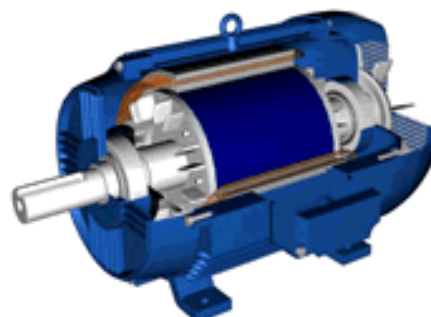
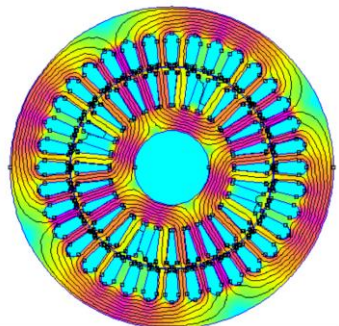


# Aula 3: Curvas de Magnetização e Introdução às Perdas Magnéticas

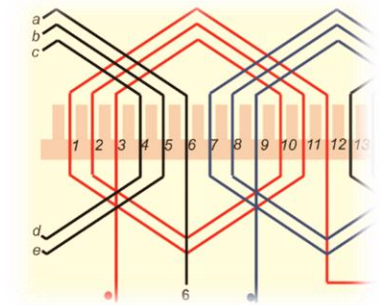
Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



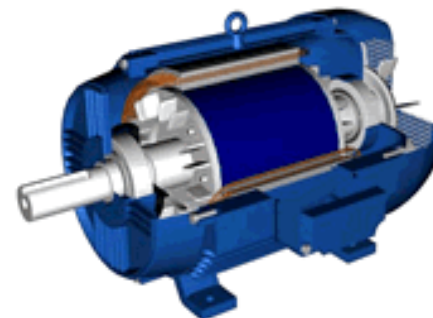
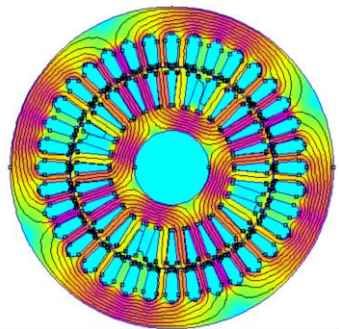
# Sumário

---

- Curva de magnetização
- Histerese magnética
- Lei de Faraday
- Correntes parasitas ou correntes de Foucault
- Redução de perdas magnéticas



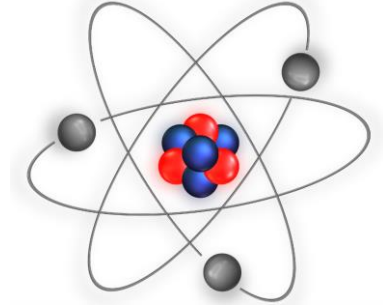
## Curva de magnetização



<http://www.semage.com.br/calternada.php>

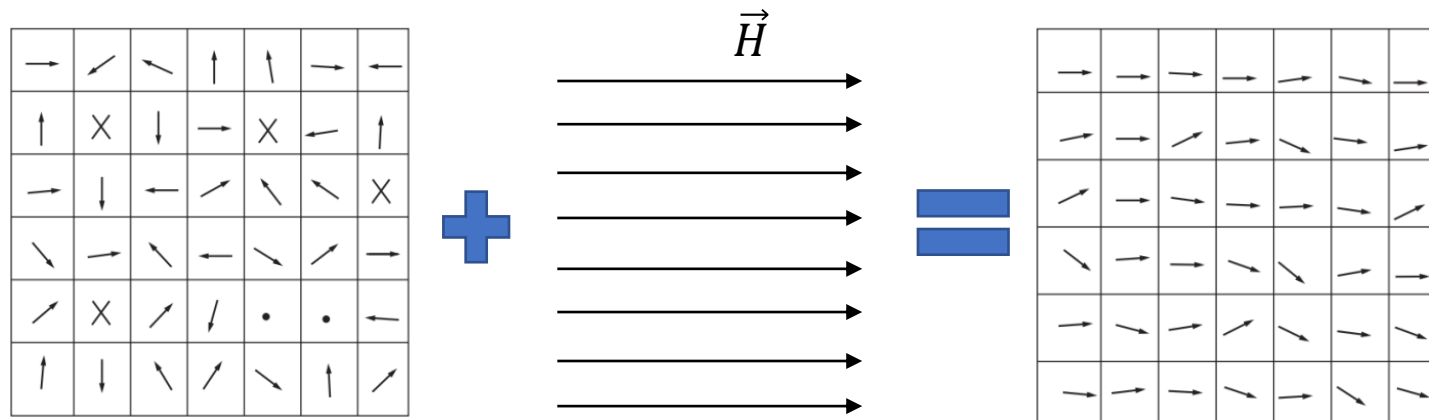


# Magnetização

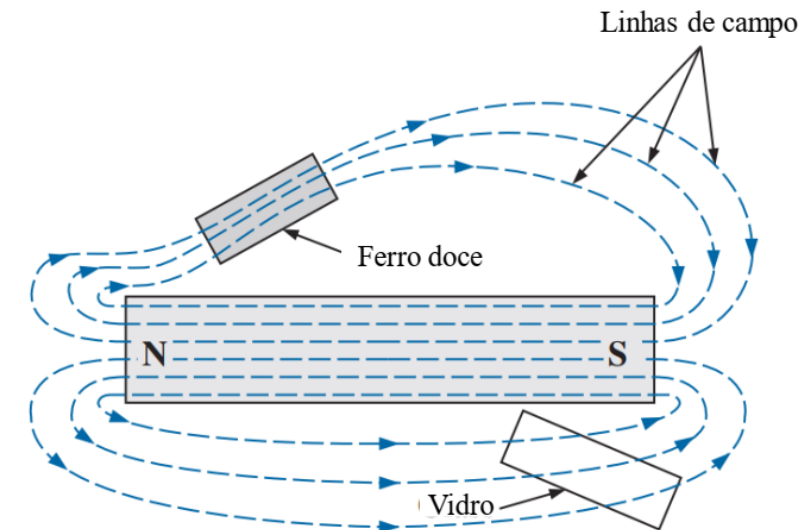


<https://conhecimentocientifico.r7.com/mod/elo-atomico-de-bohr-2/>

- ❑ Natureza elétrica do átomo → Domínios magnéticos;
- ❑ Interação dos domínios com o campo magnético externo;
- ❑ Concentração das linhas de campo magnético (para alguns materiais).



S. J. Chapman. “Fundamentos de Máquinas Elétricas”.



Boylestad, R. L. . “Introdução a análise de circuitos”.

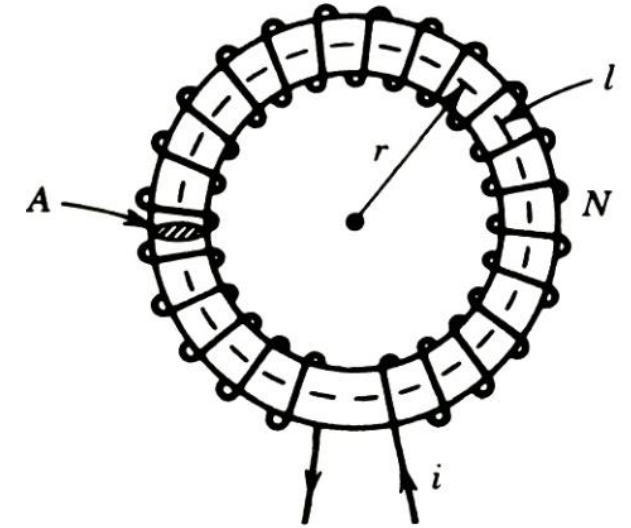
# Curva de magnetização

- ❑ Curva que relaciona  $B$  e  $H$ ;
- ❑ Conceito importante para compreensão das máquinas elétricas;
- ❑ Permite compreender a natureza da permeabilidade magnética e as limitações de um material;
- ❑ Relembrando:

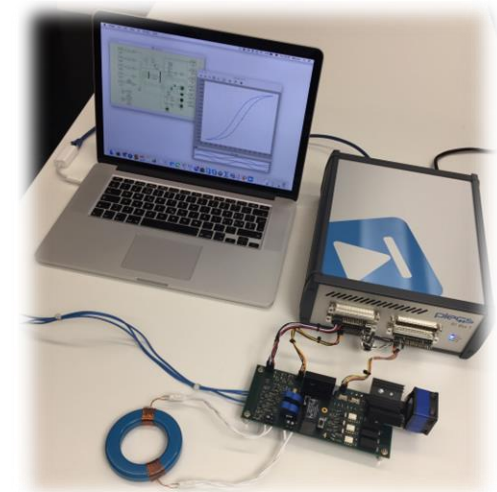
$$B = \mu H \quad \text{ou:} \quad B = \mu_r \mu_0 H$$

# Curva de magnetização - medição

- ❑ Ideia: Imagine que o material encontra-se em repouso;
- ❑ Aplica-se uma corrente cc (e conseqüentemente, uma intensidade de campo) no interior material;
- ❑ Mede-se a densidade de fluxo;
- ❑ Aumenta-se lentamente a corrente e repete-se o procedimento;
- ❑ Plota-se um gráfico que relaciona  $B$  e  $H$ .



P.C. Sen. "Principles of Electric Machines and Power Electronics".

