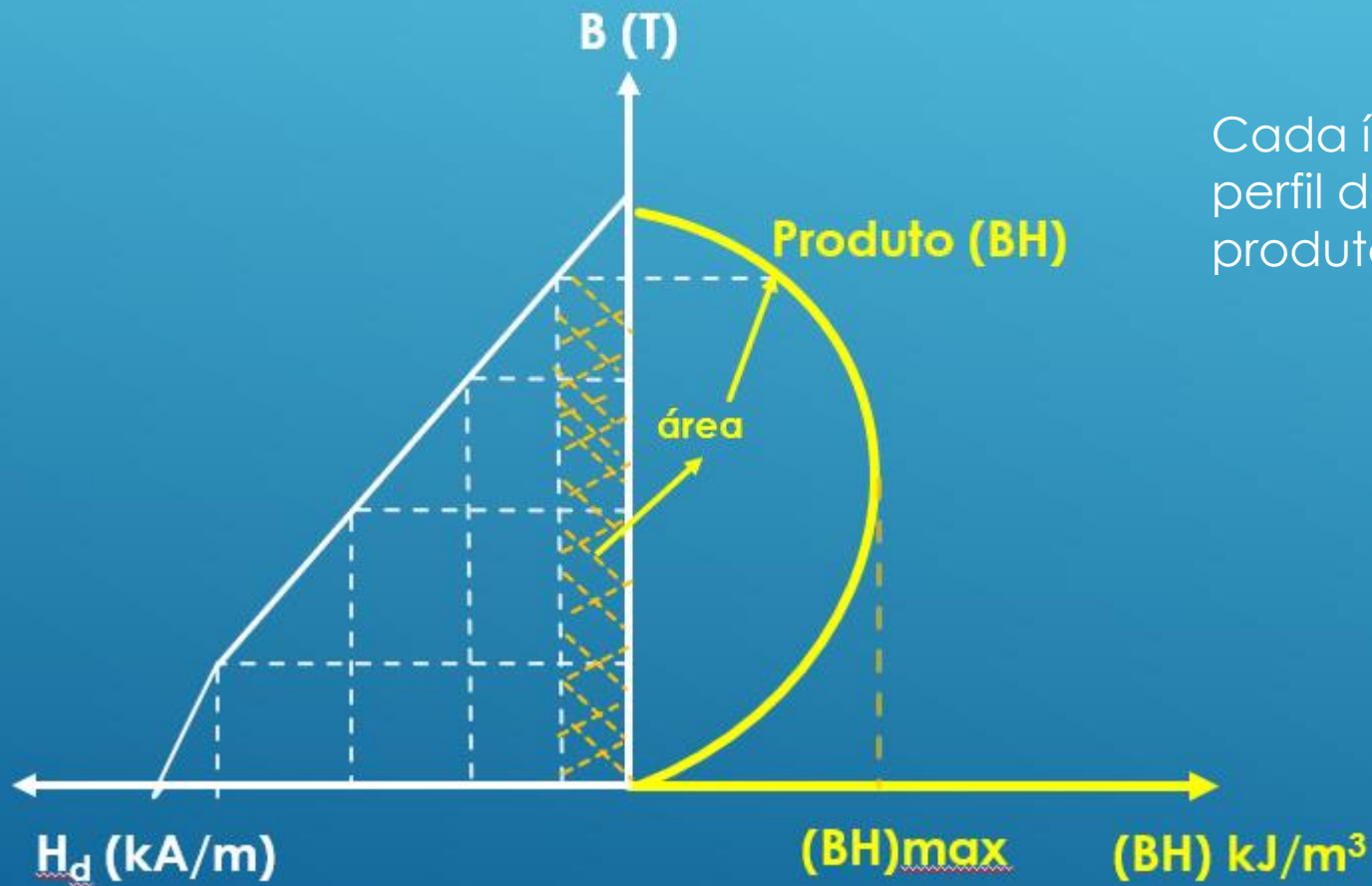
O campo desmagnetizante $H_d = N_{ef} \cdot M_s$

N_{ef} depende da relação $\ell/D = \text{comprimento} / \text{diâmetro do ímã}$.

Quanto maior ℓ/D , menor N_{ef} , menor H_d .



