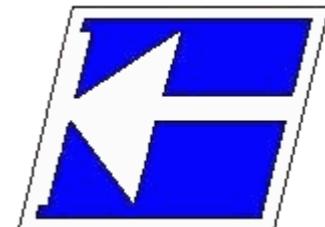


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Eletrônica de Potência



Projeto de Elementos Magnéticos Revisão de Eletromagnetismo

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, novembro de 2015.

Biografia para Esta Aula

Revisão de eletromagnetismo:

- Conceitos iniciais;
- Grandezas eletromagnéticas;
- Perdas magnéticas;
- Tipos de núcleos;
- Lei de Lenz e Lei de Faraday;
- Indutores e transformadores.

 **TEXAS INSTRUMENTS** <http://www.ti.com>

2001 Magnetics Design Handbook - MAG100A

Duration	1 Day
Price	Free
Course Documents/ Reference Material	<ul style="list-style-type: none"> Ref. Design Sect. R5-1: Coupled Filter Inductors Yield Improved Performance Introduction and Basic Magnetics (Magnetics Design for Six: Power Supplies) Magnetic Core Characteristics Windings Power Transformer Design Inductor and Flyback Transformer Design Ref. Design Sect. R1-1: Magnetic Core Properties Ref. Design Sect. R2-1: Eddy Current Losses in X-former Windings Ref. Design Sect. R3-1: Deriving the Equivalent Electrical Circuit Ref. Design Sect. R4-1: The Effect of Leakage Inductance on Performance Ref. Design Sect. R6-1: How to Design a Transformer with Fractional Turns Ref. Design Sect. R7-1: Winding Data All 2001 Magnetics Design Handbook Sections in a single compressed zip file

www.ProfessorPetry.com.br



Disciplina

Piano de Ensino (2009/1)	Data das avaliações	Notas da disciplina
Baixe o plano de ensino da disciplina:	<ul style="list-style-type: none"> • Primeira avaliação = • Segunda avaliação = • Terceira avaliação = • Quarta avaliação = • Seminário = 	<p>Acesse aqui: </p> <p>Dúvidas, entre em contato: petry@cefetsc.edu.br</p>
Aulas	Notas de Aula	Apresentações
00		Apresentação da disciplina
01		
02		
03		
04		
05		
06		
07		
08		
09		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		

Complementos

Lista de exercícios

Avaliações anteriores

Nesta Aula

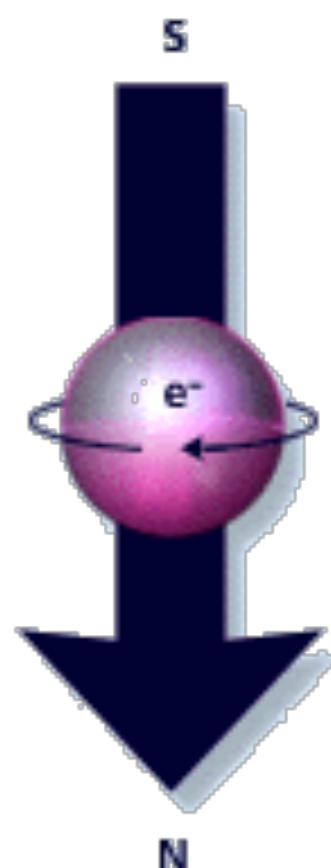
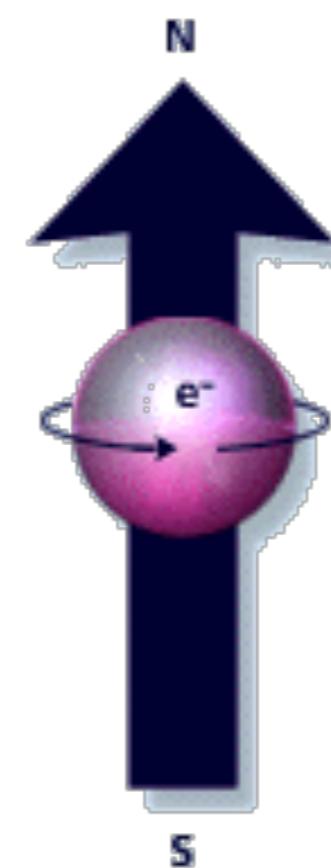
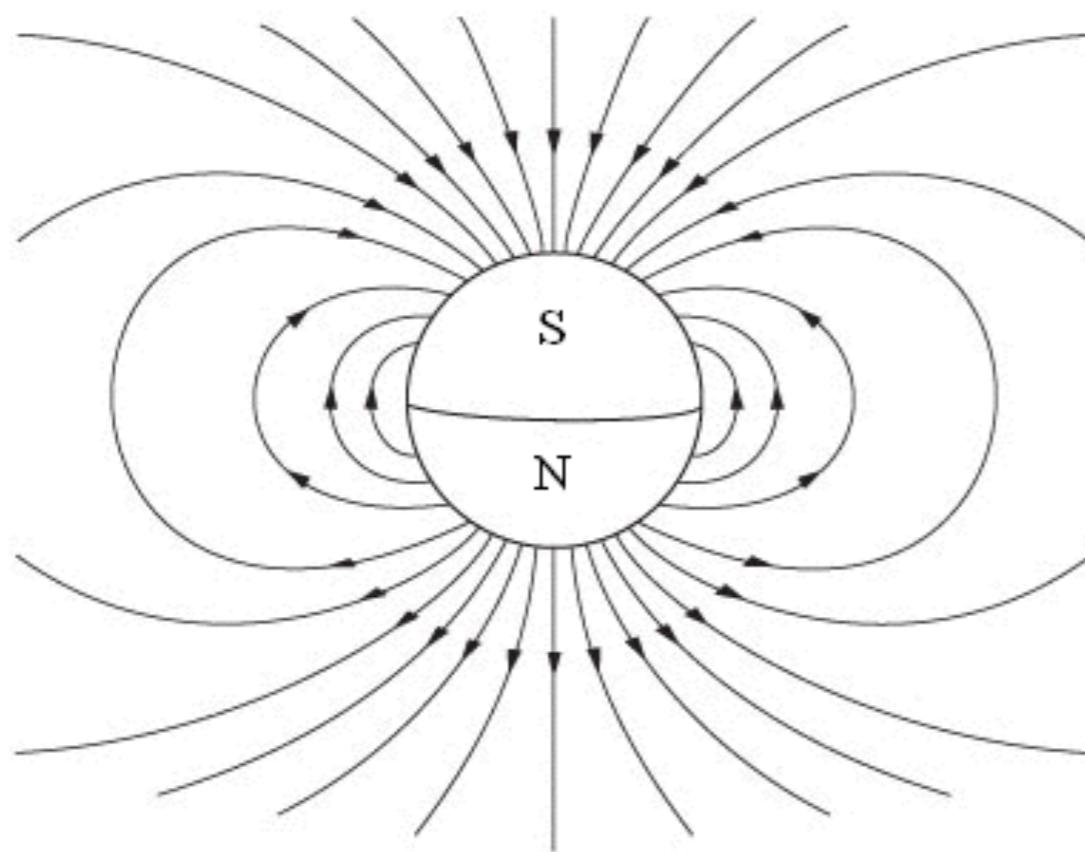
Revisão de eletromagnetismo:

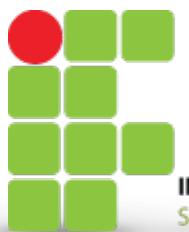
- Conceitos iniciais;
- Grandezas eletromagnéticas;
- Perdas magnéticas;
- Tipos de núcleos;
- Lei de Lenz e Lei de Faraday;
- Indutores e transformadores.

Conceitos Iniciais

Dipolos magnéticos:

- Determinam o comportamento dos materiais num campo magnético;
- Tem origem no momentum angular dos elétrons nos íons ou átomos que formam a matéria.

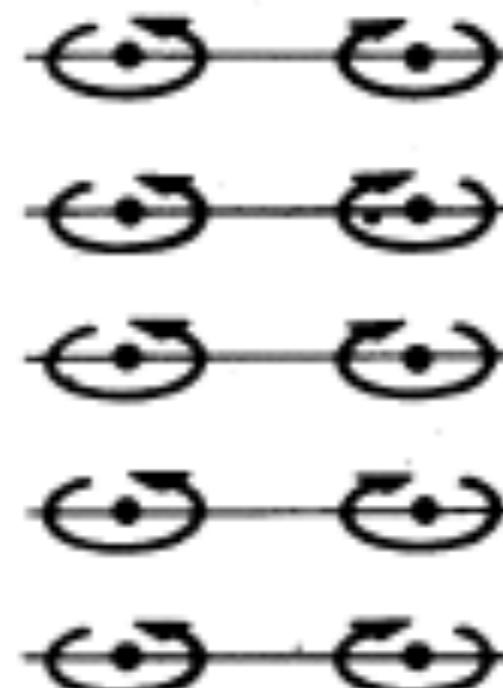
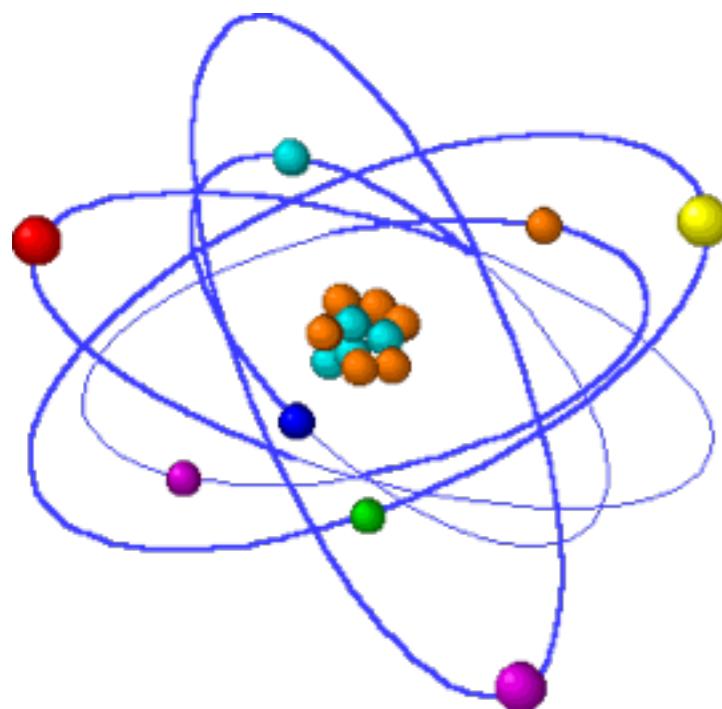




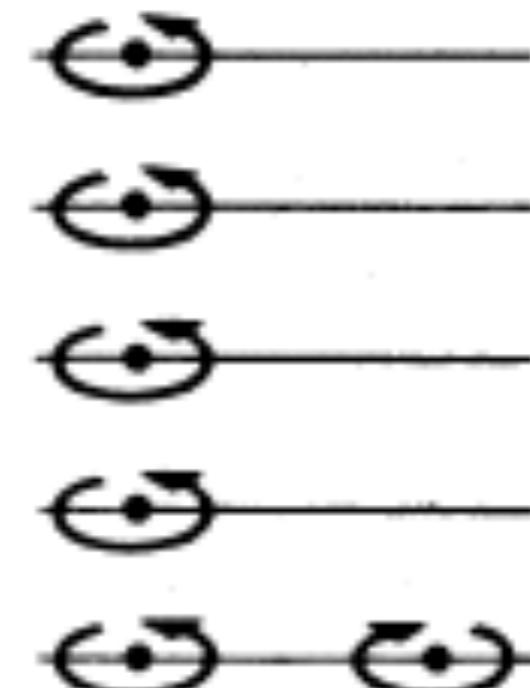
Conceitos Iniciais

Magnetismo atômico:

- 2 elétrons ocupam o mesmo nível energético;
- Estes elétrons tem spins opostos;
- Subníveis internos não completos dão origem a um momento magnético não nulo.