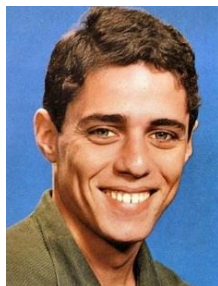
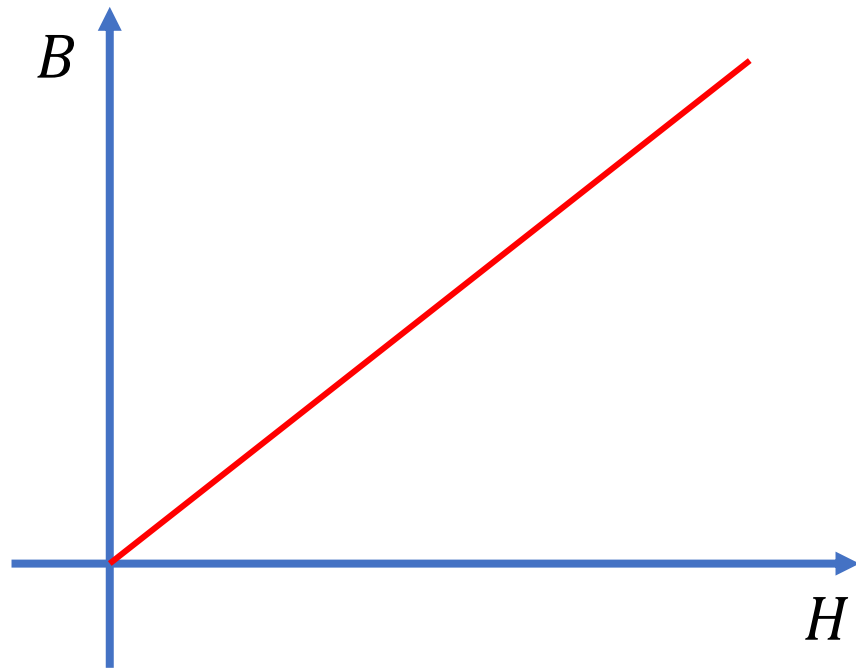


D. Dujic and M. Mogerovic . "High-Power MV MFT Design Optimization Challenges".



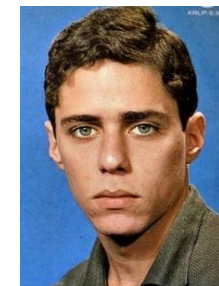
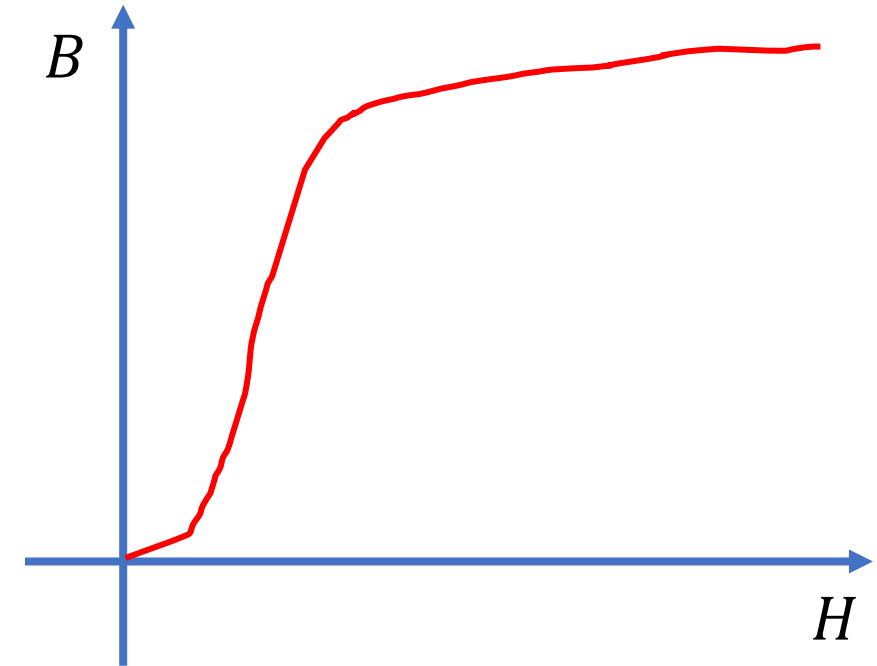
# Curva de magnetização - formato

☐ Expectativa



Chico Buarque de Hollanda, 1966.

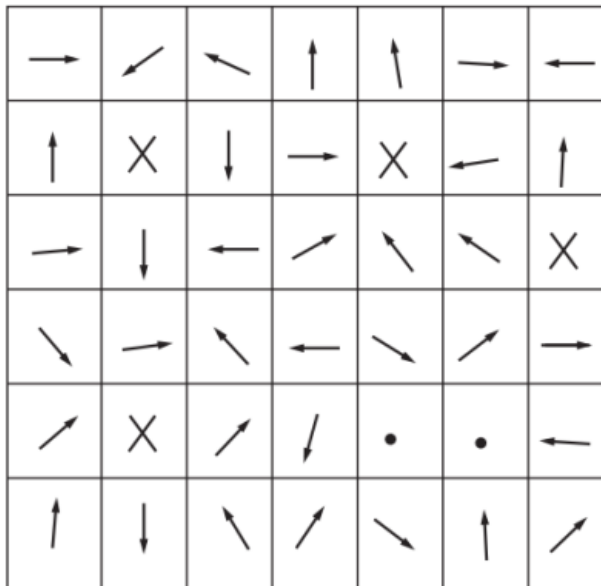
☐ Realidade



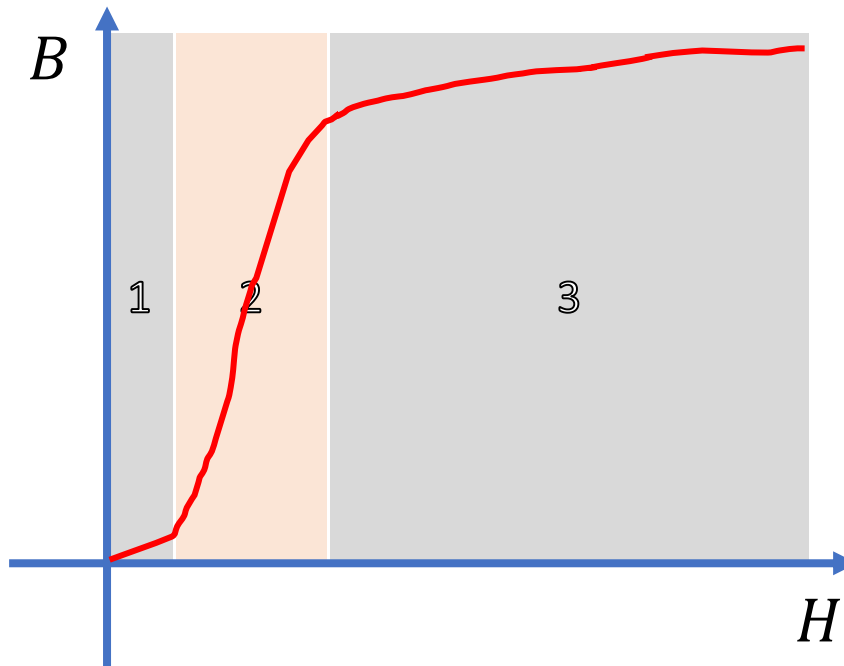
Chico Buarque de Hollanda, 1966.

# Regiões da curva de magnetização

- ❑ Região 1: Relacionada a dificuldade de alinhamento dos domínios;
- ❑ Região 2: Região linear → permeabilidade magnética relativa é definida para esta faixa
- ❑ Região 3: Região de saturação → número de domínios é limitado