Energia magnetostática acumulada no ímã

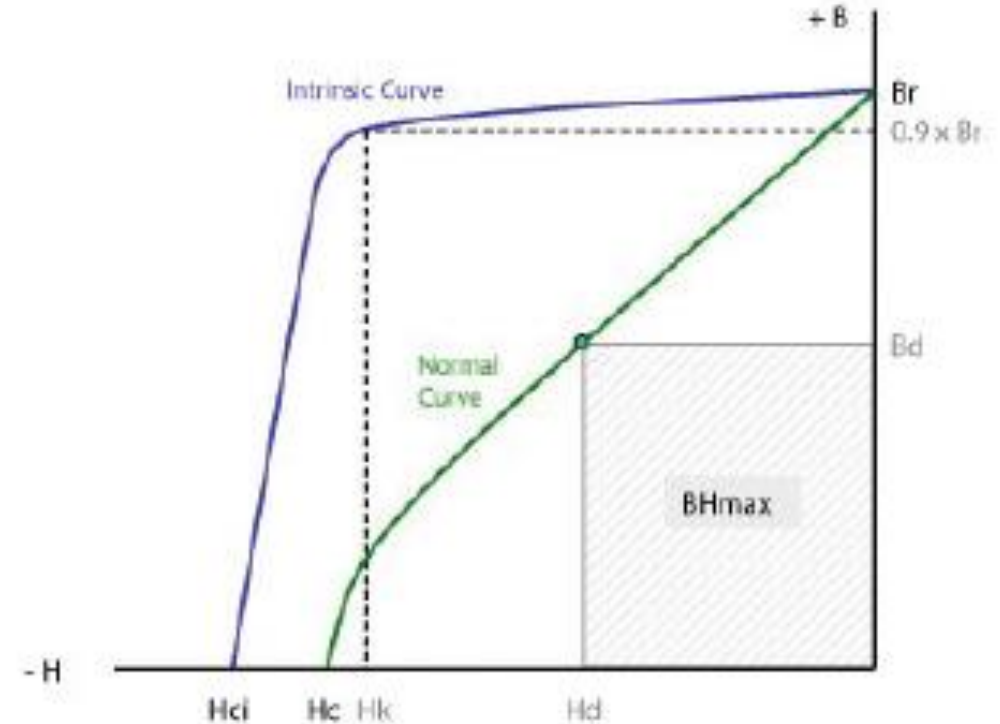


Cada ímã, dependendo do B_r e do perfil do 2º quadrante, terá seu produto energético máximo.