Momento - 0

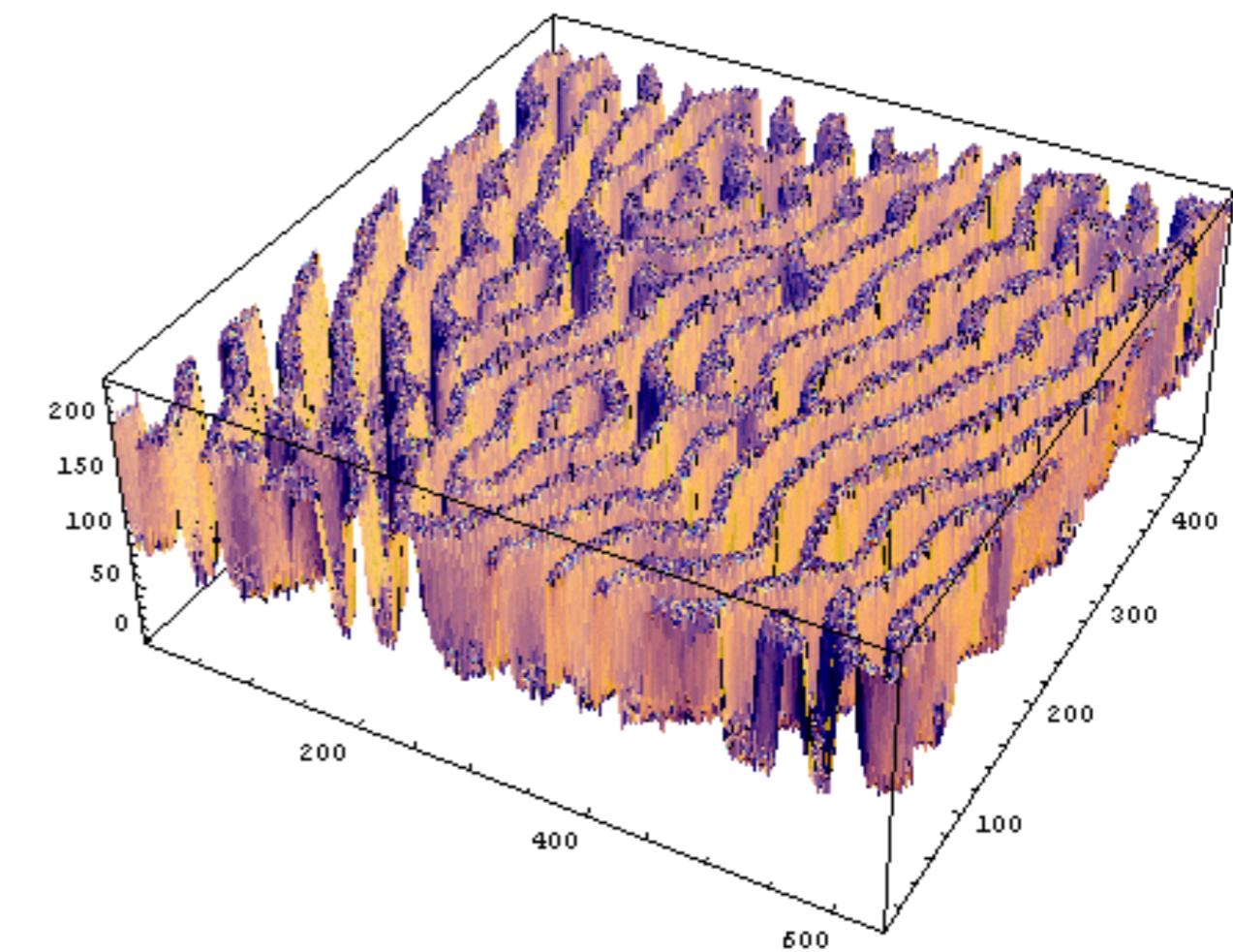
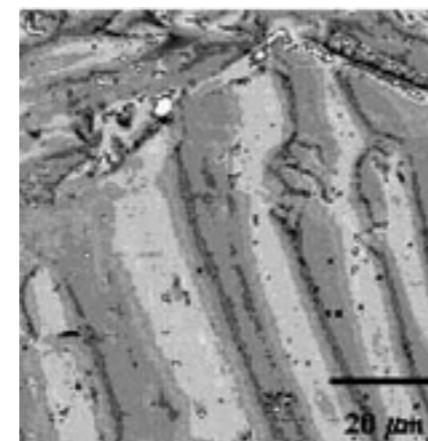
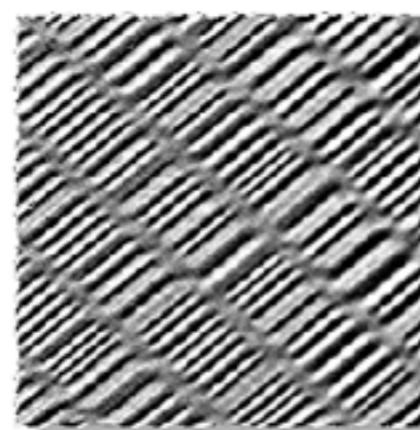
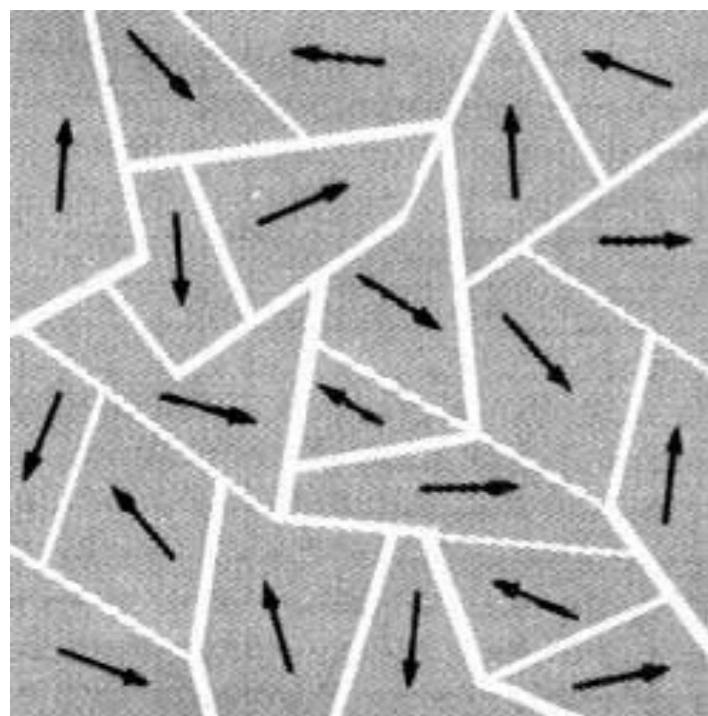


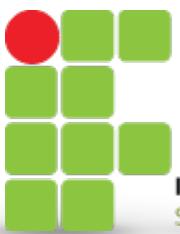
Momento $\neq 0$

Conceitos Iniciais

Domínios magnéticos:

- Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
- Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
- Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.

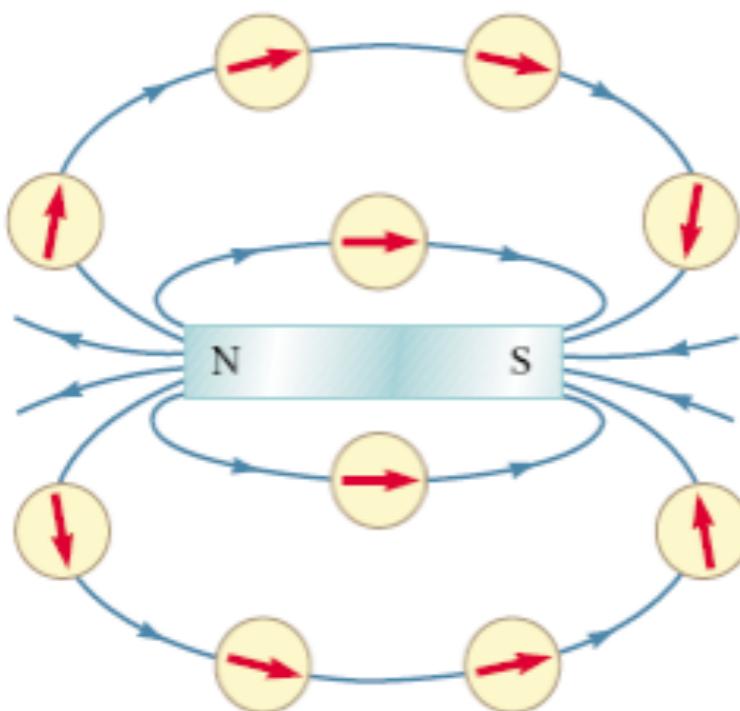




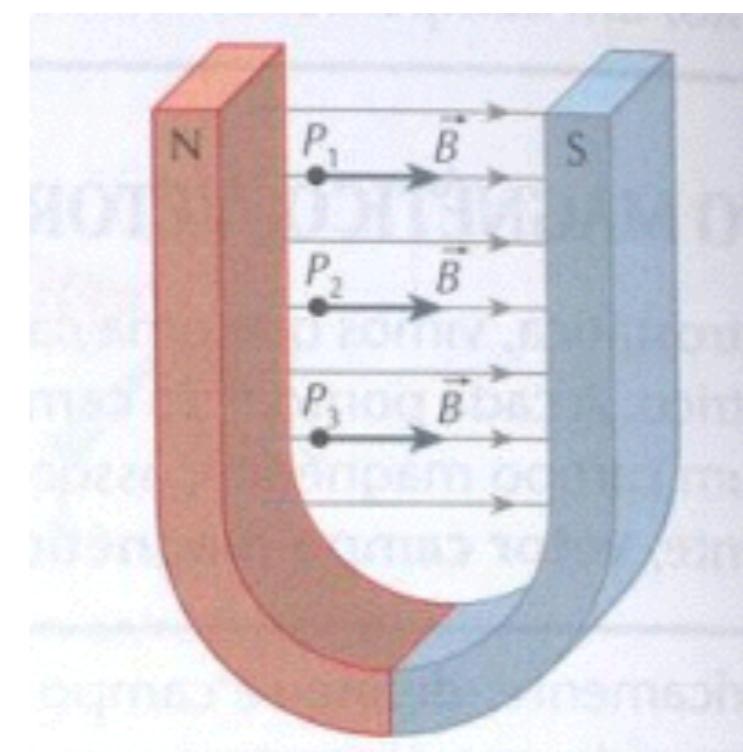
Campo Magnético

Linhas de campo magnético:

- São sempre linhas fechadas;
- Nunca se cruzam;
- Fora do imã, saem do norte e são orientadas para o sul;
- Dentro do imã tem orientação contrária;
- Saem e entram perpendicularmente à superfície do imã;
- Quanto maior a concentração das linhas, mais intenso é o campo.