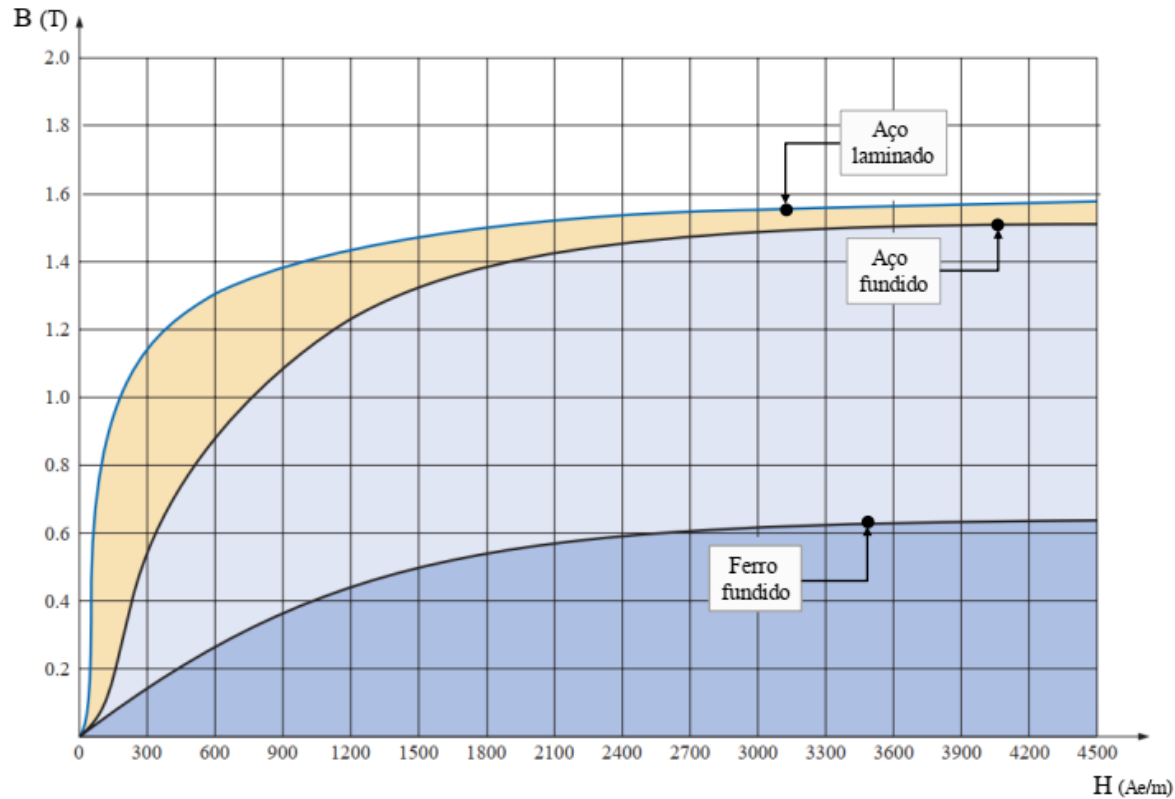


S. J. Chapman. "Fundamentos de Máquinas Elétricas".

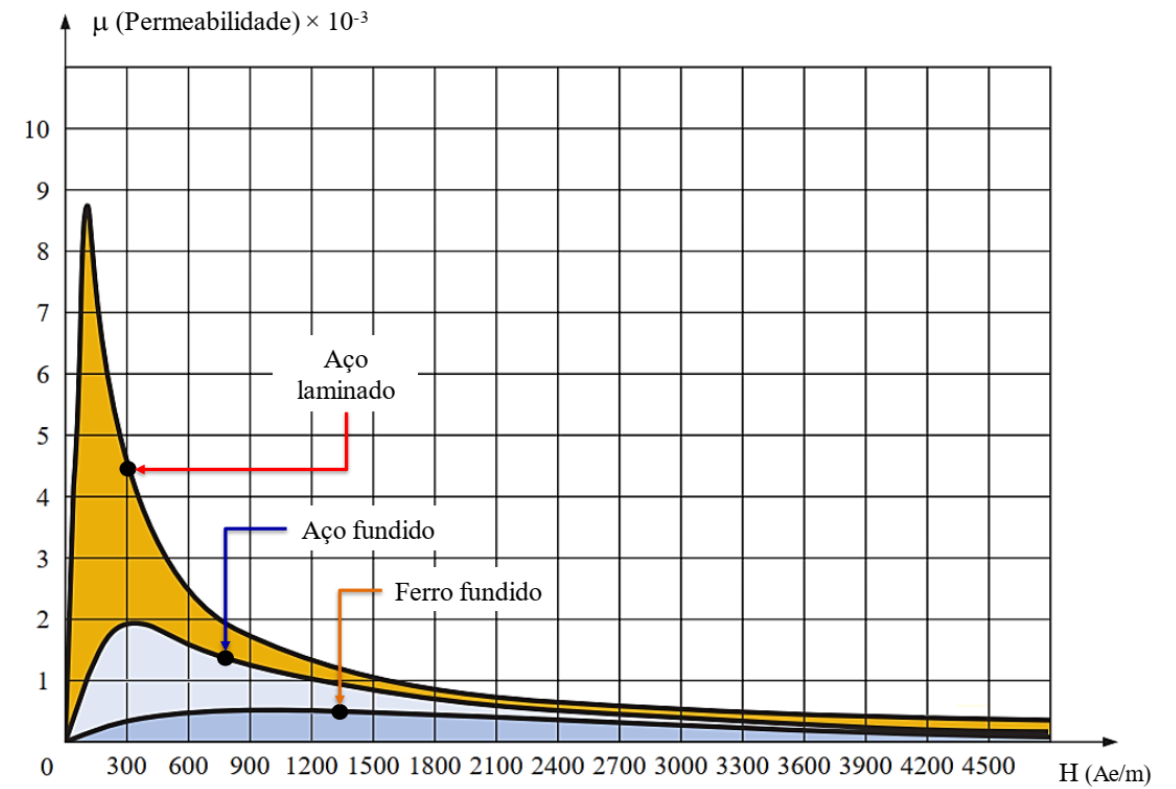




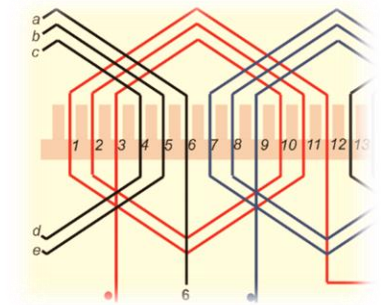
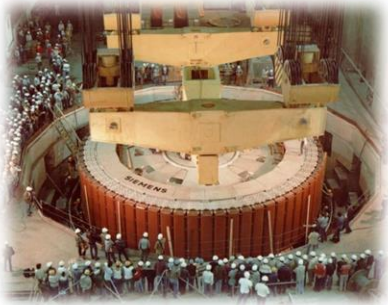
# Exemplos de curvas de magnetização



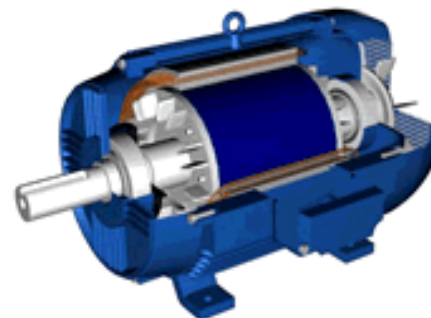
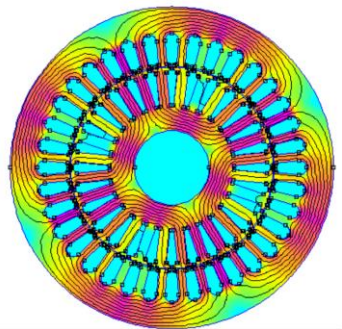
Boylestad, R. L. . “Introdução a análise de circuitos”.



Boylestad, R. L. . “Introdução a análise de circuitos”.



# Histerese magnética

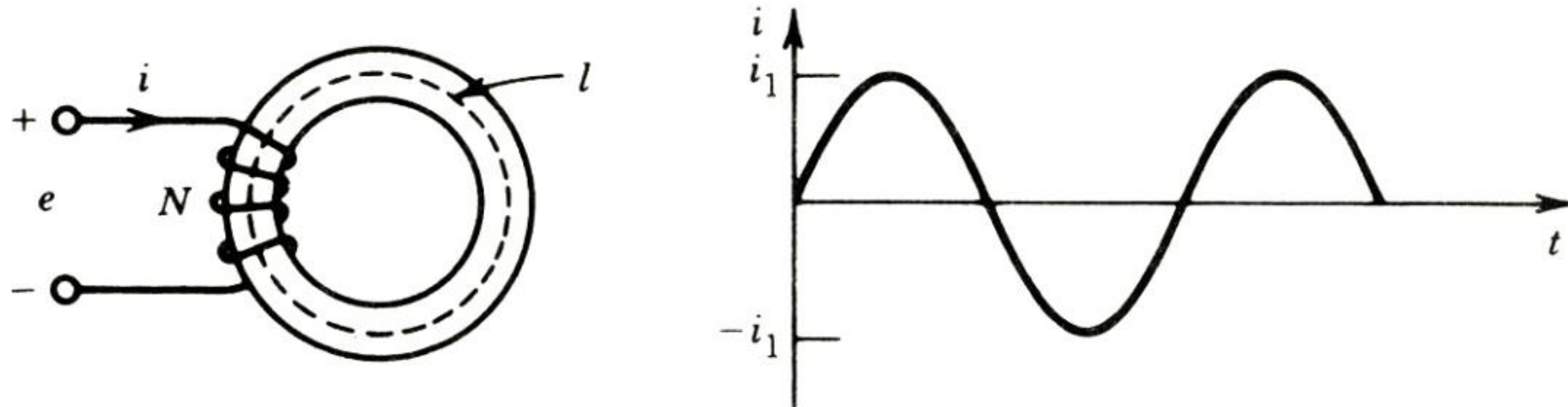


<http://www.semage.com.br/calternada.php>



# Histerese magnética

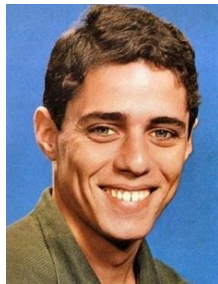
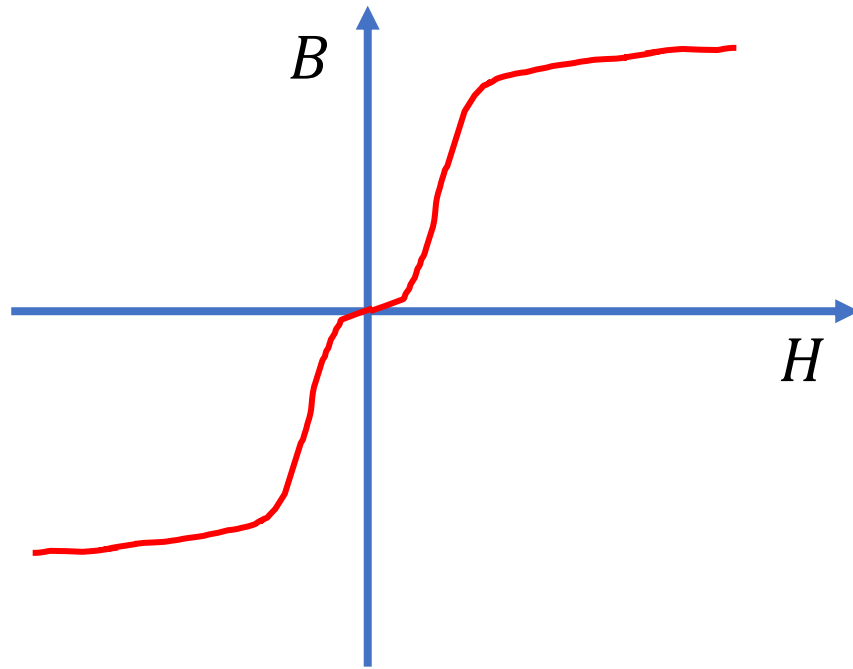
- Como seria o comportamento  $B \times H$  se a corrente aplicada fosse alternada?



P.C. Sen. "Principles of Electric Machines and Power Electronics".

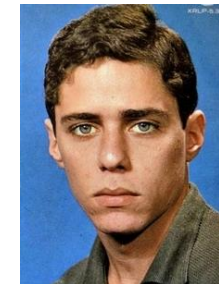
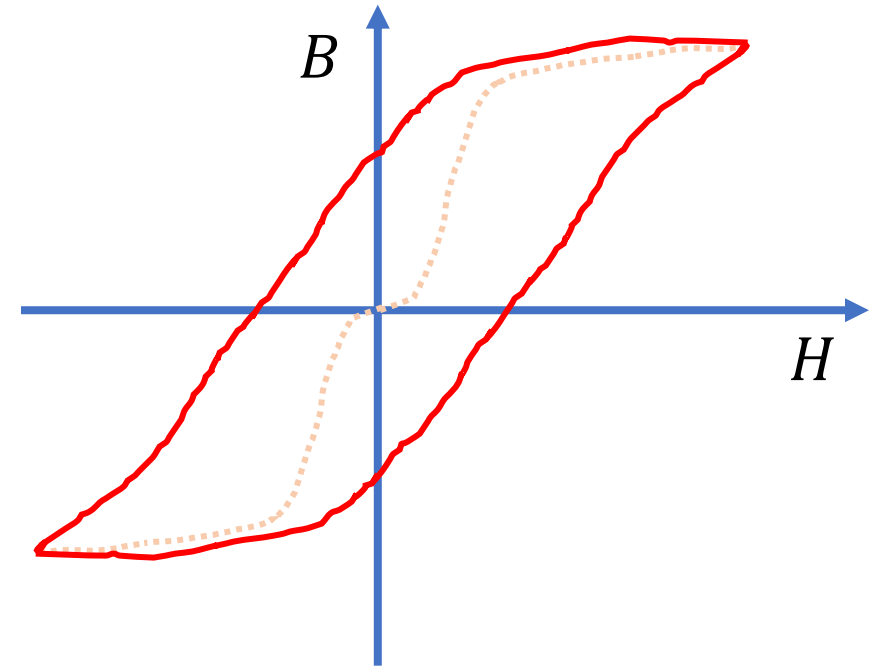
# Curva de magnetização - formato

☐ Expectativa



Chico Buarque de Hollanda, 1966.