PARÂMETROS DE QUALIDADE DE UM ÍMÃ

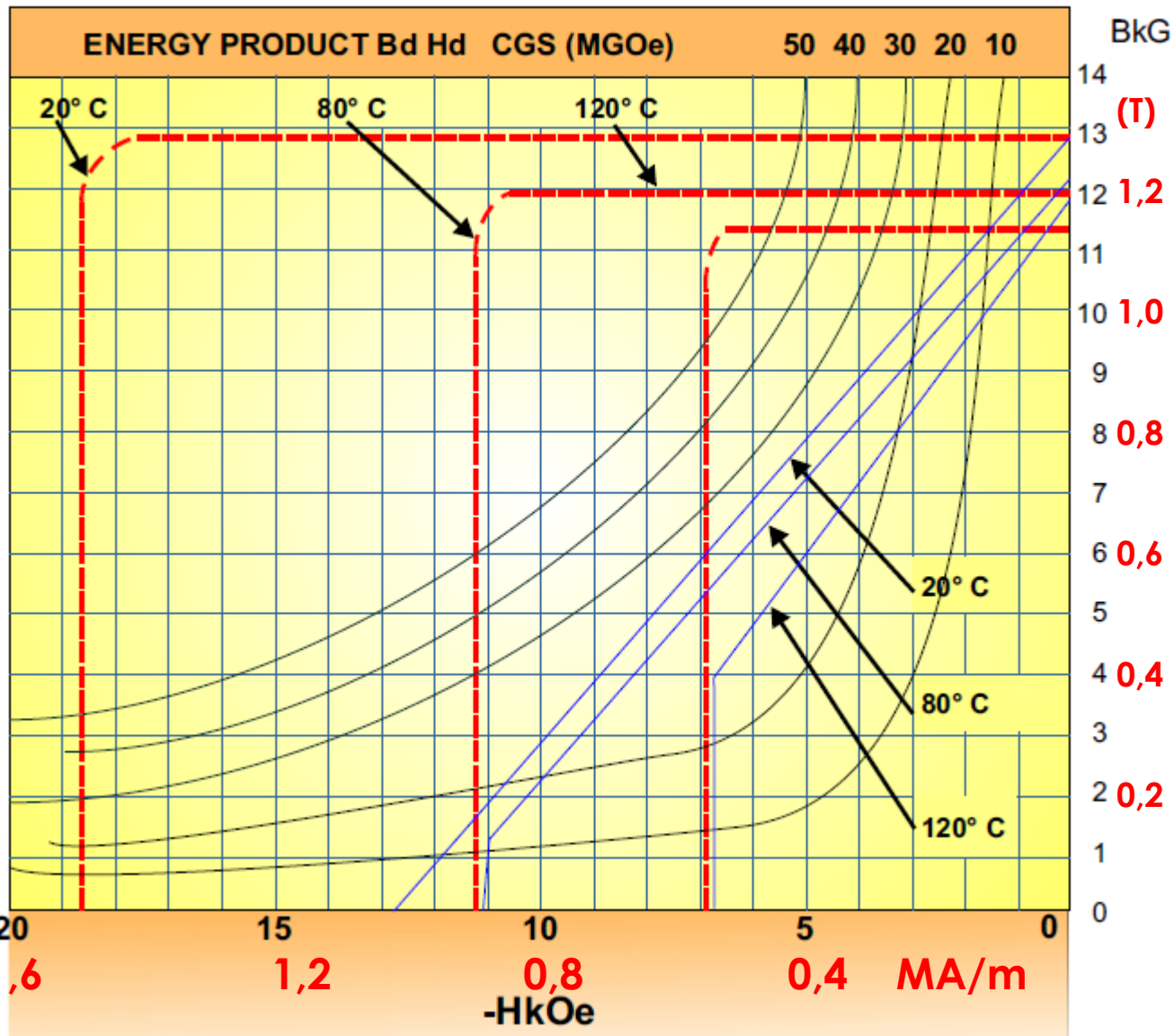
- ▶ B_r
- ▶ H_k campo que provoca queda de 10% no J
- ▶ H_c
- ▶ H_{ci}
- ▶ $(BH)_{max}$

2nd Quadrant demagnetization curve



A QUESTÃO DAS UNIDADES

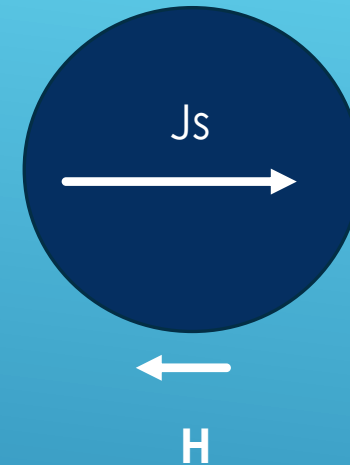
Neo 40 H



- ▶ Nos aços o sistema MKS dominou, mas nos ímãs o CGS ainda é muito usado.
- ▶ 10 k gauss = 1,0 tesla
- ▶ 1 K oersted = 79.600 A/m