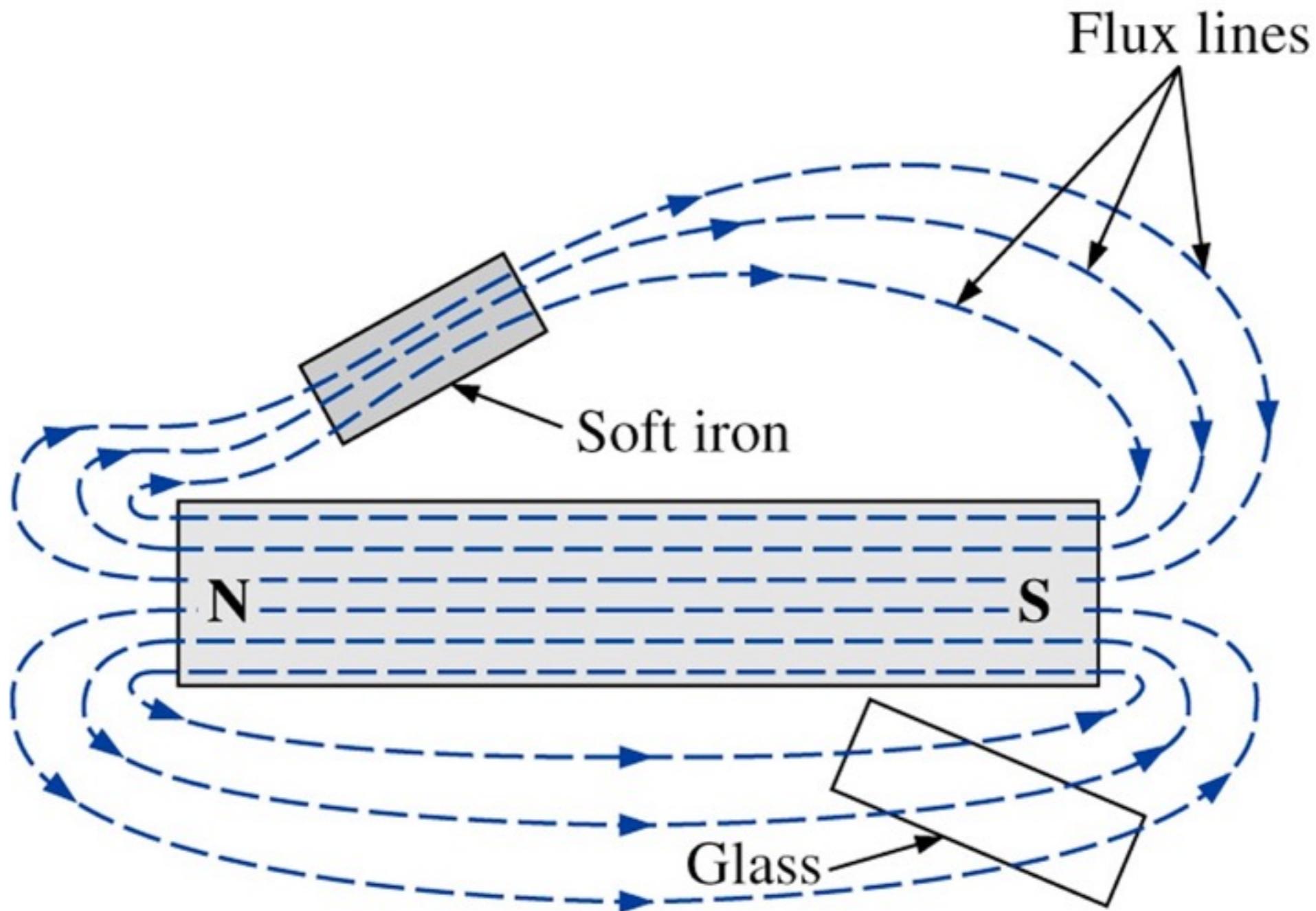


Campo não-uniforme



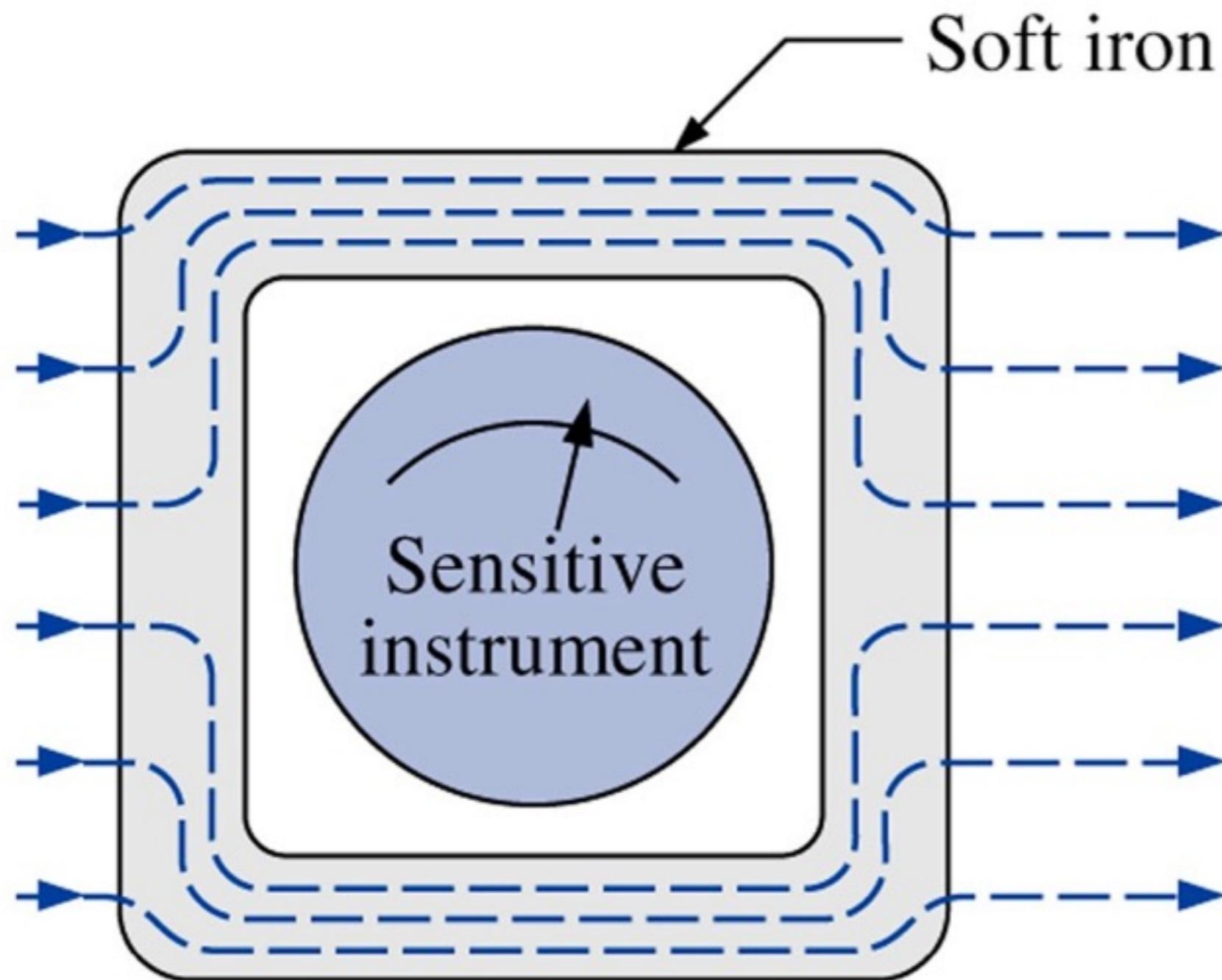
Campo uniforme

Campo Magnético



Efeito de material ferromagnético sobre as linhas de campo.

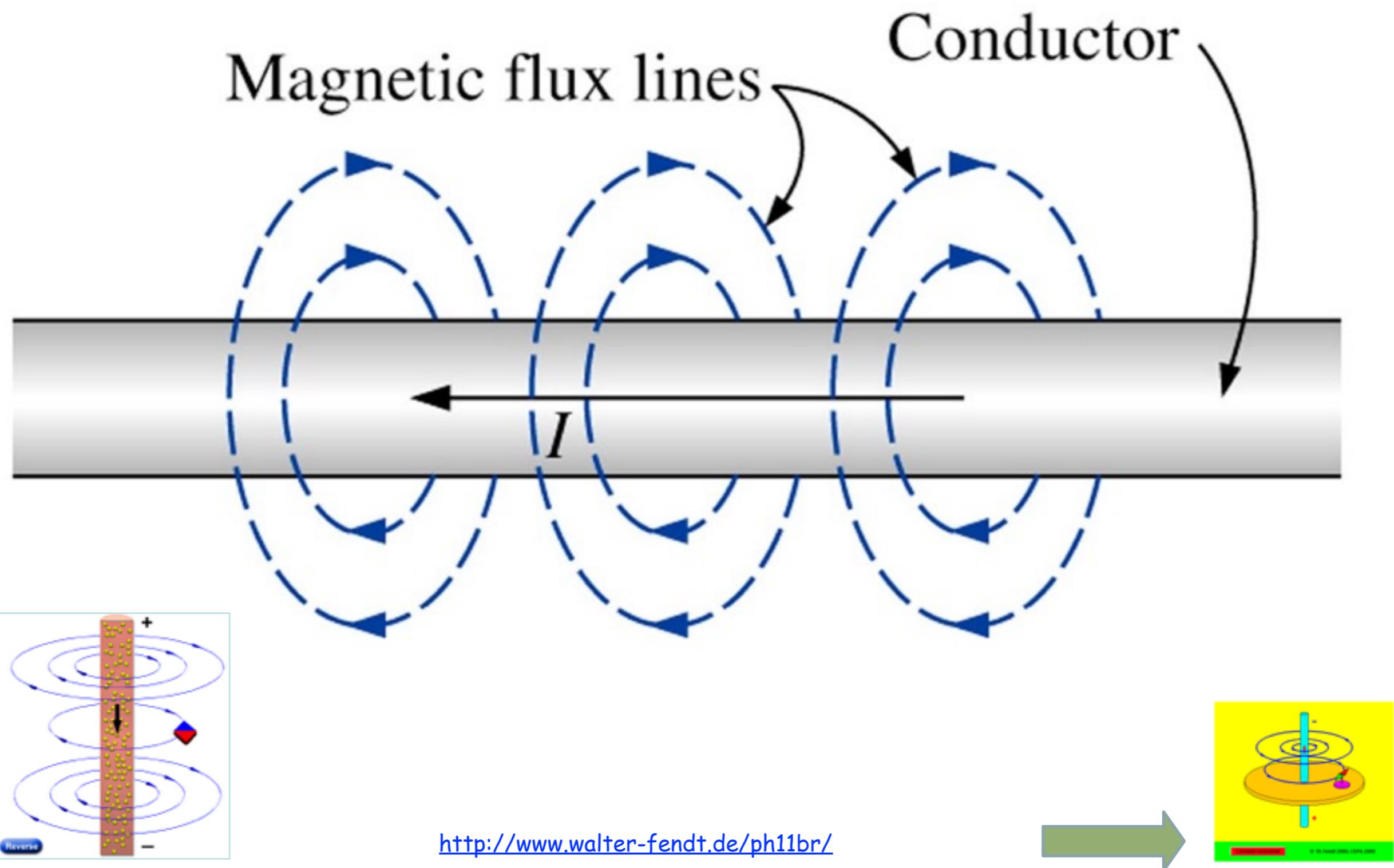
Campo Magnético



Efeito de material ferromagnético sobre as linhas de campo.

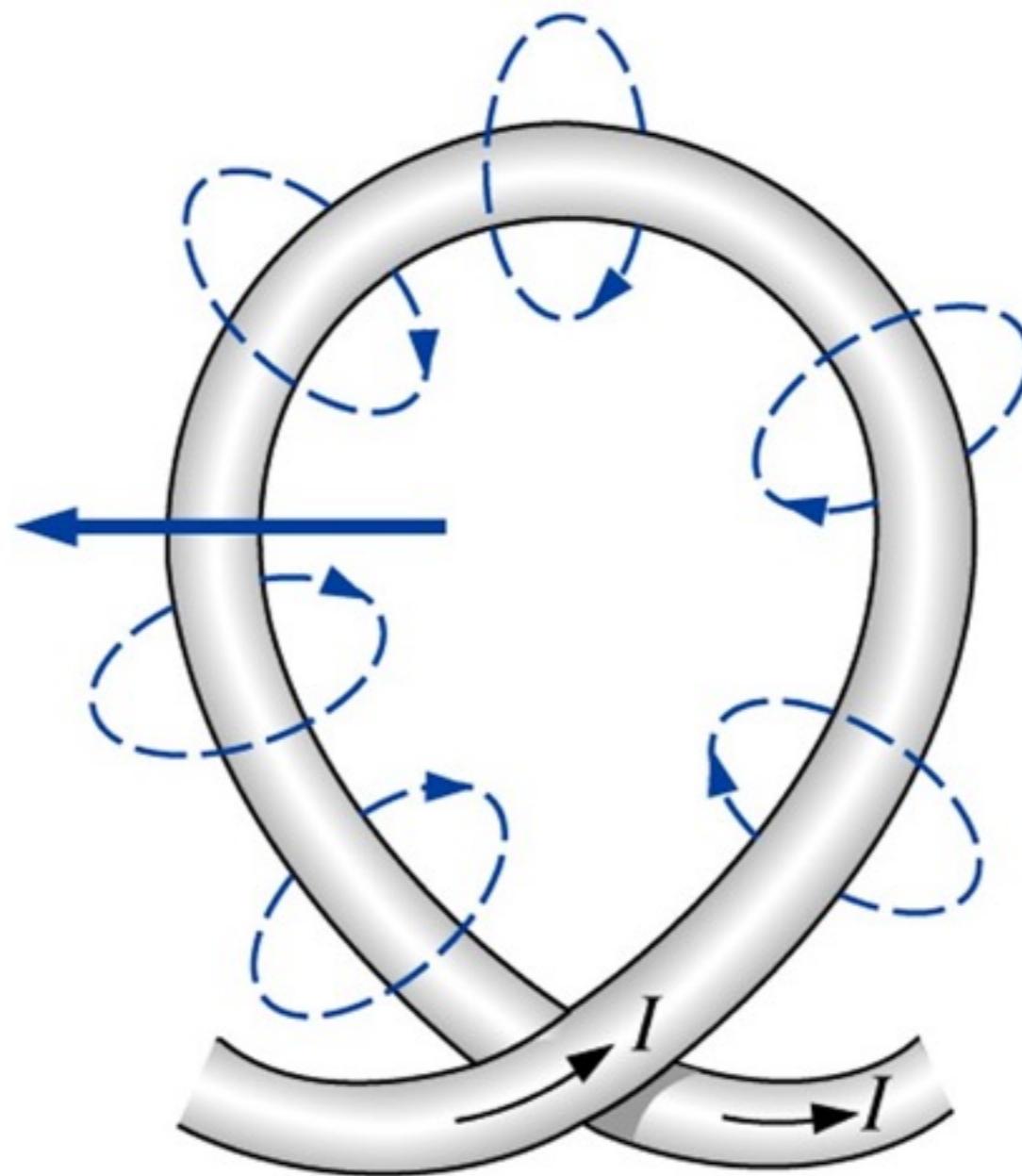
Campo Magnético

Linhas de campo em um condutor retilíneo percorrido por corrente:

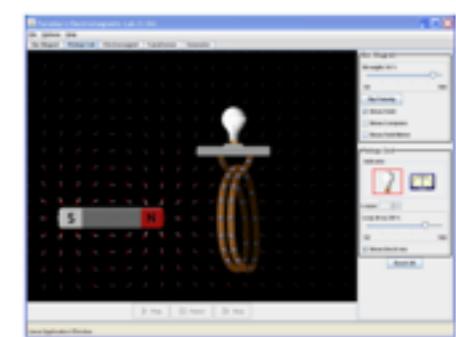


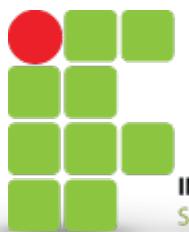
Campo Magnético

Linhas de campo em uma espira circular percorrida por corrente:



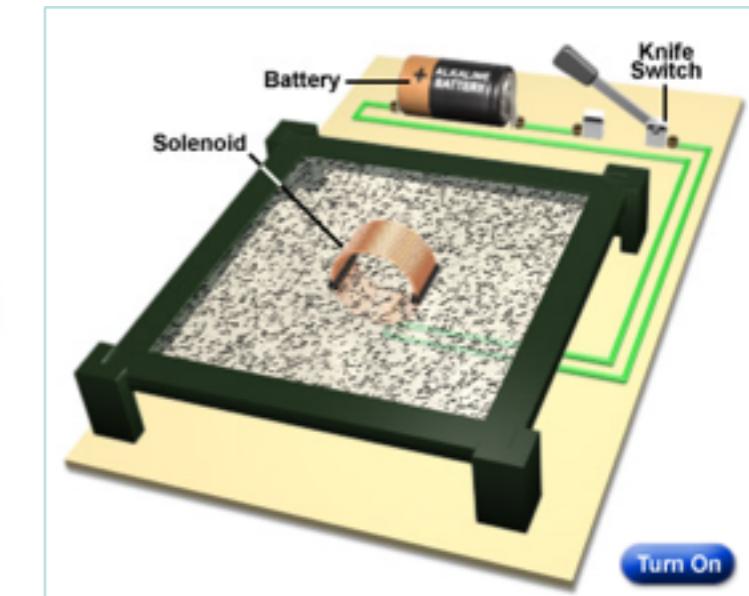
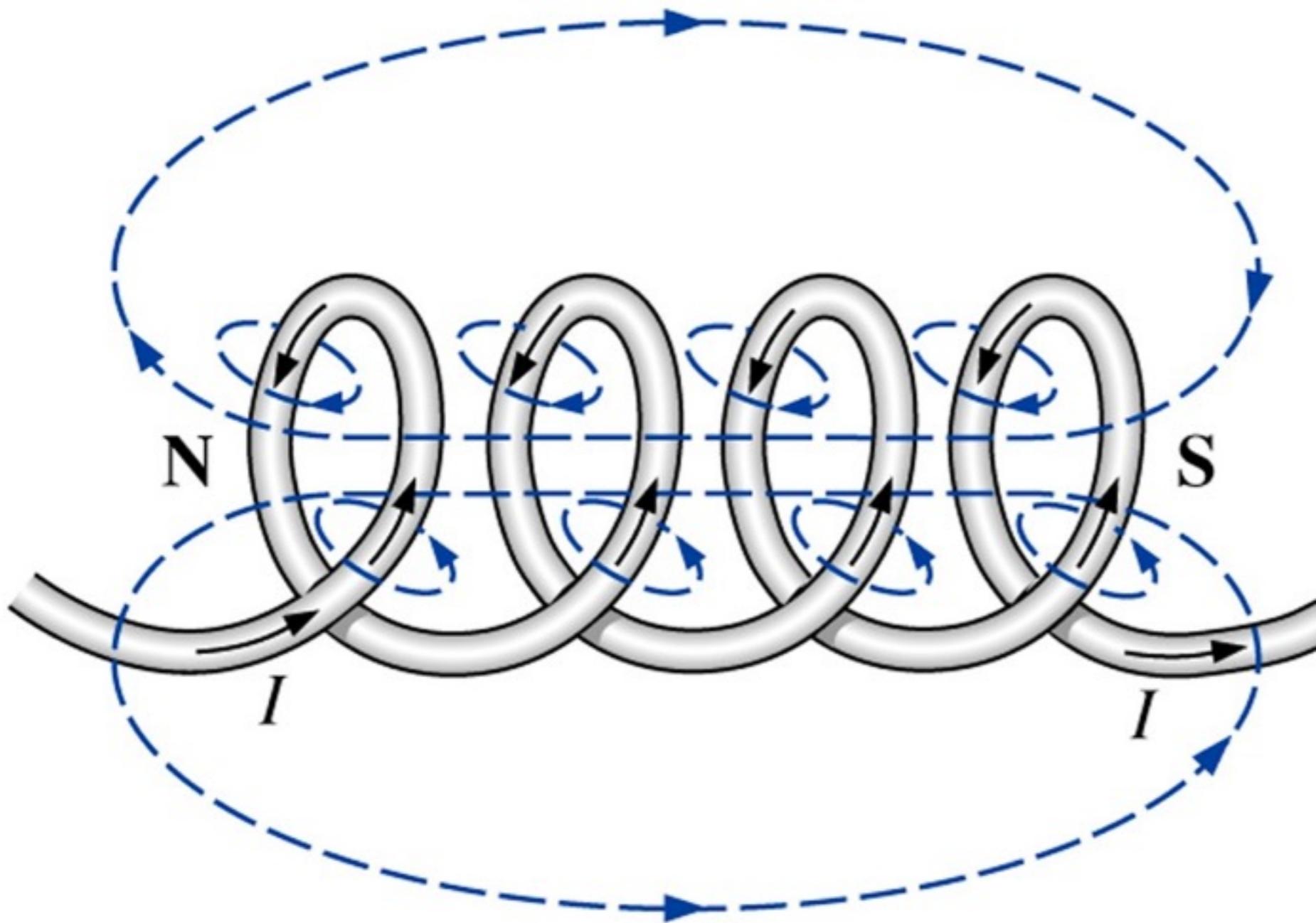
<http://phet.colorado.edu>





Campo Magnético

Linhas de campo em uma bobina percorrida por corrente:



<http://www.magnet.fsu.edu>

Densidade de Fluxo Magnético

Densidade de fluxo magnético:

- Densidade de fluxo (B) é número de linhas de campo por unidade de área.
- Unidade é Tesla [T];
- Um Tesla é igual a 1 Weber por metro quadrado de área.

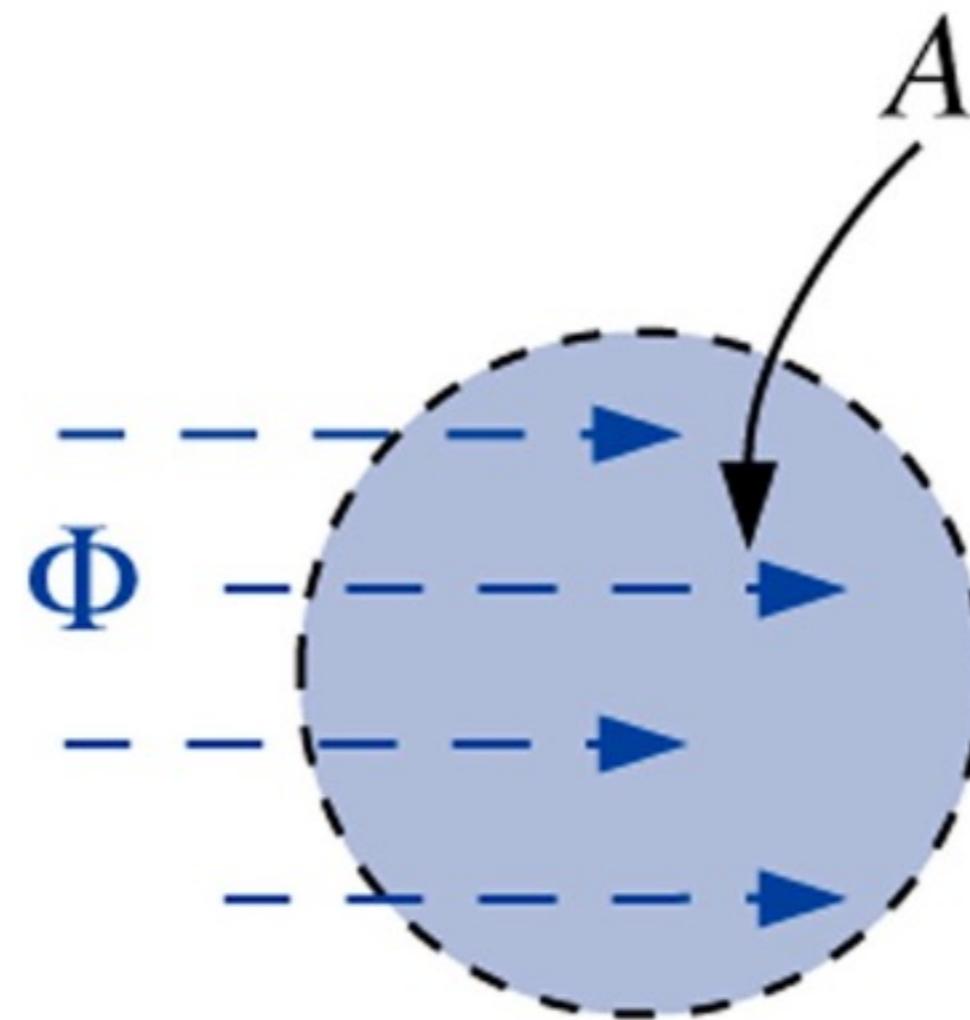
Fluxo magnético:

- Fluxo (φ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma área.
- Unidade é weber [Wb];
- Um Weber corresponde a 1×10^8 linhas de campo.

Densidade de Fluxo Magnético

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

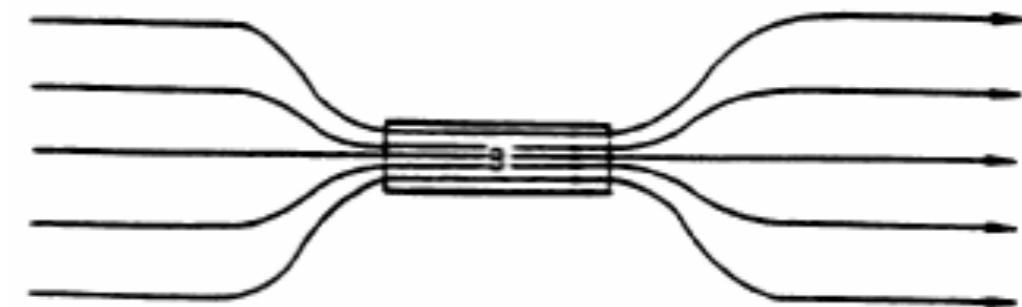
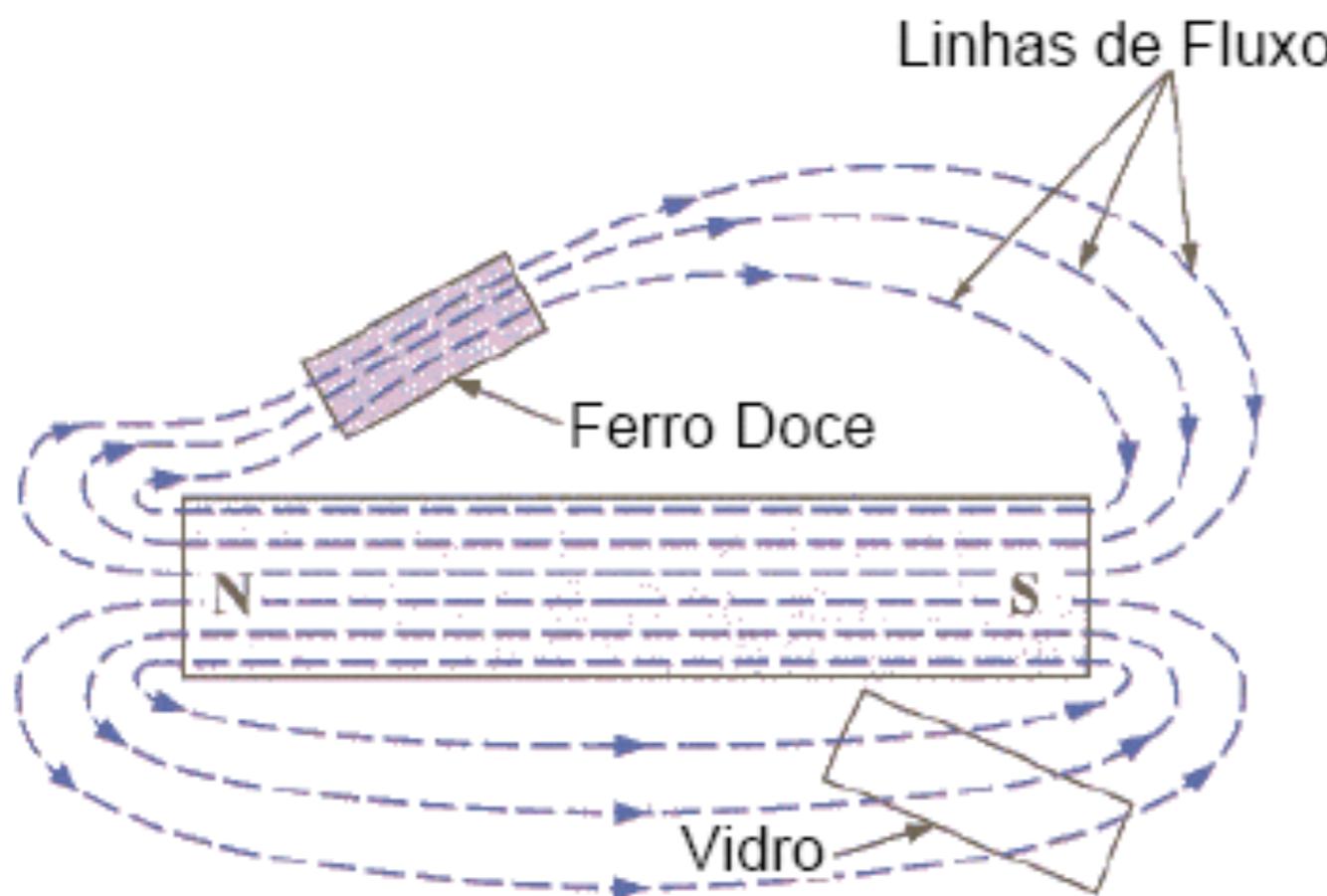
- B = teslas (T)
- Φ = webers (Wb)
- A = metros quadrados (m^2)



Permeabilidade Magnética

Permeabilidade magnética:

- Grau de magnetização de um material em resposta ao campo magnético;
- Facilidade de "conduzir" o fluxo magnético;
- Simbolizado pela letra μ .