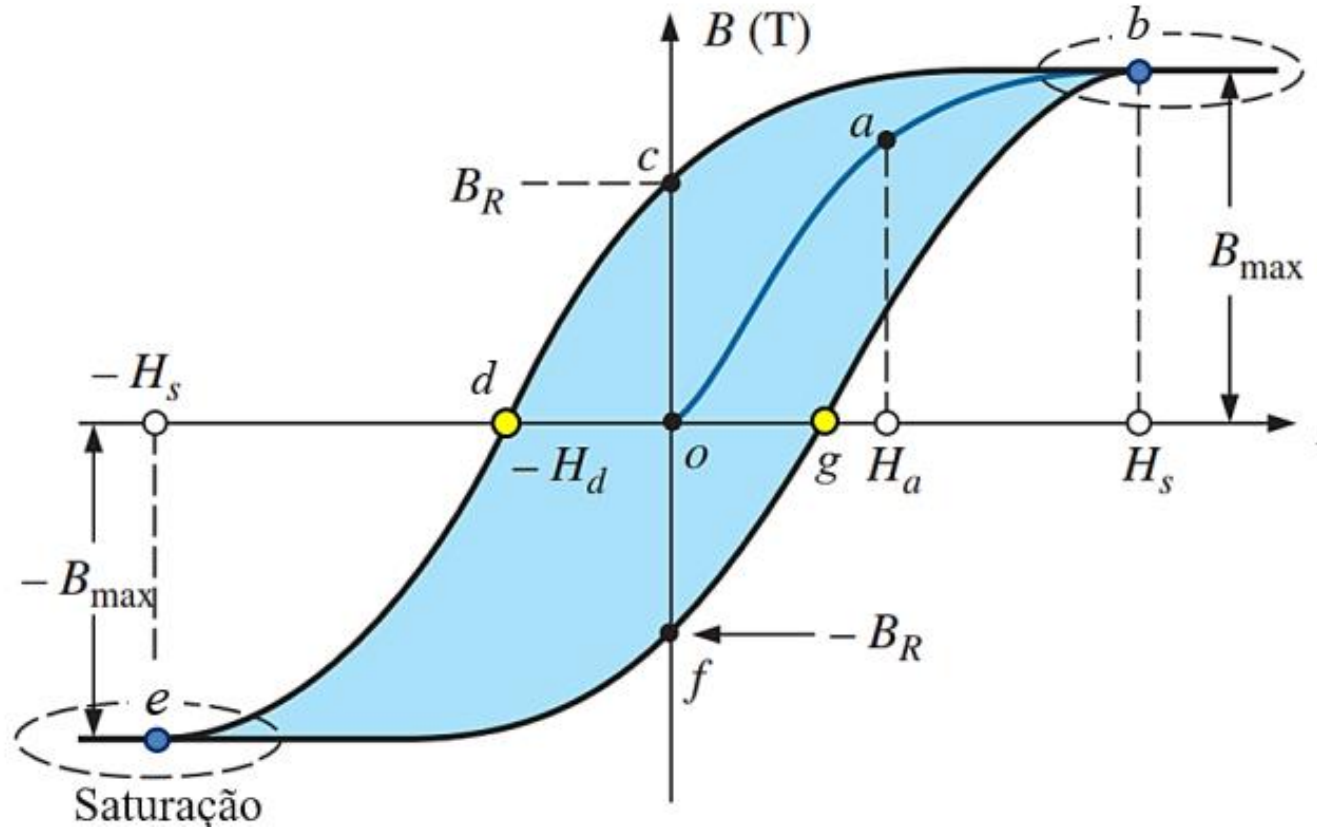
☐ Realidade



Chico Buarque de Hollanda, 1966.

# Características importantes do ciclo de histerese

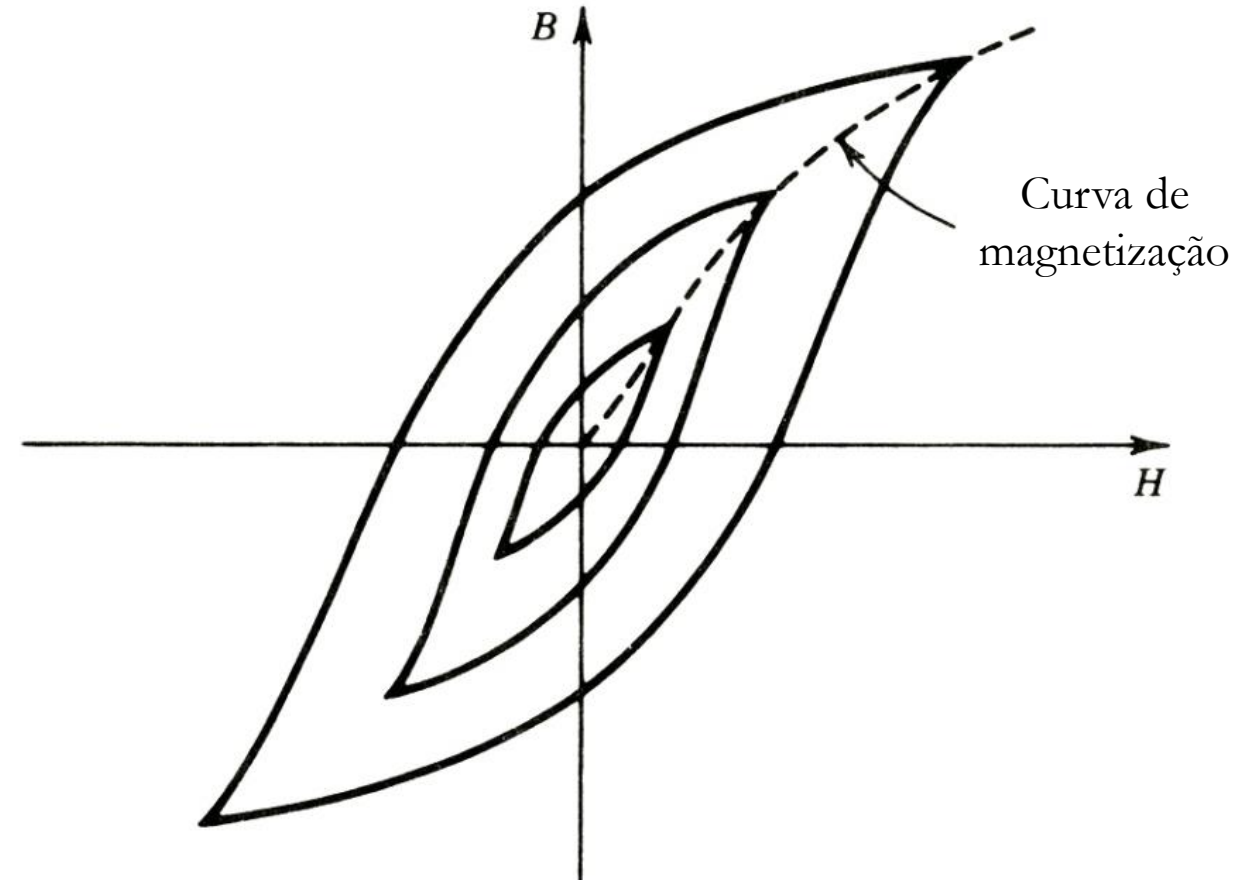
- ❑ Causa: processo de magnetização apresenta perdas. Analogia: deformação plástica.
- ❑ Magnetismo residual ou remanescência;
- ❑ Força coerciva ou coercividade;



Boylestad, R. L. . "Introdução a análise de circuitos".

# Ciclo de histerese

- ❑ O tamanho do ciclo de histerese depende do valor máximo de corrente aplicada;
- ❑ A histerese magnética é um processo que resulta em perdas de potência;
- ❑ É possível provar que as perdas magnéticas por unidade de volume são proporcionais a área do ciclo de histerese e a frequência aplicada.



P.C. Sen. "Principles of Electric Machines and Power Electronics".

# Cálculo de perdas causadas por histerese

- Se um núcleo magnético apresenta um volume  $V_{núcleo}$  e está submetido a uma corrente com frequência  $f$  e o ciclo de histerese apresenta uma área  $A_h$ , a perda em Watts causada por histerese é dada por:

$$P_h = V_{núcleo} A_h f$$

- Charles Steinmetz apresentou uma equação empírica para  $A_h$  para materiais empregados em máquinas elétricas em função do pico de densidade de fluxo  $B_{max}$ :

$$A_h = K B_{max}^n$$

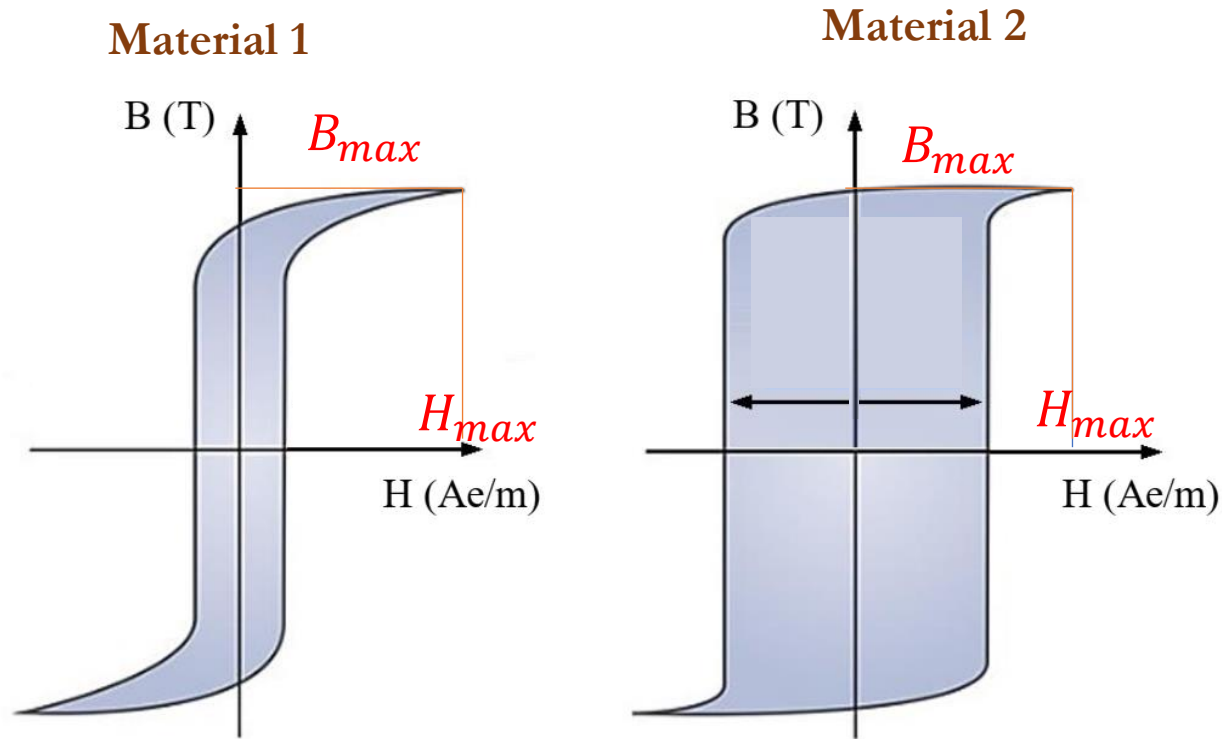
- Portanto, as perdas podem ser estimadas por:

$$P_h = K_h V_{núcleo} B_{max}^n f$$

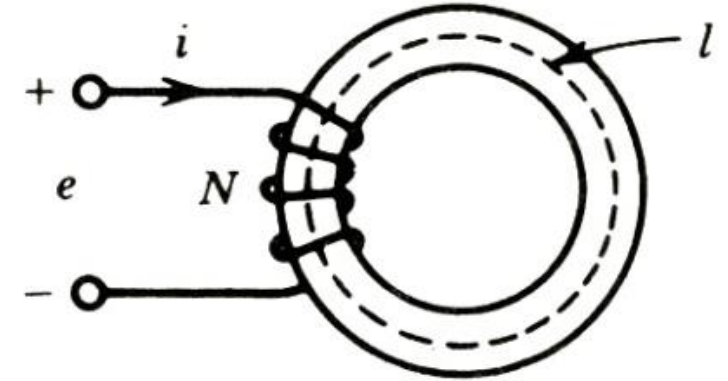
Onde  $n$  (tipicamente entre 1,5 a 2,5) e  $K_h$  são constantes que dependem do material empregado.



# Comparação de dois materiais



Boylestad, R. L. . “Introdução a análise de circuitos”.



P.C. Sen. “Principles of Electric Machines and Power Electronics”.

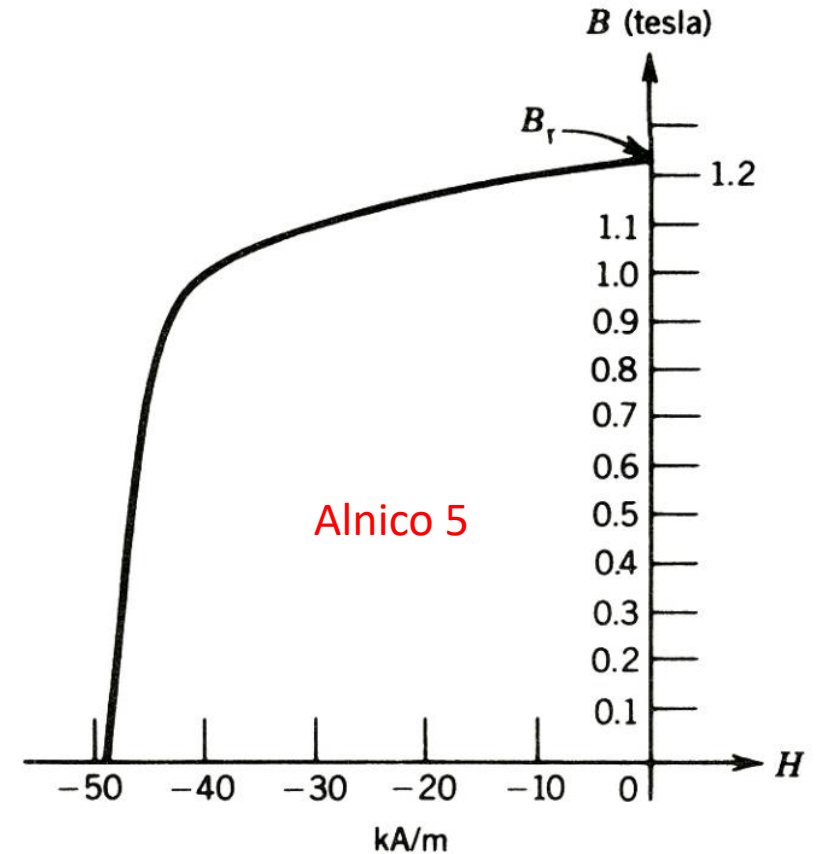


<http://www.magmattec.com.br/indutores>

- ❑ Supondo que estes materiais foram usados para construir um indutor para aplicação em circuitos de corrente alternada, qual deles resultará em maiores perdas magnéticas?

# Ciclo de histerese e ímãs permanentes

- ❑ Materiais magnéticos duros → ciclos de histerese com área elevada;
- ❑ Materiais com coercividades elevadas;
- ❑ Materiais com elevados valores de remanescência;
- ❑ Região de desmagnetização →  $H < 0$ .



P.C. Sen. "Principles of Electric Machines and Power Electronics".

# Obrigado pela Atenção



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



<https://www.facebook.com/gesep>



[https://www.instagram.com/gesep\\_vicosa/](https://www.instagram.com/gesep_vicosa/)



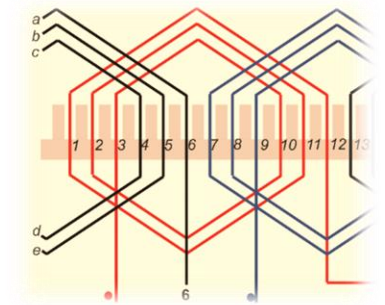
[https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh\\_hDBIcxMU2Nw](https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw)



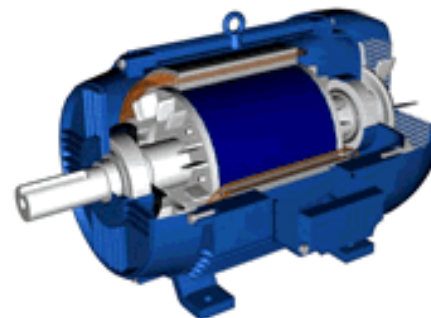
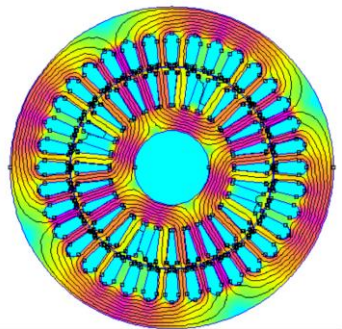
Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>



# Lei de Faraday



<http://www.semage.com.br/calternada.php>



# Experimento de Faraday

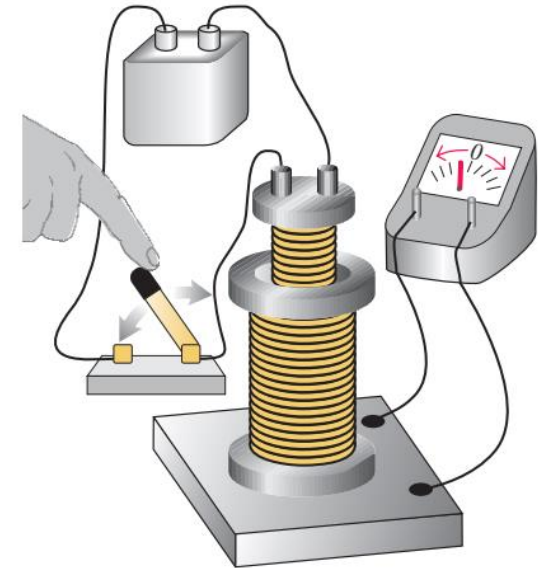
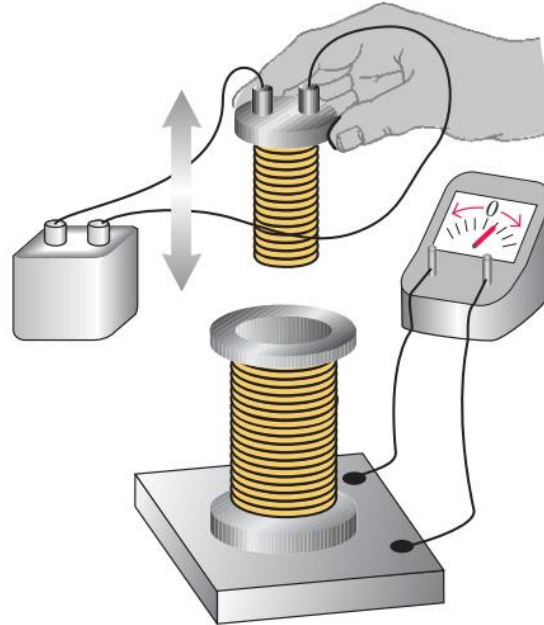
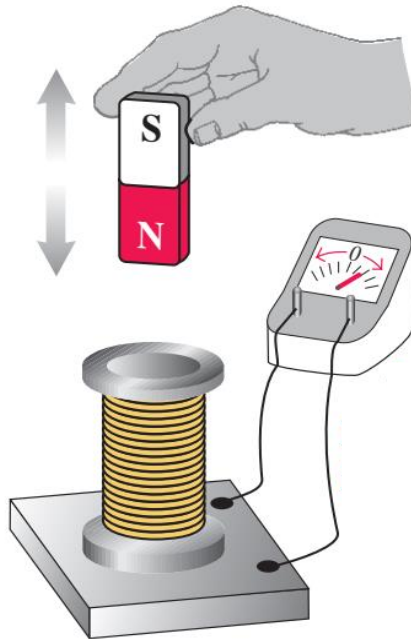
- Movimentação do ímã → tensão induzida na bobina;



Young and Freedman. “Física III: Eletromagnetismo”.

# Experimento de Faraday

- ❑ Conclusão se repete para outros dispositivos eletromagnéticos;
- ❑ Qual o ponto em comum entre esses 3 experimentos?



Young and Freedman. “Física III: Eletromagnetismo”.