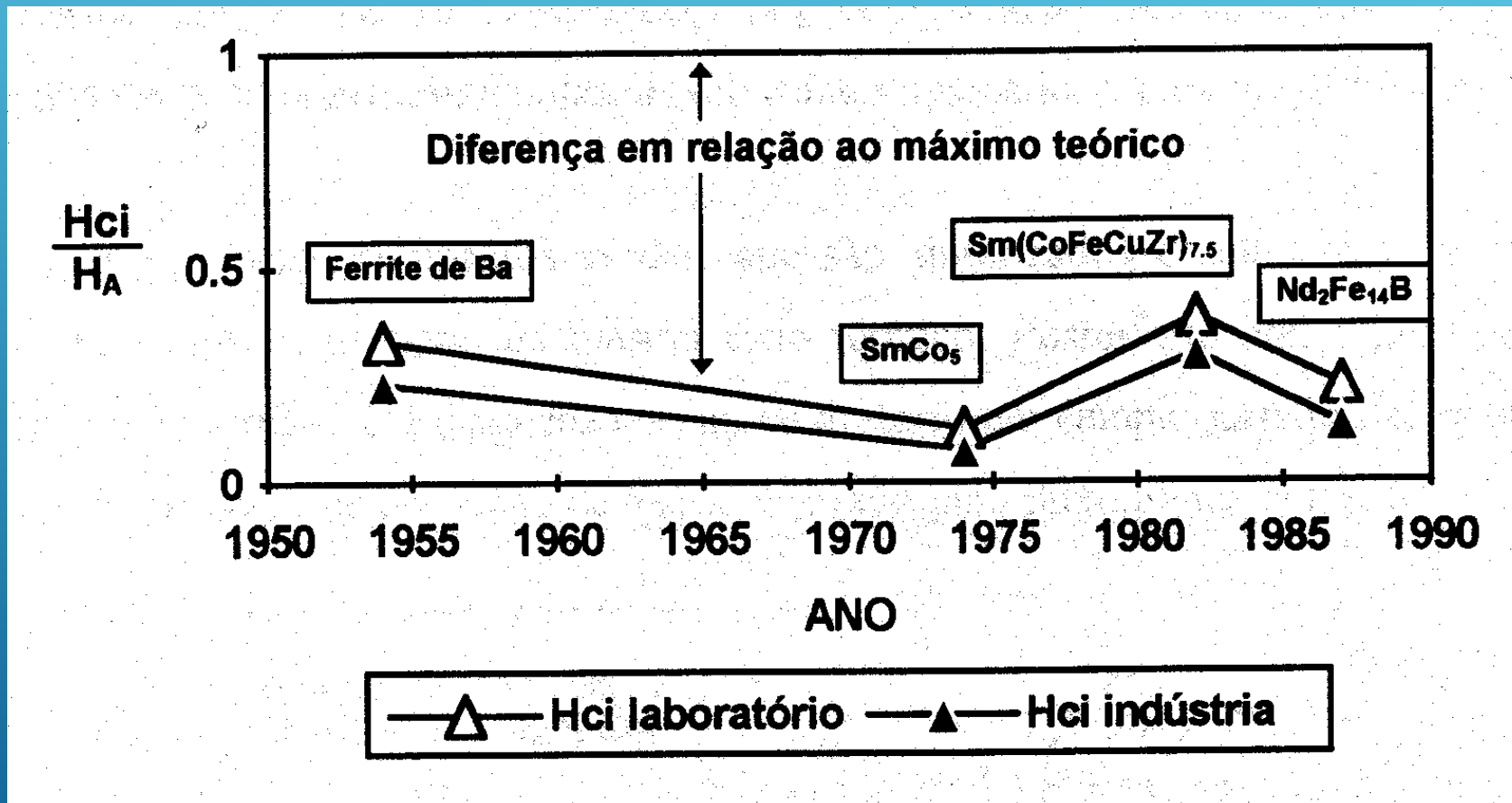
CAMPO COERCIVO LIMITE

- ▶ Se tivermos uma única partícula,
- ▶ Com anisotropia magnetocristalina uniaxial $E = K_1 \sin^2 \theta$
- ▶ Tão pequena que seja um monodomínio magnético,
- ▶ A inversão de sua polarização magnética só poderá acontecer por rotação do domínio
- ▶ O campo necessário para promover a rotação até 90° é chamado de campo de anisotropia H_A
- ▶ Depois de rotacionar 90° , o restante é espontâneo.



$$H_A = \frac{2K_1}{J_s}$$

CAMPO COERCIVO REAL É SEMPRE MENOR QUE H_A



$$H_{CI} = \alpha H_A - N_{ef} M_s$$

- ▶ Kronmüller propôs dois fatores de correção para o H_{CI} :

α é uma redução local da constante de anisotropia

N_{ef} é um fator de desmagnetização local

Interessados em aprofundar sobre coercividade, ver artigo:
[Experimental approaches for micromagnetic coercivity analysis of advanced permanent magnet materials](#), S. Okamoto, 2021,
Artigo disponível no e-disciplinas.