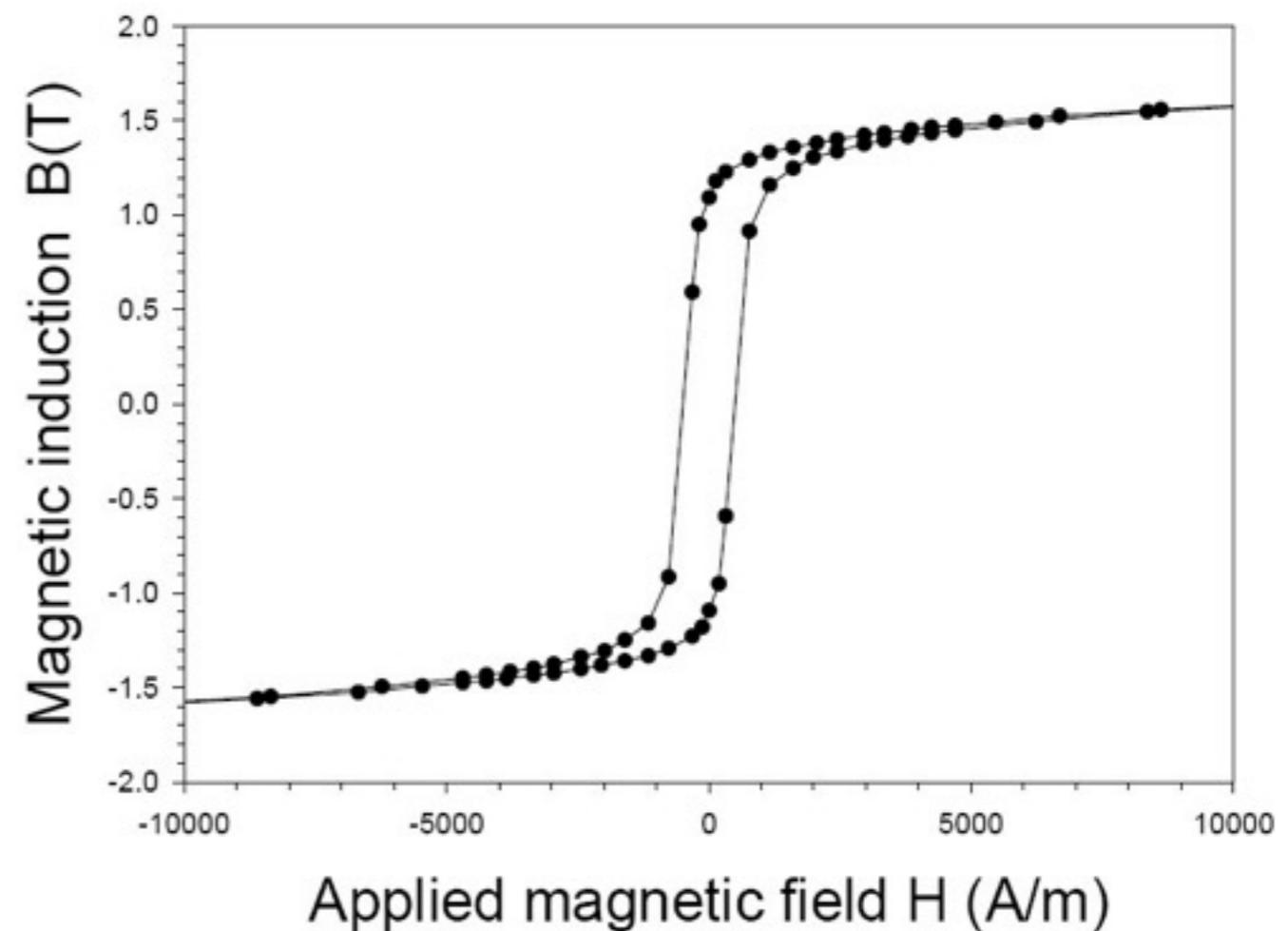
Permeabilidade Magnética

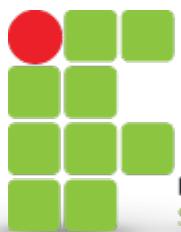
$$\mu = \frac{B}{H} \longrightarrow \text{Permeabilidade absoluta}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} \longrightarrow \text{Permeabilidade relativa}$$

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A/m}$$

Permeabilidade do vácuo





Permeabilidade Magnética

Permeabilidade Relativa, μ_R	Tipo de Material
$\gg 1$	Ferromagnéticos
≈ 1	Paramagnéticos
< 1	Diamagnéticos

Tipo de Material	Permeabilidade Relativa, μ_R
Ferro Comercial	9.000
Ferro Purificado	200.000
Ferro Silício	55.000
Permalloy	1×10^6
Supermalloy	1×10^7
Permendur	5.000
Ferrite	2.000

Força Magnetizante

Relação entre os vetores densidade de campo magnético e campo magnético indutor:

$$H = \frac{\mathfrak{I}}{l} \quad \longrightarrow \quad H = \frac{NI}{l}$$

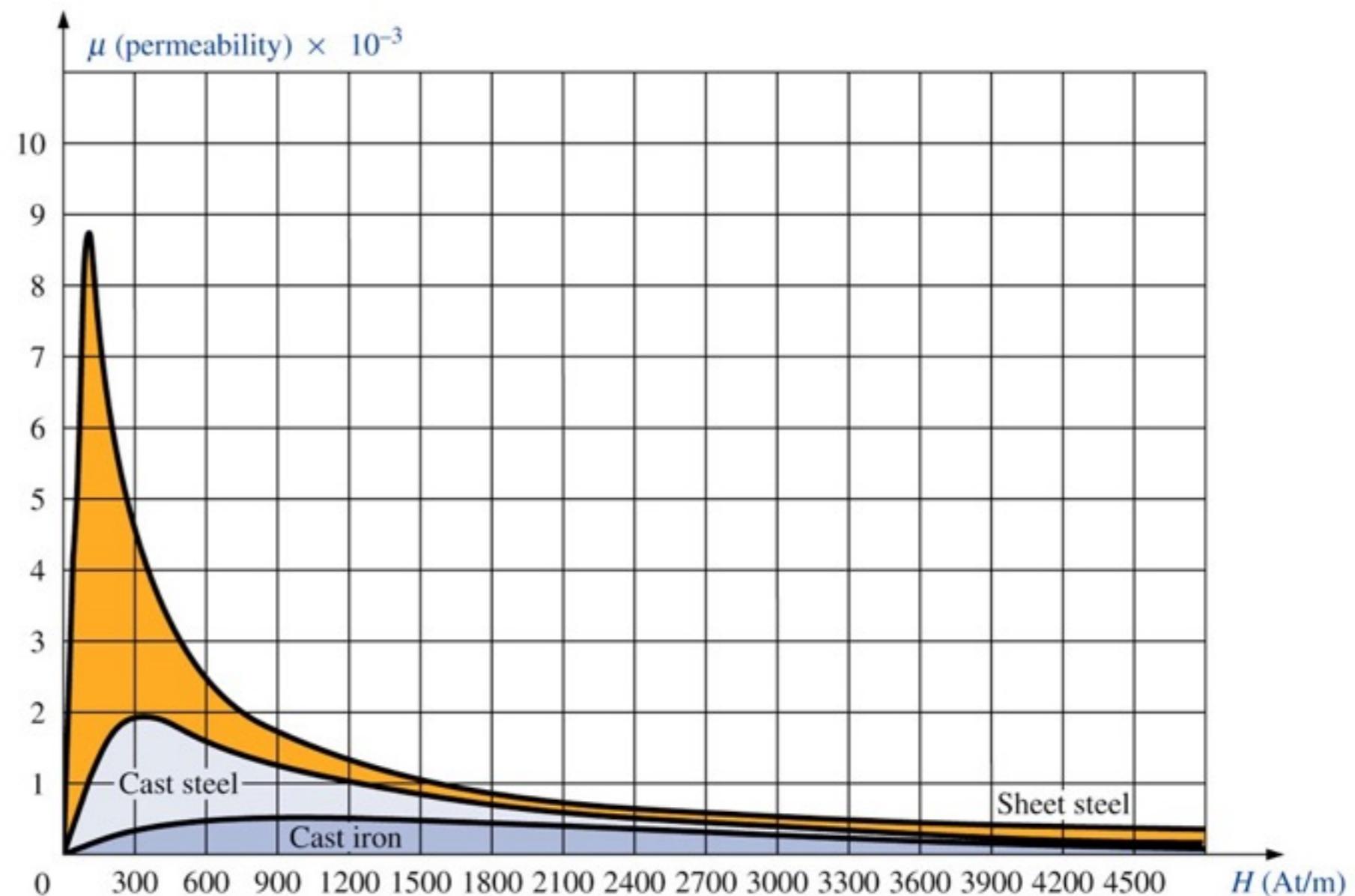
- H = força magnetizante (A/m)
- \mathfrak{I} = força magnetomotriz (A/Wb)
- l = comprimento (m)

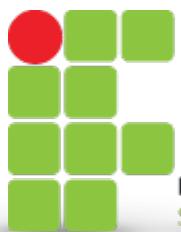
Força Magnetizante

Relação densidade de fluxo e força magnetizante:

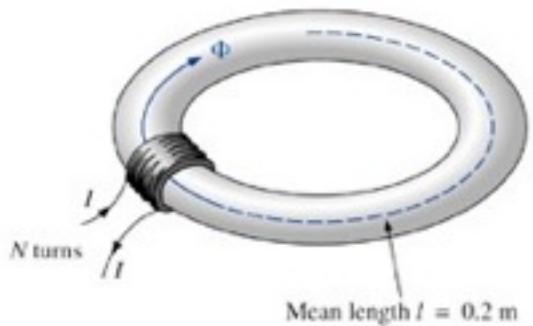
$$B = \mu H$$

Variação de μ com
a força magnetizante



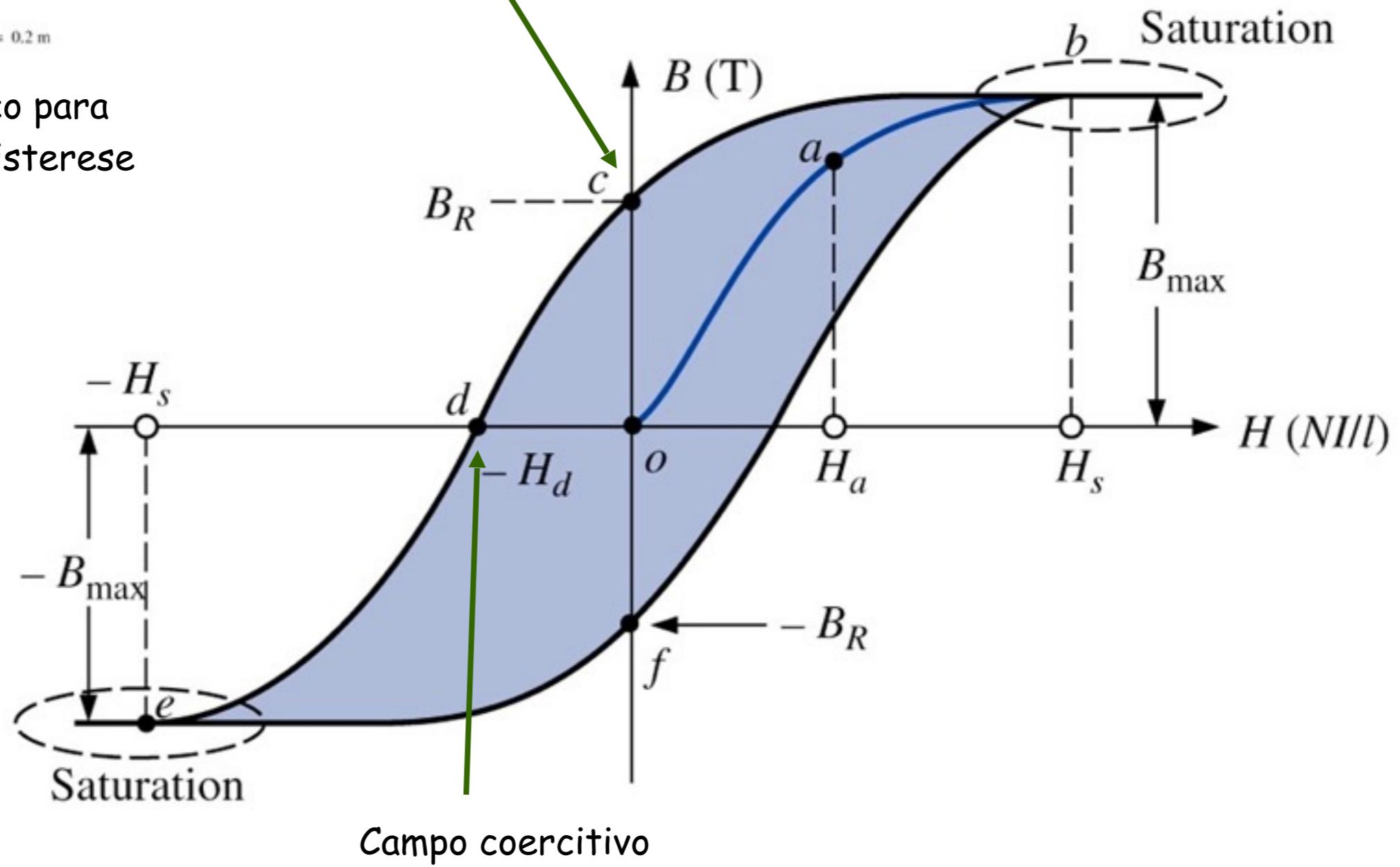


Histerese



Círculo magnético para
obter a curva de histerese

Magnetização remanente



Campo coercitivo

Perdas Magnéticas

Correntes parasitas:

- Induzidas no núcleo, devido ao mesmo ser, normalmente, de material ferromagnético.

Perdas por histerese:

- Trabalho realizado pelo campo (H) para obter o fluxo (B);
- Expressa a dificuldade que o campo (H) terá para orientar os domínios de um material ferromagnético.