- ❑ Resposta: Em todas as situações em que existe tensão induzida, a bobina em repouso experimenta uma variação de fluxo magnético!

# Lei de Faraday

- ❑ Explicação: A tensão induzida se opõe a variação do fluxo magnético. Para uma espira, tem-se que:

$$v_{ind} = - \frac{d\phi}{dt} \approx - \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

- ❑ Por outro lado, para uma bobina com  $N$  espiras é dada por:

$$v_{ind} = - N \frac{d\phi}{dt} \approx - N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Conclusões importantes:



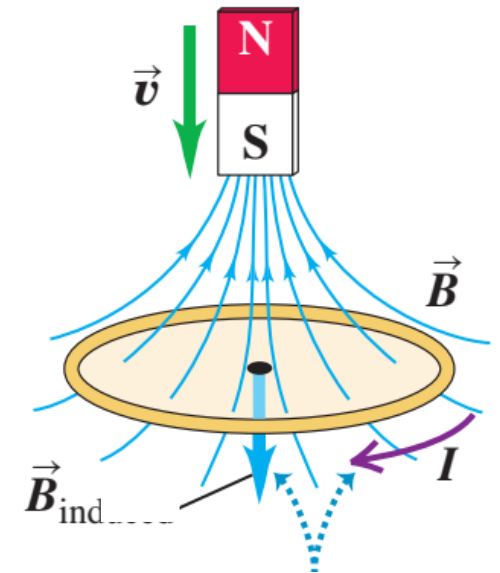
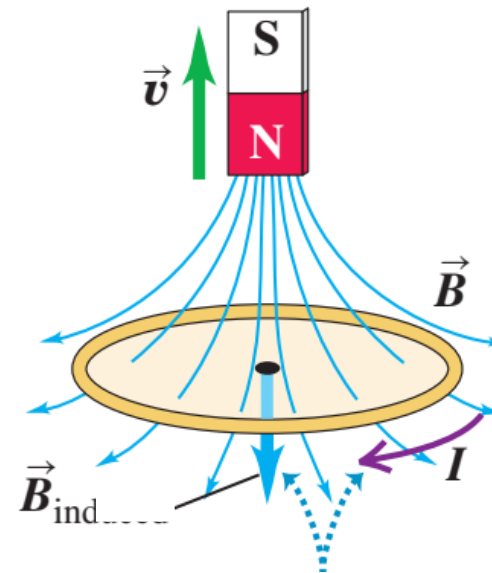
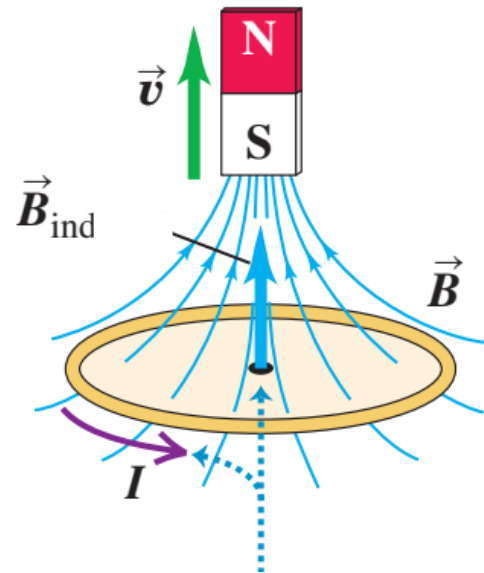
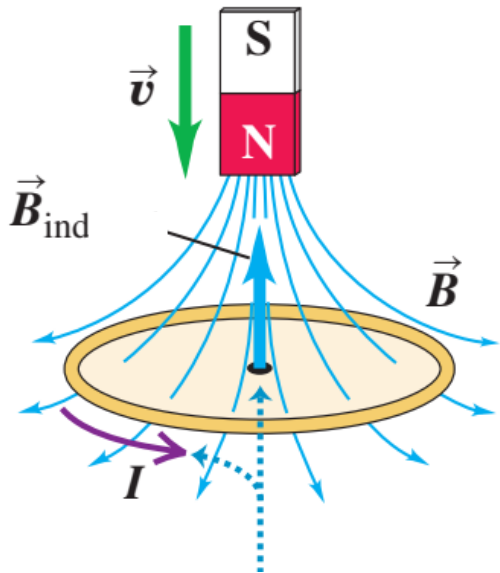
- ❑ Se o fluxo for constante, não haverá tensão induzida;
- ❑ Lei fundamental para compreensão de diversas máquinas elétricas;
- ❑ O sinal negativo que dizer está relacionado com a Lei de Lenz.



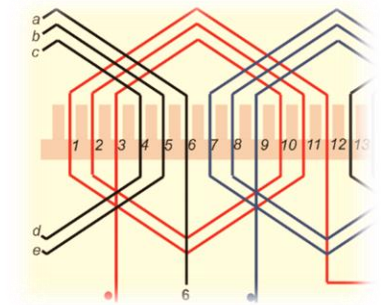
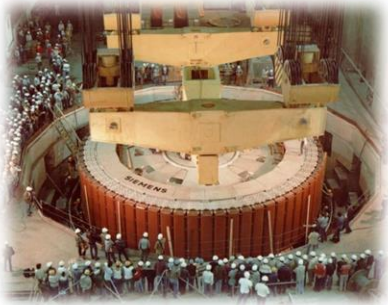
# Sentido da tensão e corrente induzidas

□ Lei de Lenz → O sentido da tensão e corrente induzidas são tais que o fluxo gerado tende a anular a variação de fluxo;

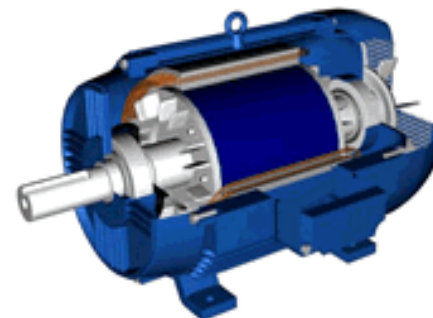
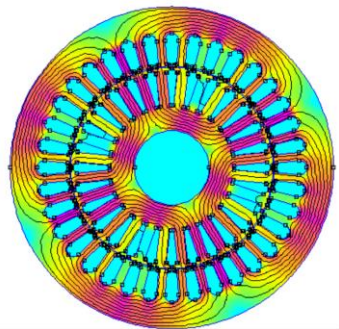
□ Exemplos:



Young and Freedman. "Física III: Eletromagnetismo".



# Correntes de Foucault ou Corrente Parasita

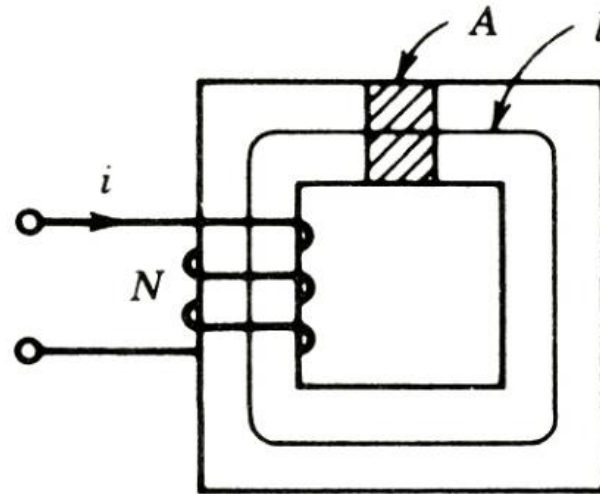


<http://www.semage.com.br/calternada.php>



# Correntes de Foucault

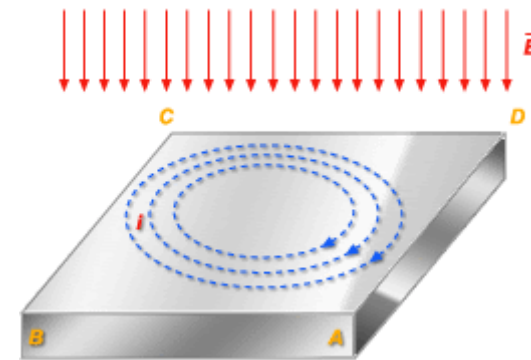
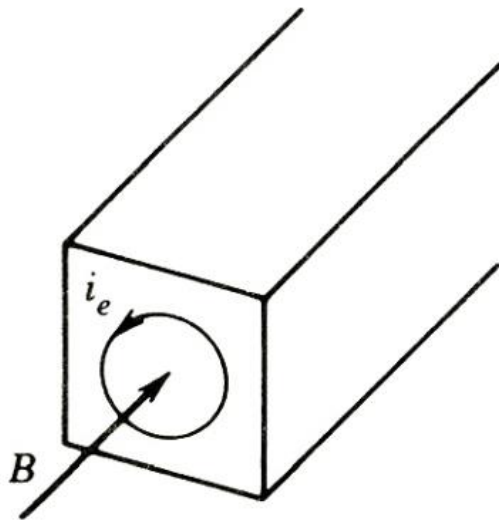
- ❑ Suponha um dispositivo magnético desenvolvido para corrente alternada;
- ❑ O fato do fluxo magnético ser alternado gera, naturalmente, uma variação de fluxo no núcleo;
- ❑ Portanto, é de se esperar que tensões induzidas apareçam ao longo do volume do núcleo magnético (consequência da Lei de Faraday).



P.C. Sen. "Principles of Electric Machines and Power Electronics".

# Correntes de Foucault

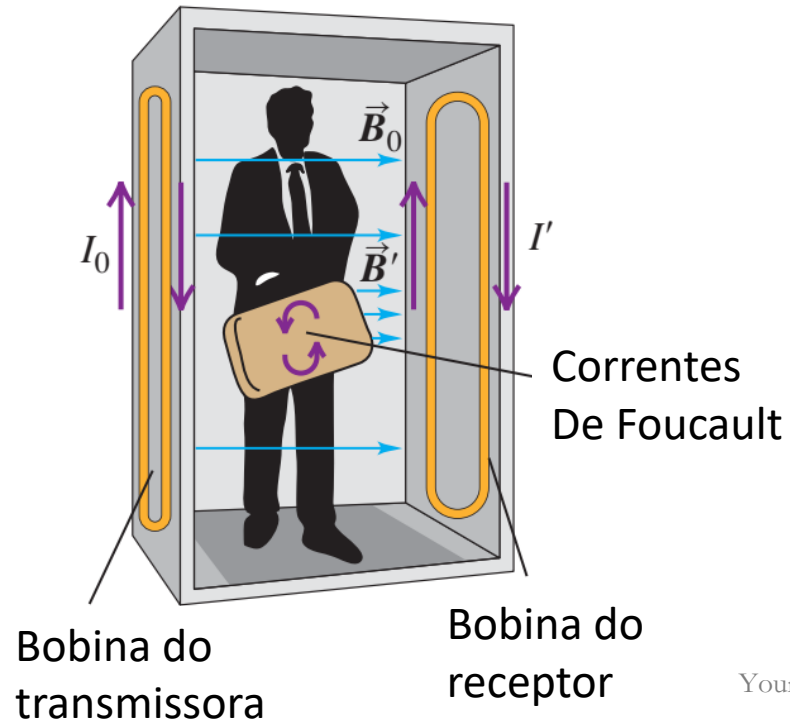
- ❑ Estas tensões induzidas provocam uma circulação de correntes **no interior do núcleo**;
- ❑ Estas correntes são denominadas correntes parasitas ou correntes de Foucault.