EFEITO DA TEMPERATURA NOS ÍMÃS

▶ Depende da temperatura de Curie do material

- ▶ Ímã de ferrite de bário: 450° C
- ▶ Ímã de samário-cobalto SmCo5: 727° C
- ▶ Ímã de Sm₂Co₁₇: 820° C
- ▶ Ímã de NdFeB: 315° C

Efeito da temperatura no campo de anisotropia H_A de ligas NdDyFeB

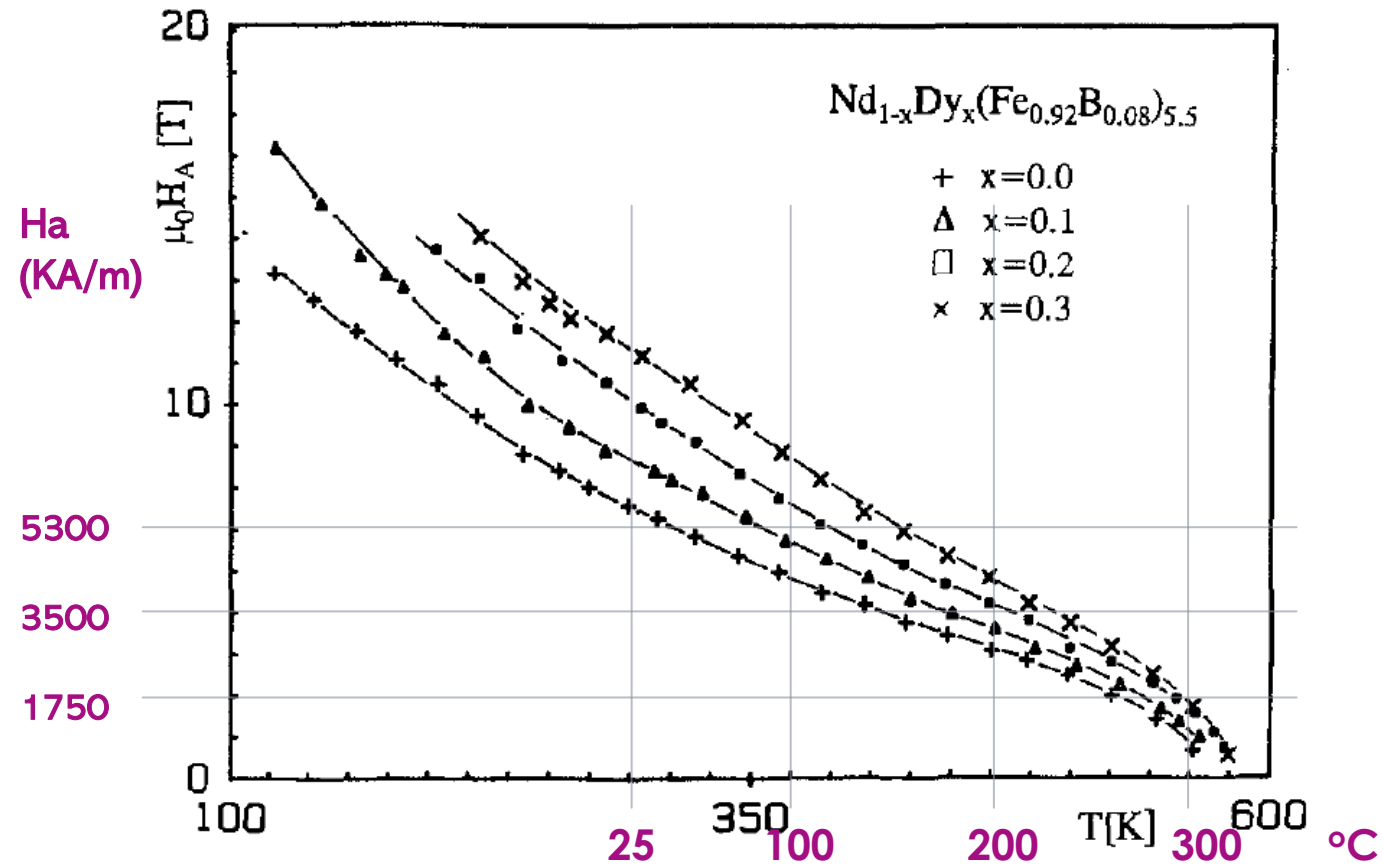
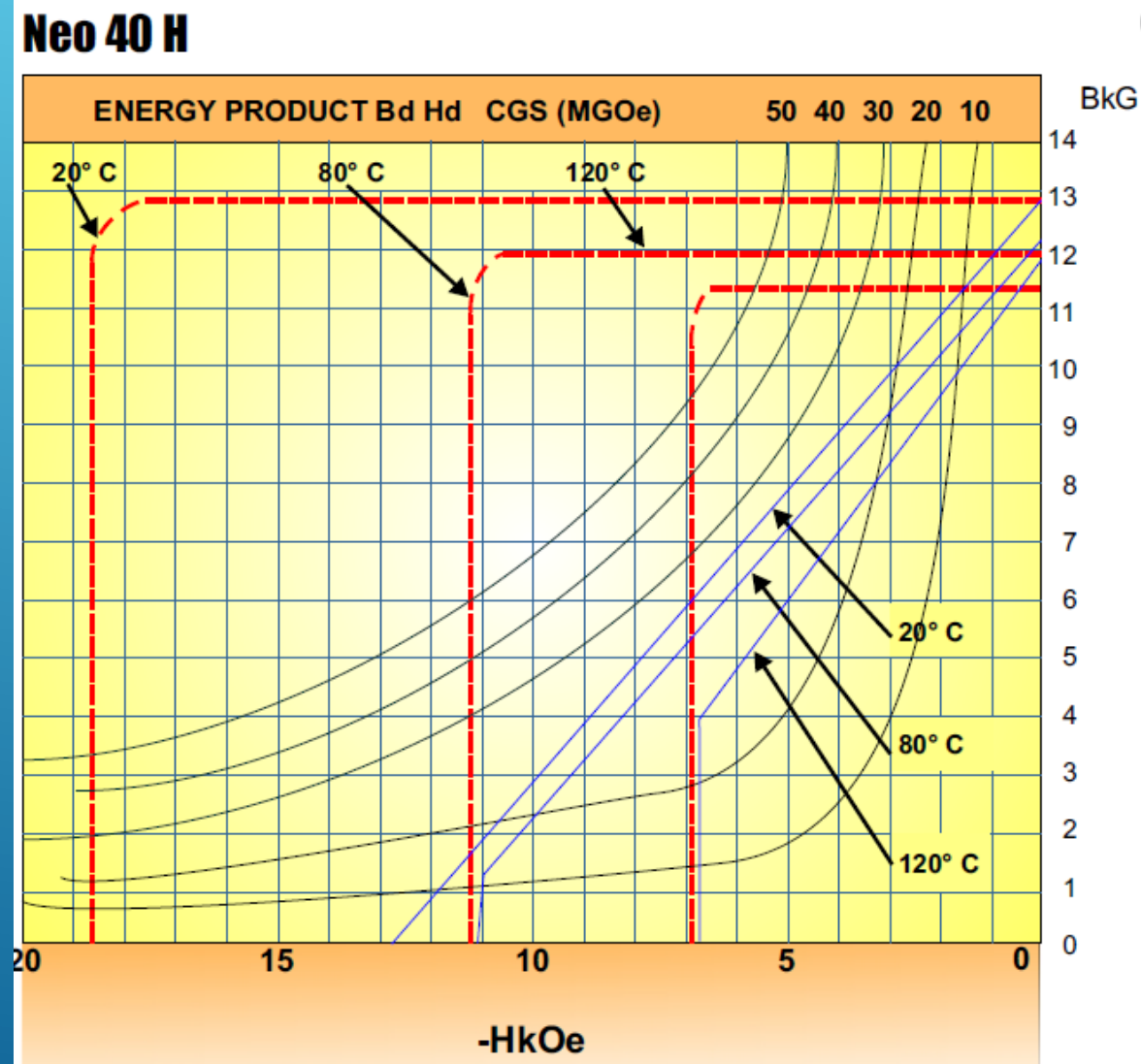