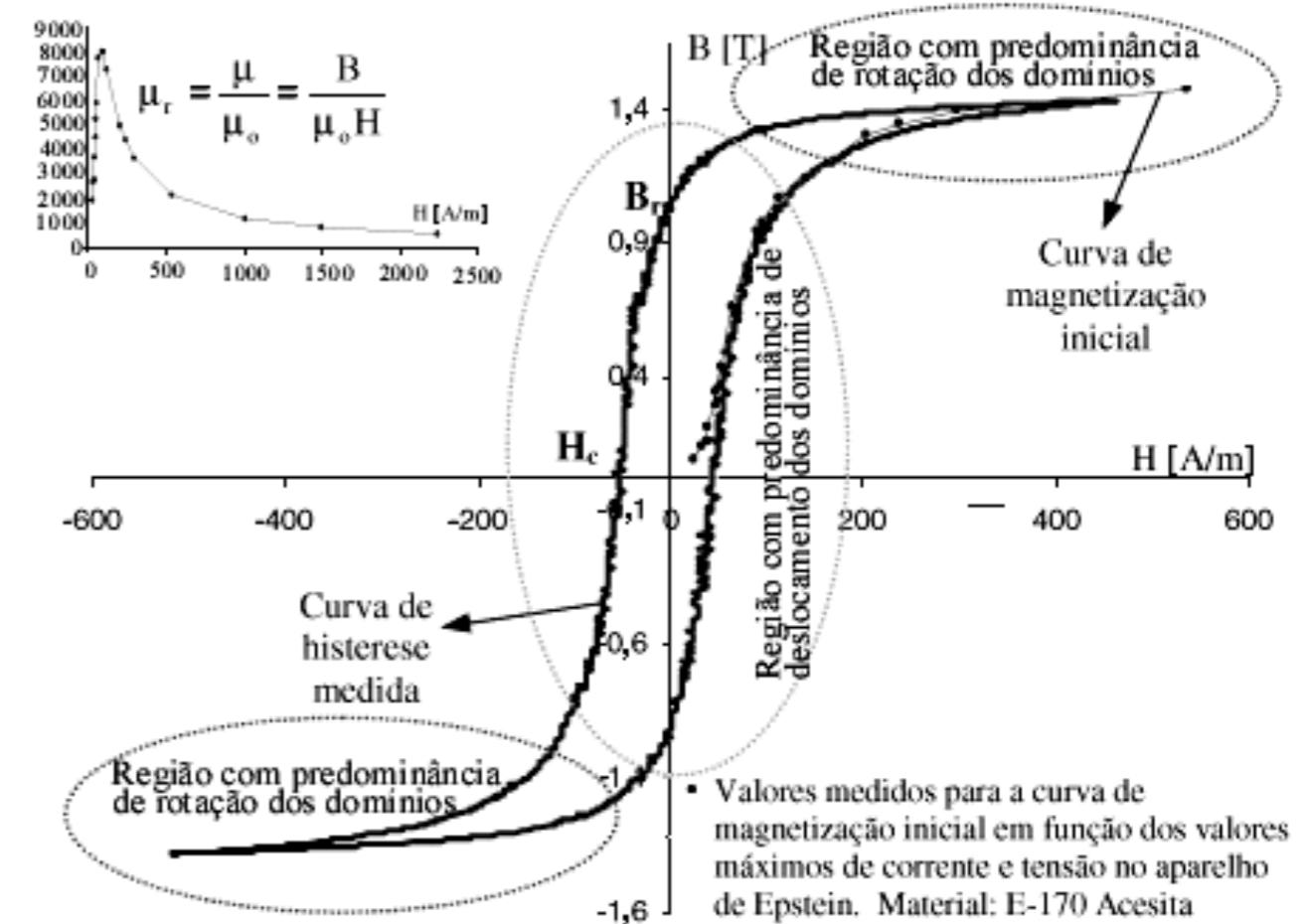


Figura 1: Curva representativa da histerese medida à 1Hz.

Efeitos de Proximidade e Pelicular

Efeito de proximidade:

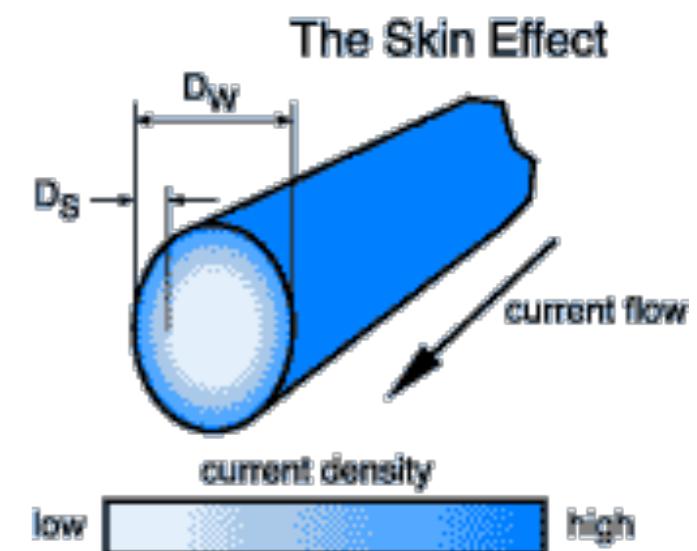
-Relaciona um aumento na resistência em função dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

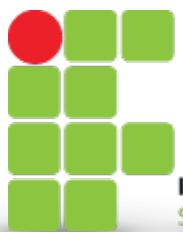
Efeito peculiar (efeito skin):

- Restringe a secção do condutor para frequências elevadas.
- Em altas frequências, a tensão oposta induzida se concentra no centro do condutor, resultando em uma corrente maior próxima à superfície do condutor e uma rápida redução próxima do centro.

Profundidade de penetração

→ $\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_s}} [cm]$

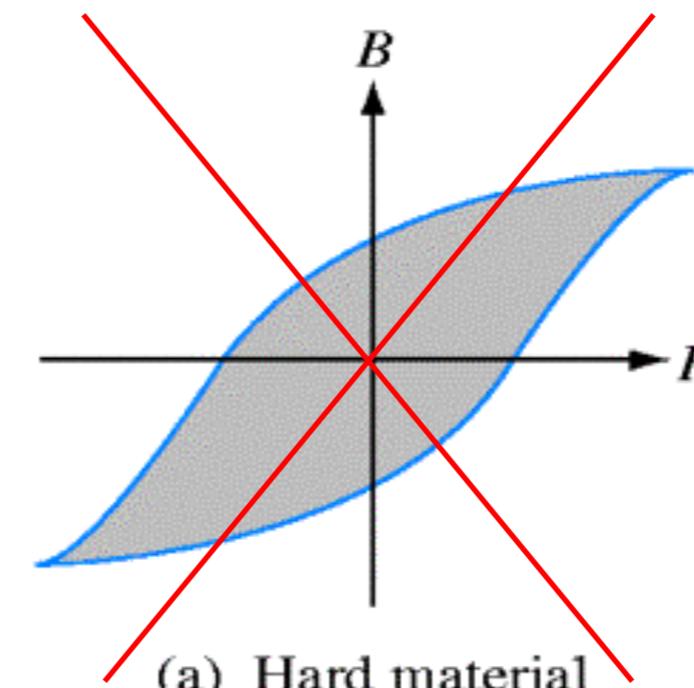
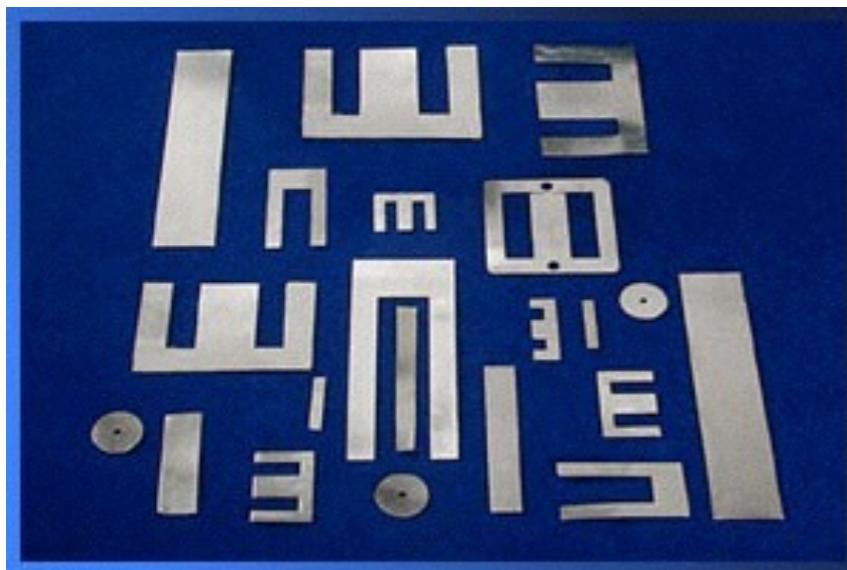




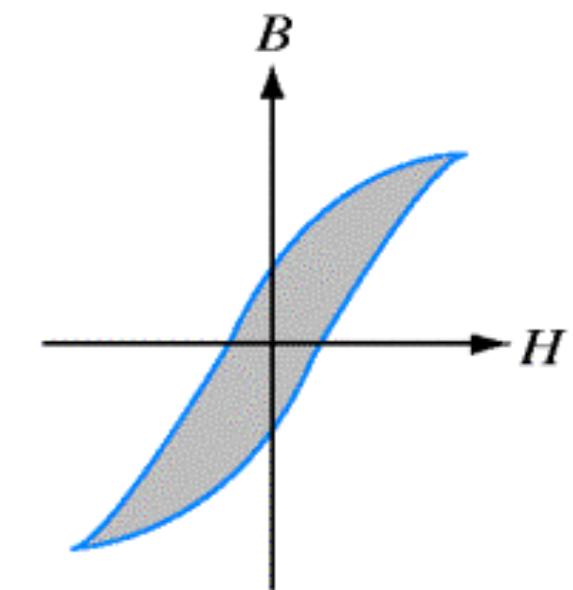
Materiais Magnéticos Moles

Característica geral:

- Não apresentam magnetismo remanente.

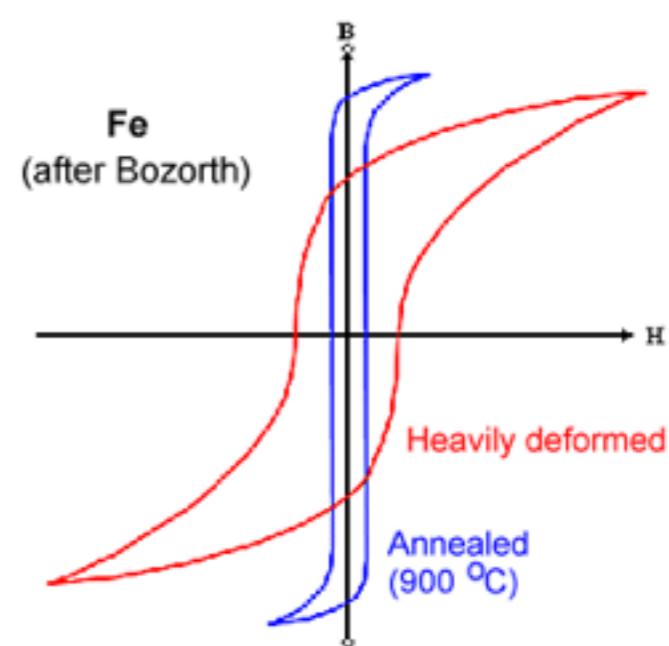


(a) Hard material



(b) Soft material

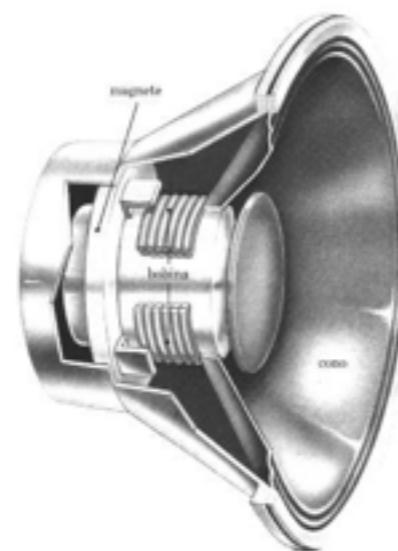
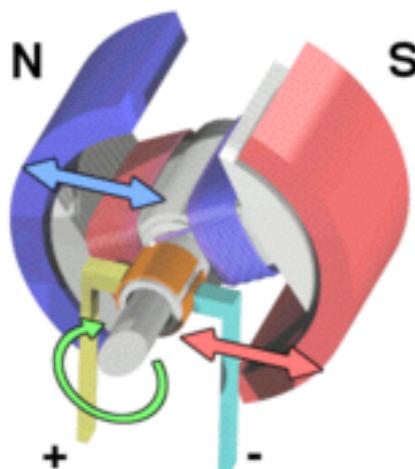
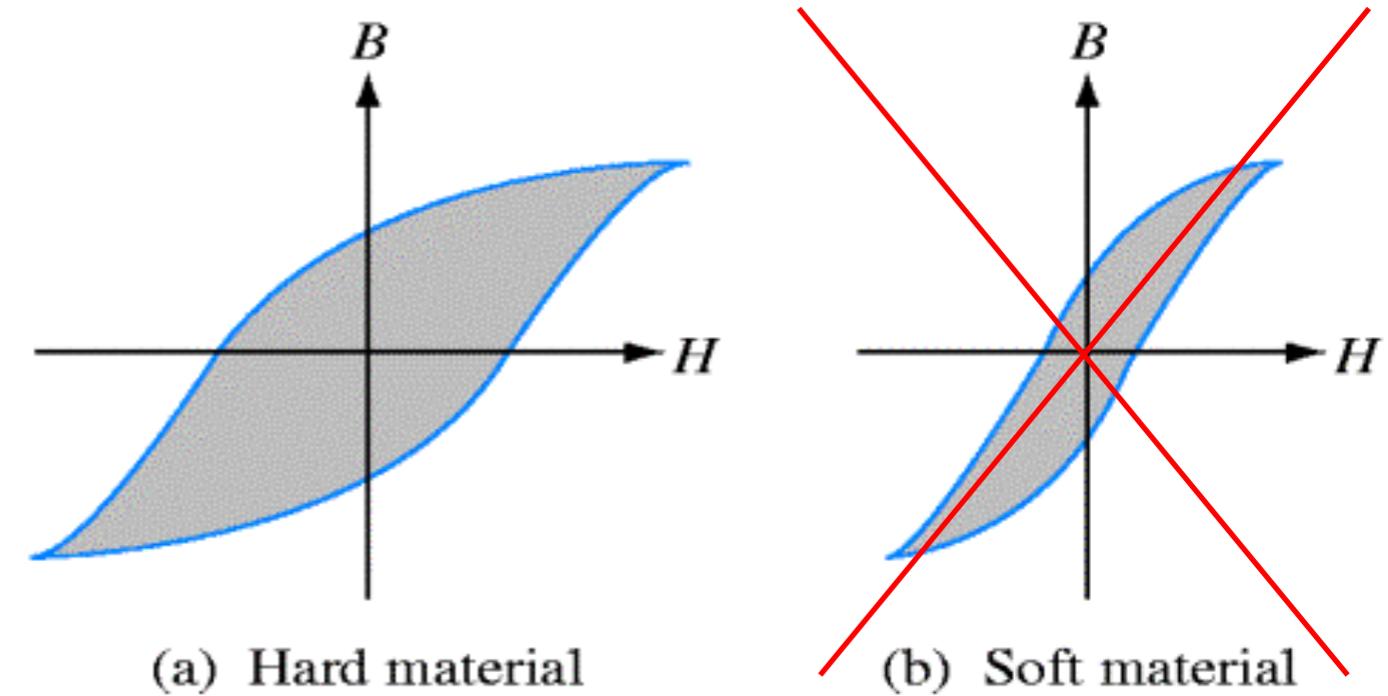
Recozimento →