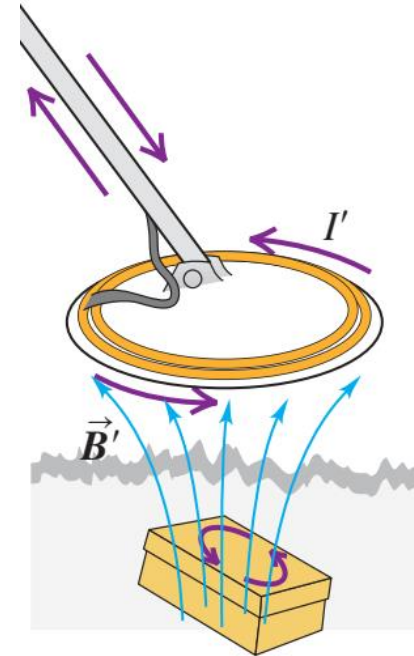
[http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/inducaao/correntes\\_foucault/](http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/inducaao/correntes_foucault/)

P.C. Sen. "Principles of Electric Machines and Power Electronics".

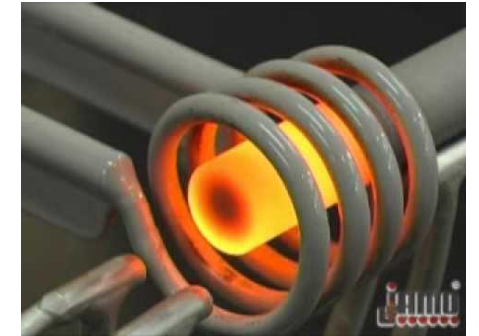
# Aplicações da corrente de Foucault



Young and Freedman. "Física III: Eletromagnetismo".



Young and Freedman. "Física III: Eletromagnetismo".



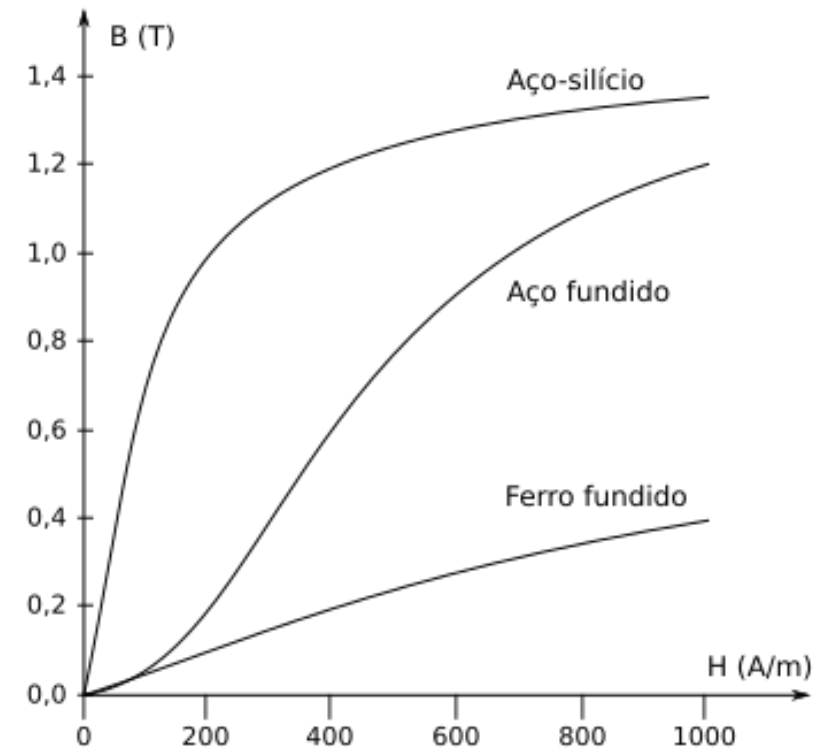
<https://www.youtube.com/watch?v=wIhKcGeIIp0>

# Problemas causados pelas correntes de Foucault

- ❑ A circulação das correntes de Foucault geram perdas por efeito Joule ( $P = Ri^2$ );
- ❑ Isto é um problema que deve ser contornado em transformadores e motores;
- ❑ Como reduzir as correntes de Foucault?

## Solução 1

- ❑ Aumentar a resistividade do material;
- ❑ Inserção de silício (por exemplo, 4 %) aumenta significativamente a resistividade do material (além de melhorar as propriedades magnéticas).



[https://www.mspc.eng.br/dir10/em\\_2-6.php](https://www.mspc.eng.br/dir10/em_2-6.php)

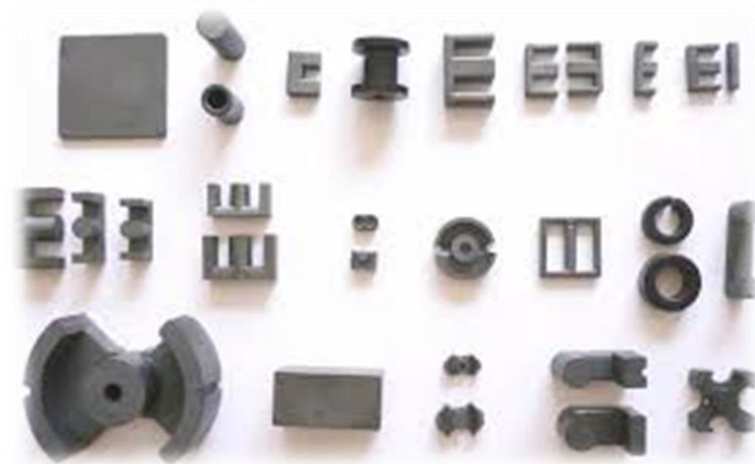


# Materiais de alta resistividade

## □ Ferrites



<https://www.magmattec.com.br/>



<https://www.thornton.com.br/>

## □ Pó de ferro



<https://www.magmattec.com.br/>

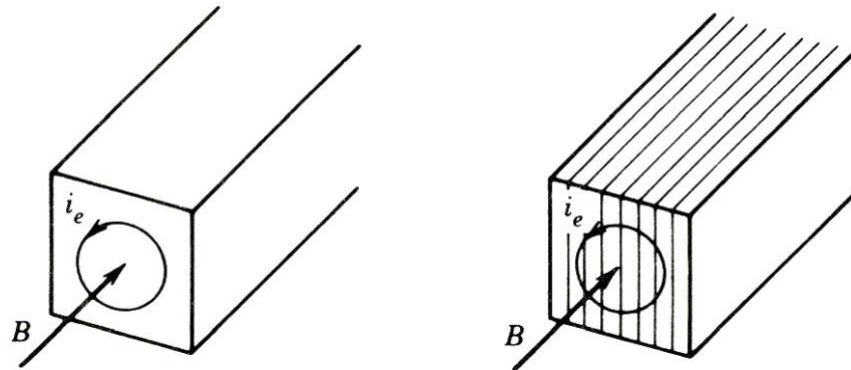


<https://www.micrometals.com/>

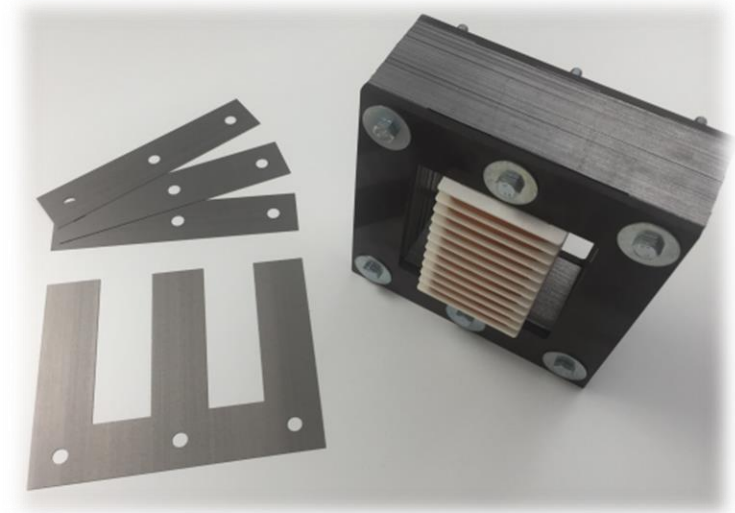


# Laminação

- ❑ Núcleo maciço é substituído por um núcleo laminado;
- ❑ Lâminas são revestidas por uma camada de óxido de silício, que é um material isolante;
- ❑ Isto é utilizado em todas as partes da máquina elétrica onde um fluxo variante no tempo é esperado.



P.C. Sen. "Principles of Electric Machines and Power Electronics".



D. Dujic and M. Mogorovic . "High-Power MV MFT Design Optimization Challenges".

# Aço Silício

## Aço silício de grão orientados (GO)

- ❑ Propriedades magnéticas otimizadas na direção da laminação;
- ❑ Geralmente utilizados em transformadores de potência e em transformadores de distribuição;



## Aço silício de grãos não-orientados (GNO)

- ❑ Boas propriedades magnéticas em qualquer direção considerada;
- ❑ Aplicações: motores elétricos, geradores, reatores de lâmpadas fluorescentes, etc.



<https://www.weg.net/institucional/BR/pt/>

# Perdas causadas pelas correntes de Foucault

A perda em Watts causada pelas correntes de Foucault podem ser estimadas por:

$$P_f = K_e B_{max}^2 f^2$$

$K_e$  é uma constante empírica que depende do tipo de material e da laminação.