Fig. 2.6. Temperature dependence of the anisotropy field H_A obtained by Grössinger in several (Nd, Dy)–Fe–B magnets. From Buschow et al. (1989).

Efeito da temperatura no comportamento dos ímãs

Aumento da temperatura
Reduz saturação, e daí remanência.
Reduz constante de anisotropia
magnetocristalina, daí reduz campo
coercivo



HISTERESE NOS ÍMÃS

A curva de histerese dos ímãs é muito sensível à microestrutura.
Voltaremos à histerese dos ímãs depois de apresentar a microestrutura no tópico 4.



Resumindo

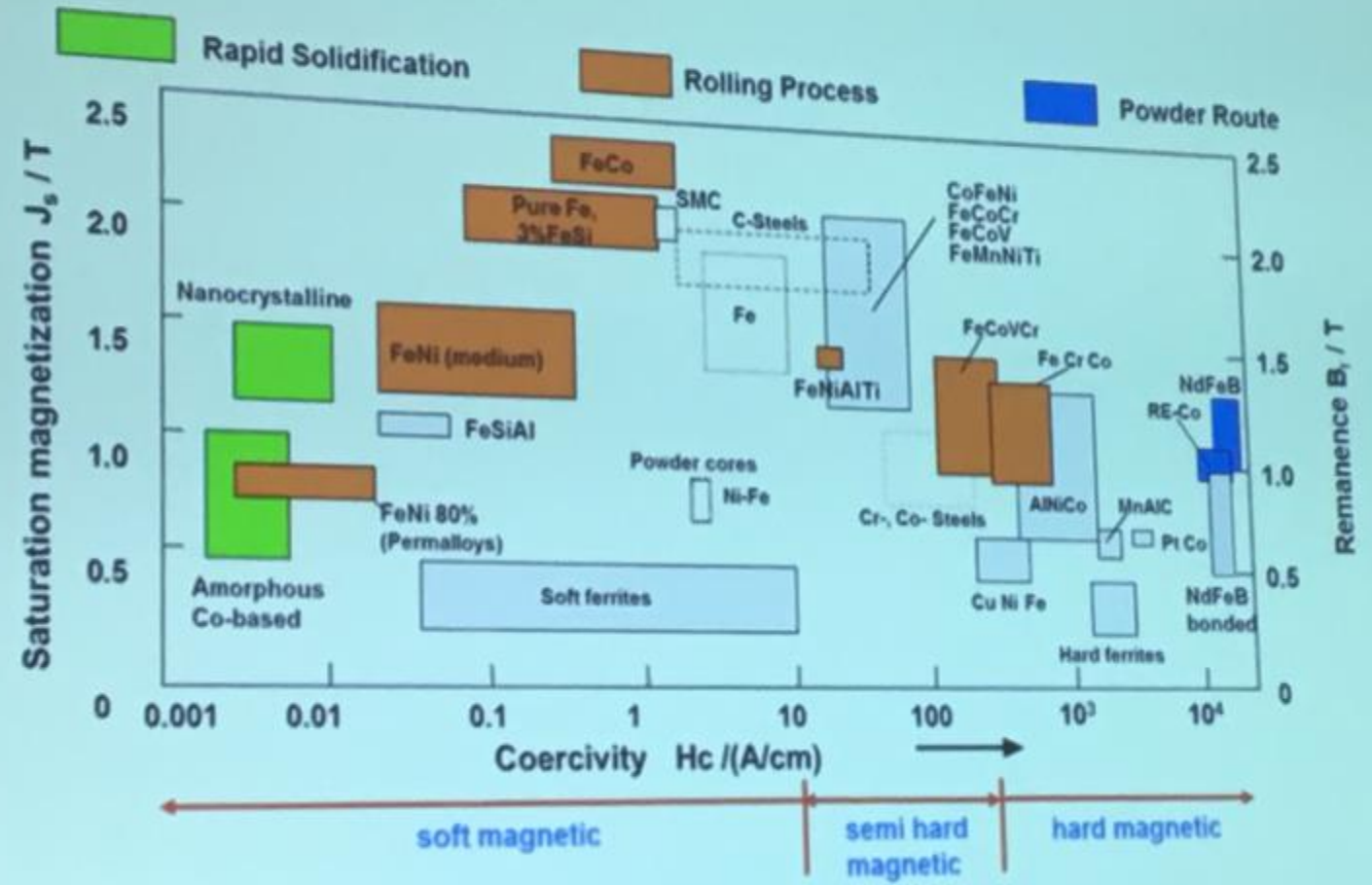
Um bom ímã deve ter altos valores de remanência e campo coercivo.

As propriedades dos ímãs de NdFeB são muito sensíveis à temperatura

O campo coercivo está associado à constante de anisotropia K_1 , mas também depende da microestrutura.

A Remanência está associada à polarização de saturação, mas também depende da microestrutura.

Overview of magnetic materials



- ▶ Falaremos sobre estrutura cristalina, sobre grãos, sobre solução sólida, defeitos causados pela deformação plástica, precipitados e textura.
- ▶ disponibilizarei um pdf de um texto de 27 páginas sobre microestrutura.

PRÓXIMA AULA: MICROESTRUTURA