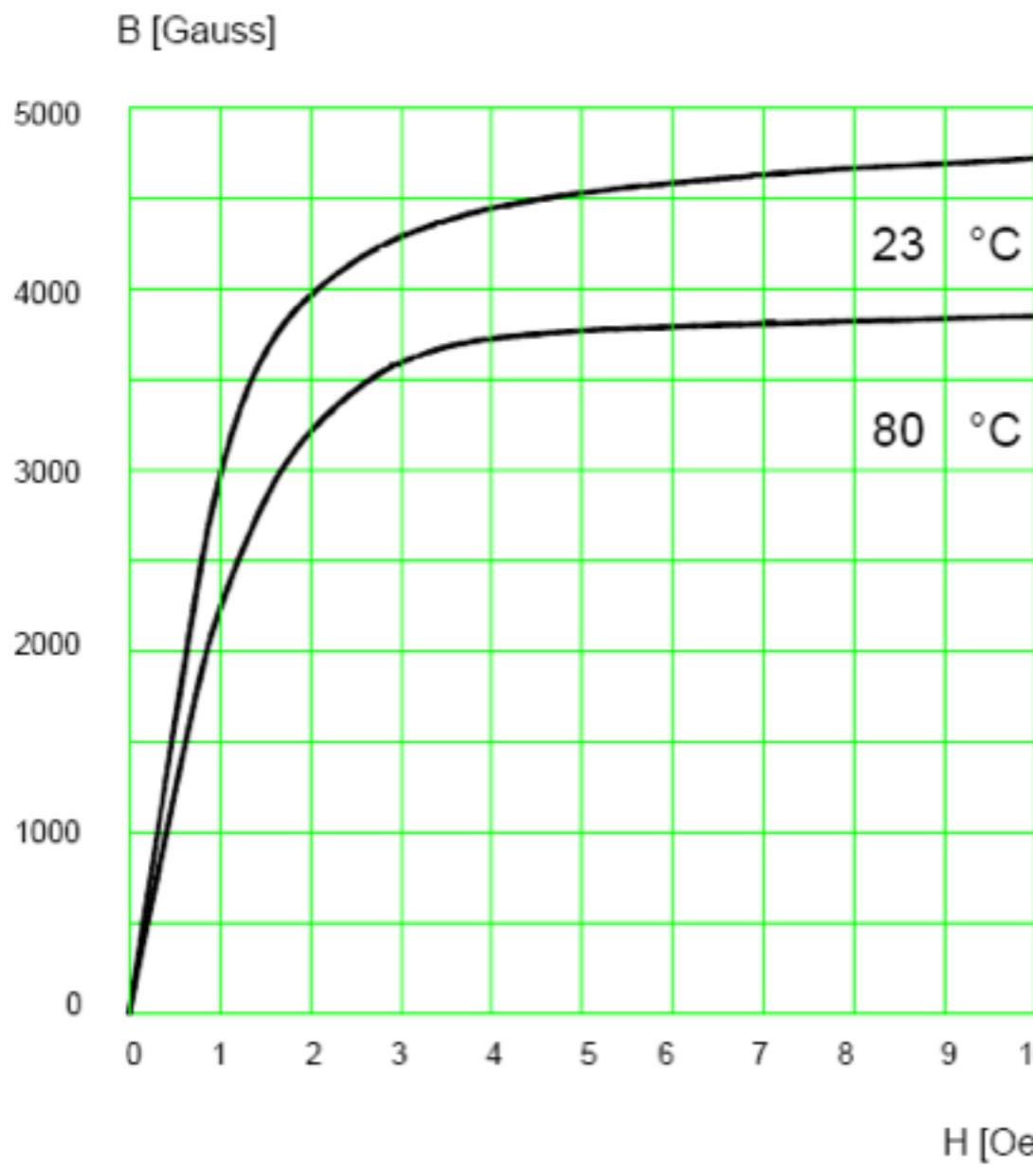
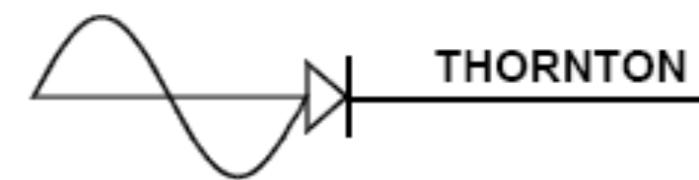
Materiais Magnéticos Duros

Característica geral:

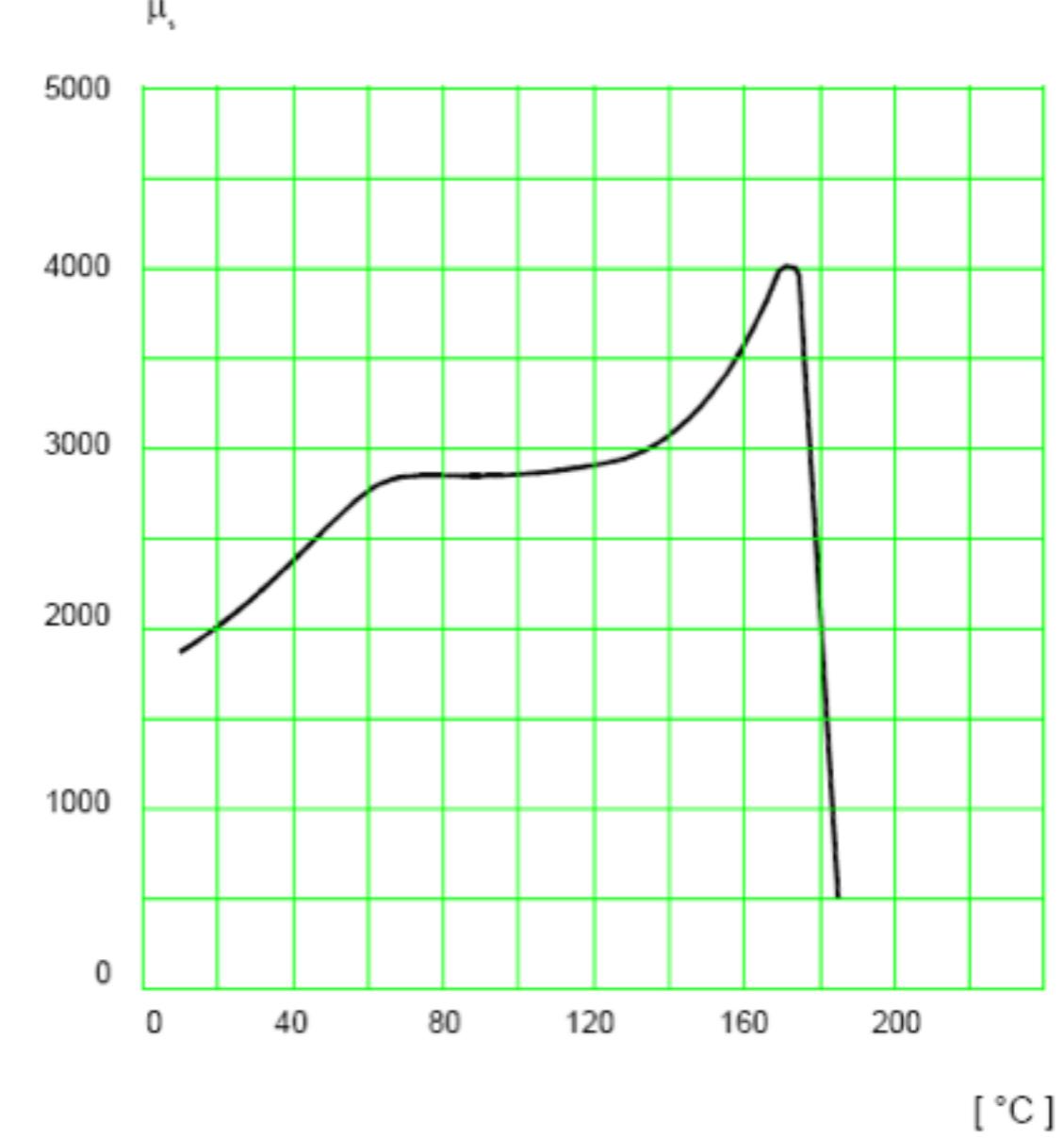
- Apresentam elevado magnetismo remanente.



Permeabilidade versus Temperatura



Típico $B \times H$

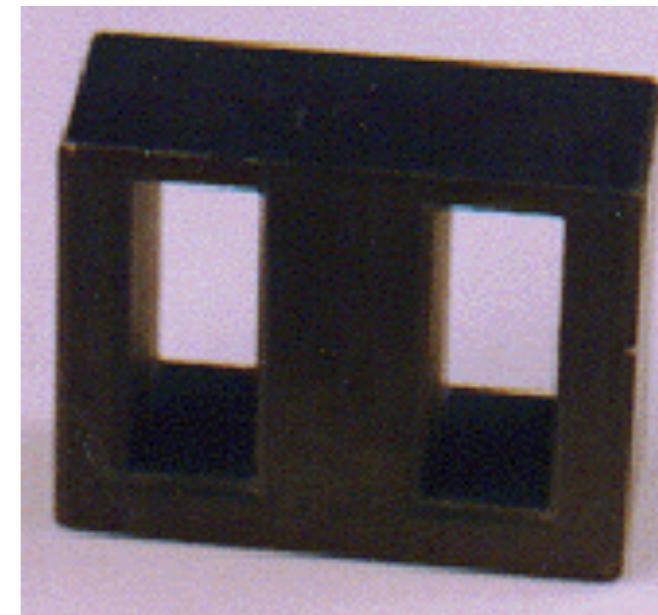


$\mu_i \times$ Temperatura

Núcleos Magnéticos

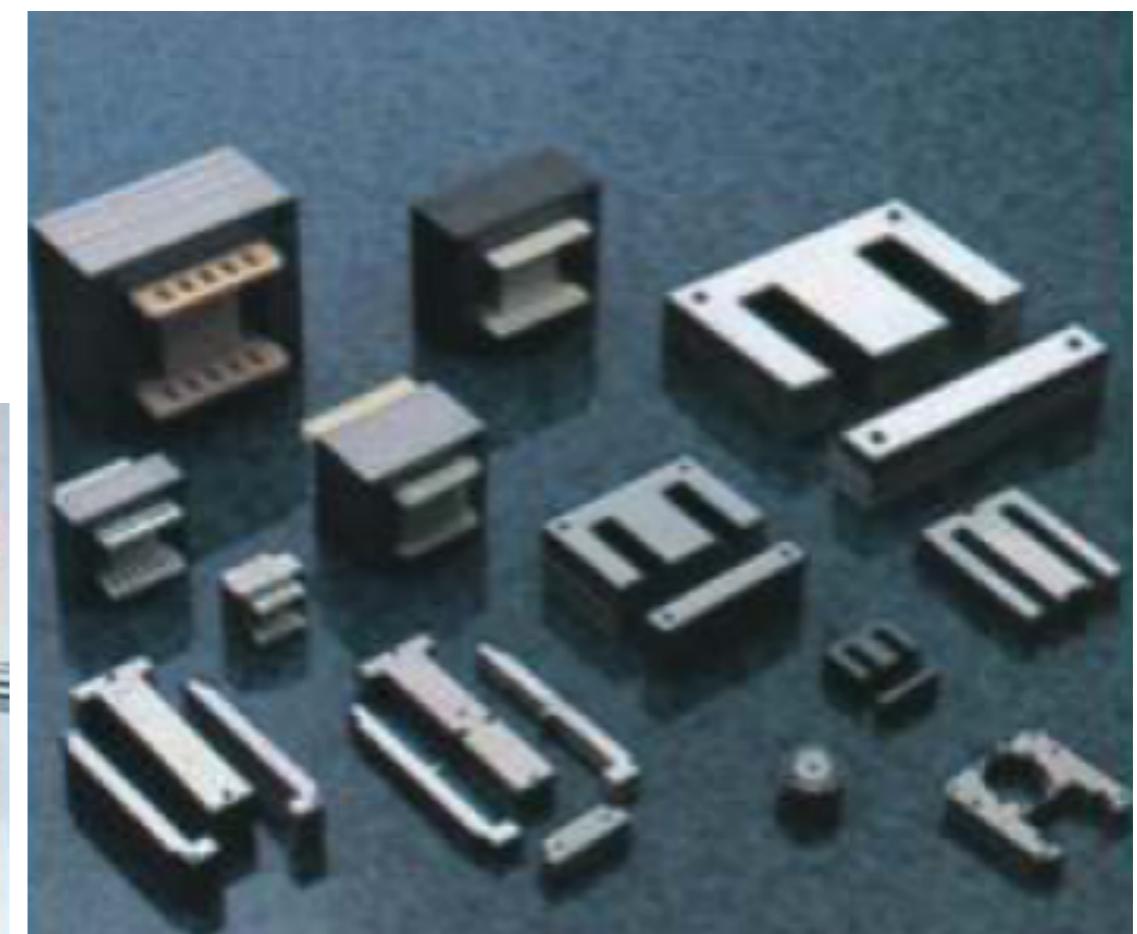
Perdas magnéticas:

- Por correntes de Foucault;
- Perda por histerese.