**Curiosidade: Espessura típica das lâminas:**

- ❑ 0,5 a 5 mm para máquinas elétricas;
- ❑ 0,01 a 0,1 mm para dispositivos empregados em conversores eletrônicos de alta frequência.

# Perdas no núcleo ou perdas magnéticas

A perda total no núcleo, denotada por  $P_{hf}$ , é dada por:

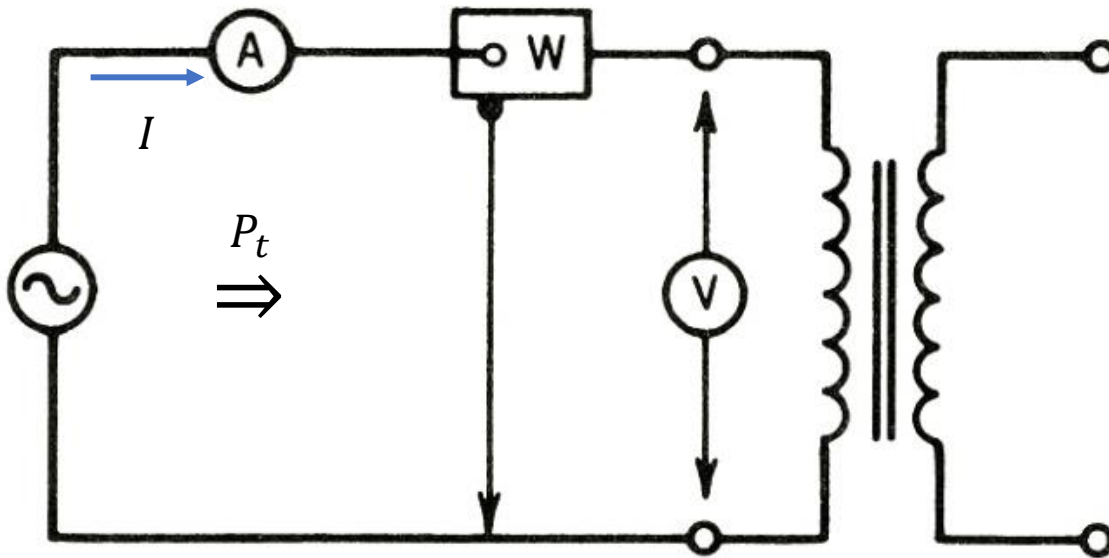
$$P_{hf} = P_h + P_f \Leftrightarrow \boxed{P_{hf} = V_{núcleo} A_h f + K_e B_{max}^2 f^2}$$

Importante: 

- $P_{hf}$  pode ser obtida experimentalmente a partir de um Wattímetro;
- Não é trivial separar as perdas causadas por histerese e por corrente de Foucault;
- Contudo, na maioria das vezes, não é necessário conhecer o valor destas perdas separadamente.

# Medição das perdas magnéticas por um Wattímetro

- ❑  $P_{hf}$  pode ser obtida experimentalmente a partir de um Wattímetro;
- ❑ Deve-se conhecer previamente a resistência elétrica do enrolamento  $R$ .

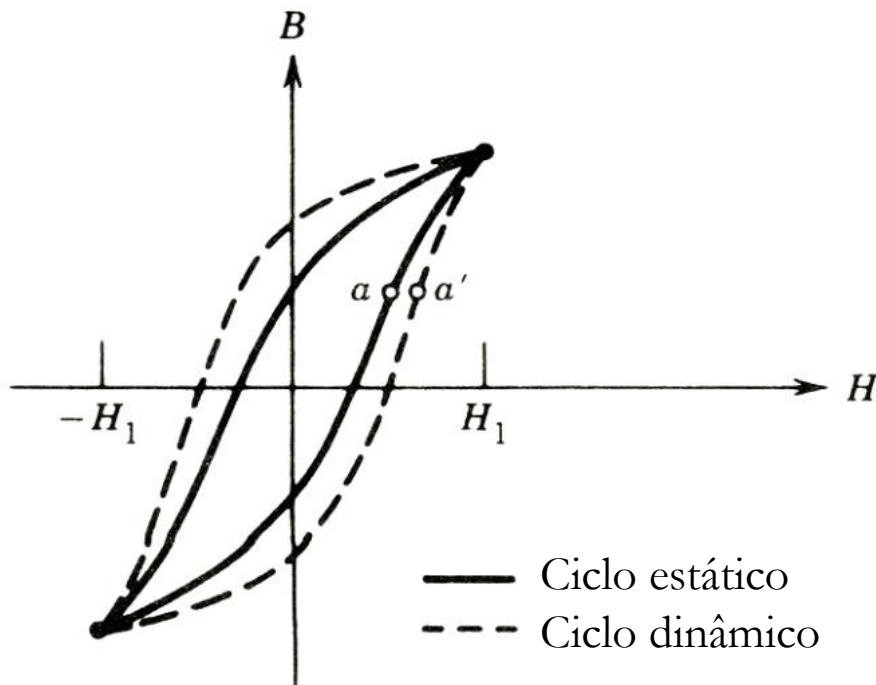


$$P_{hf} = P_t - R I^2$$

P.C. Sen. "Principles of Electric Machines and Power Electronics".

# Ciclo de Histerese Dinâmico

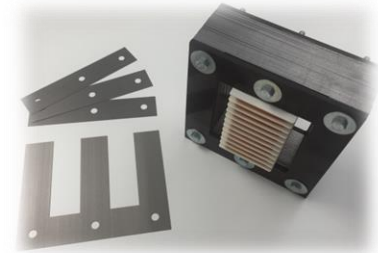
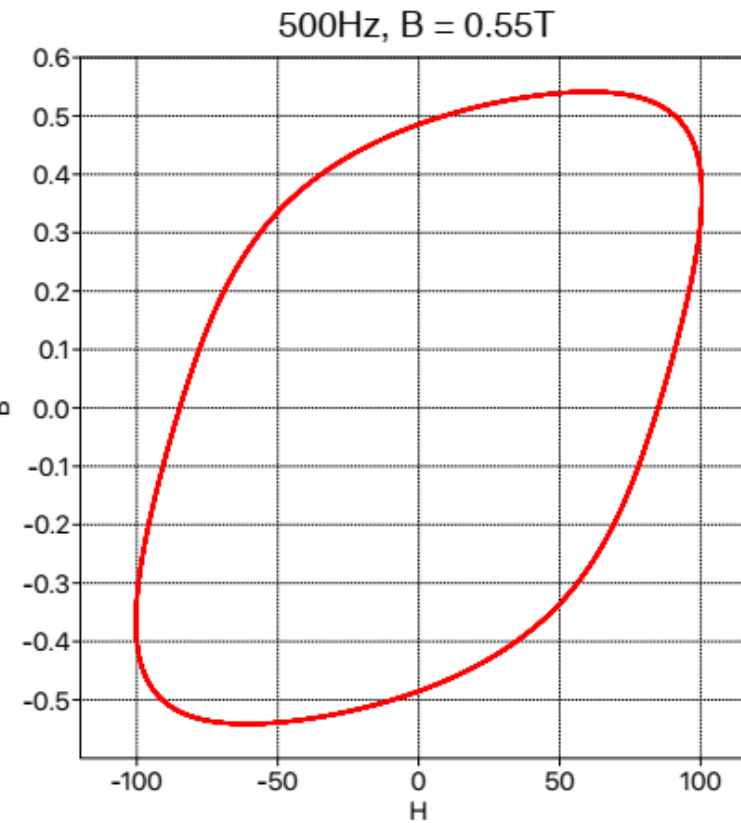
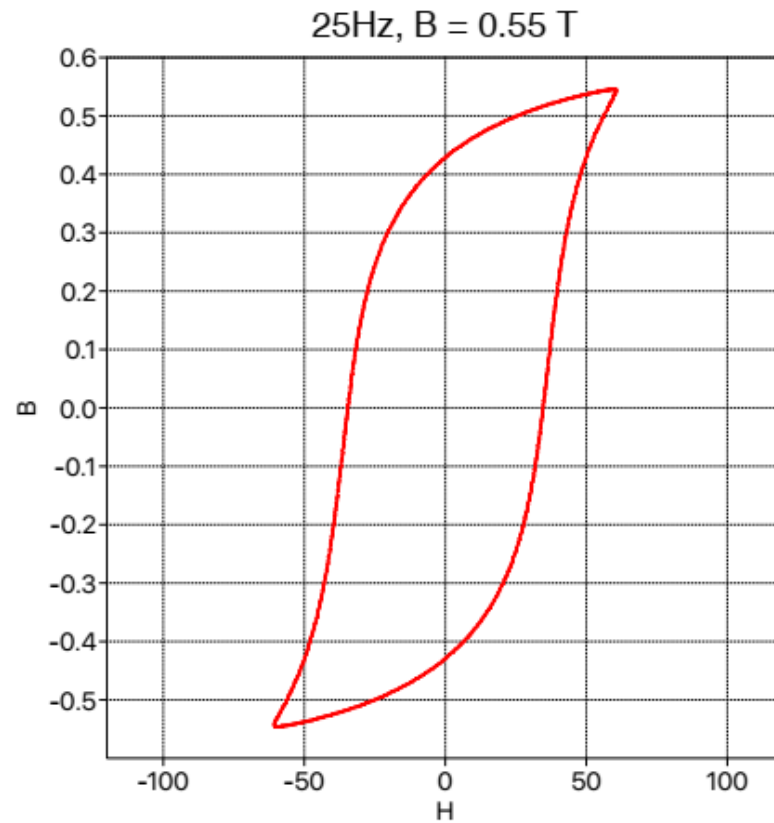
- Efeito da corrente de Foucault no ciclo de histerese só é desprezível no caso de variações lentas. Isto resulta no ciclo de histerese estático;
- Excitação em corrente alternada: Histerese magnética e correntes de Foucault são fenômenos que coexistem → ciclo de histerese dinâmico de área  $A_{h,d}$ .



$$P_{hf} = V_{núcleo} A_{h,d} f$$

P.C. Sen. "Principles of Electric Machines and Power Electronics".

# Exemplo de medição experimental – Aço silício M330-35



D. Dujic and M. Mogerovic . “High-Power MV MFT Design Optimization Challenges”.



# Obrigado pela Atenção



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



<https://www.facebook.com/gesep>



[https://www.instagram.com/gesep\\_vicosa/](https://www.instagram.com/gesep_vicosa/)



[https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh\\_hDBIcxMU2Nw](https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw)



Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>