Perdas dependem de:

- Metalurgia do material;
- Porcentagem de silício;
- Freqüência;
- Espessura do material;
- Indução magnética máxima.



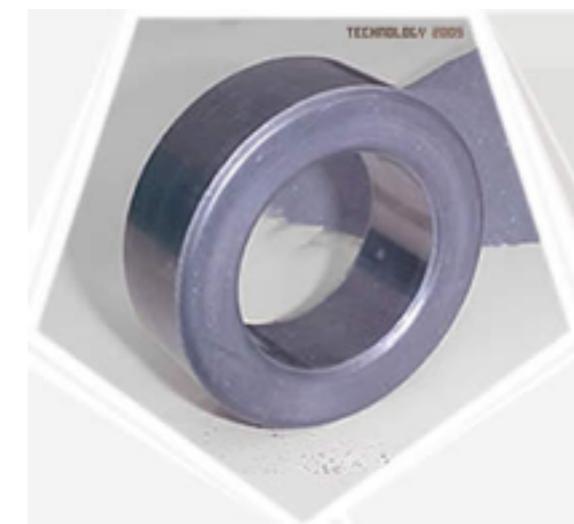
Núcleos Magnéticos

Núcleos:

- Laminados
 - Ferro - silício de grão não orientado;
 - Ferro - silício de grão orientado.
- Compactados
 - Ferrites;
 - Pós metálicos.



Núcleos Magnéticos

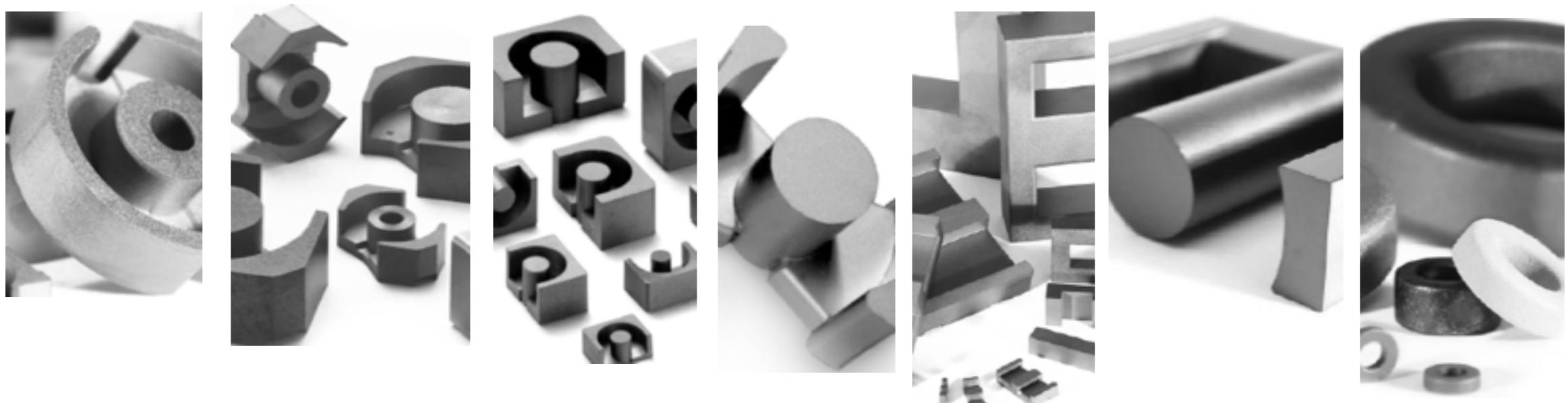


Núcleos Magnéticos

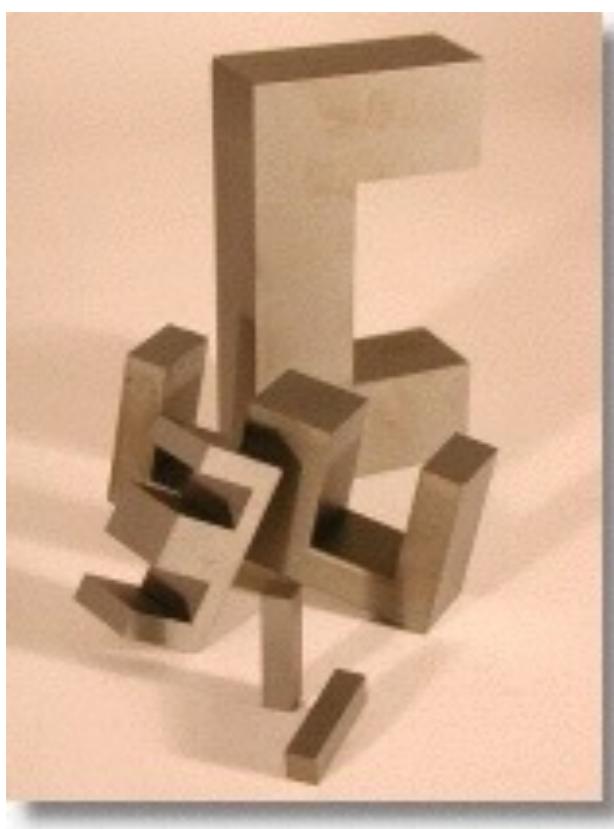


TABLE 1: FERRITE CORE COMPARATIVE GEOMETRY CONSIDERATIONS

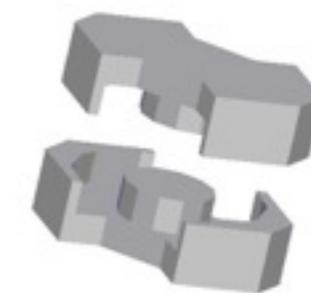
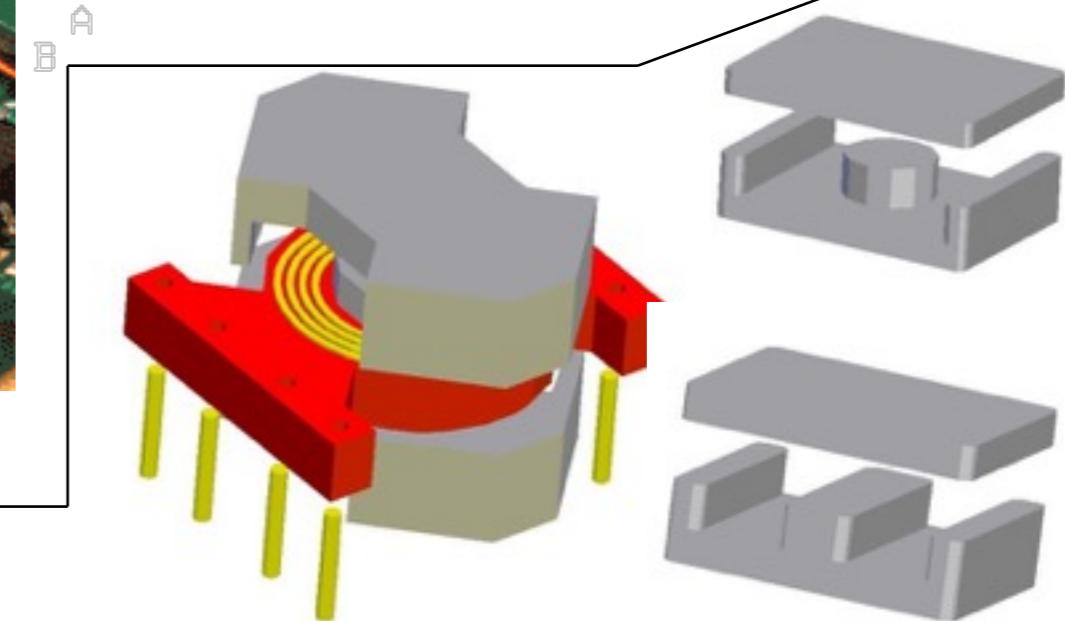
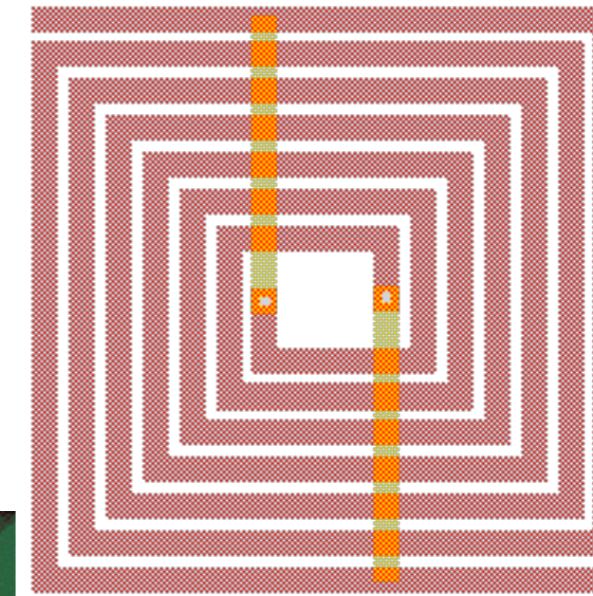
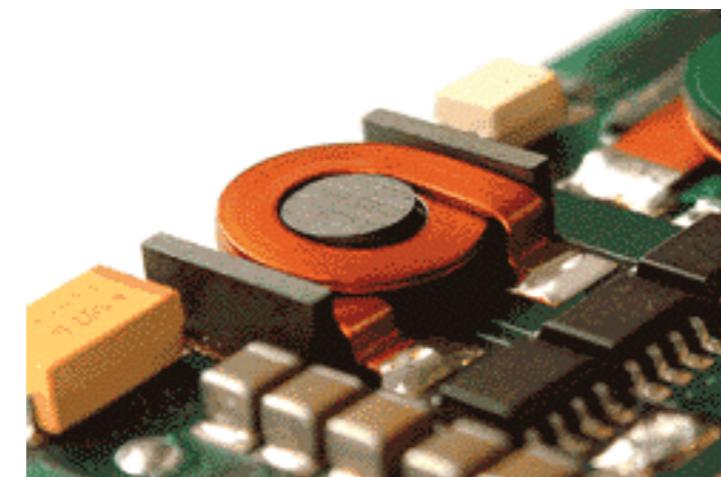
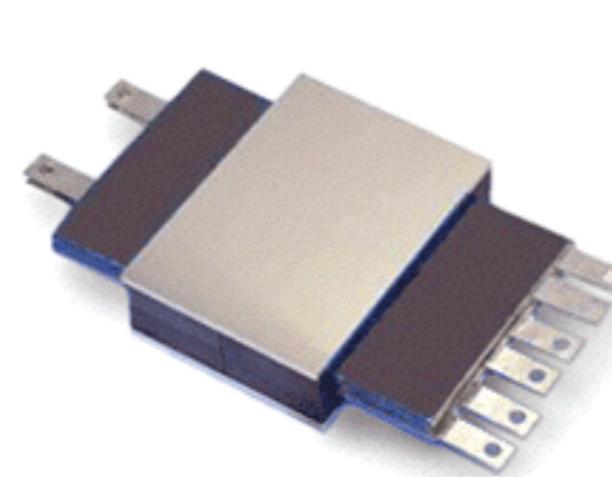
	POT CORES	DOUBLE SLAB, RM CORES	EP CORES	PQ CORES	E CORES	EC, ETD, EER, ER CORES	TOROIDS
See Catalog Section	6	7-8	9	10	11	12	13
Core Cost	High	High	Medium	High	Low	Medium	Very Low
Bobbin Cost	Low	Low	High	High	Low	Medium	None
Winding Cost	Low	Low	Low	Low	Low	Low	High
Winding Flexibility	Good	Good	Good	Good	Excellent	Excellent	Fair
Assembly	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Medium	None
Mounting Flexibility**	Good	Good	Good	Fair	Good	Fair	Poor
Heat Dissipation	Poor	Good	Poor	Good	Excellent	Good	Good
Shielding	Excellent	Good	Excellent	Fair	Poor	Poor	Good

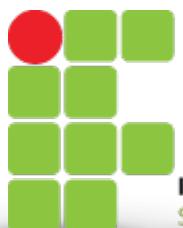


Núcleos Magnéticos

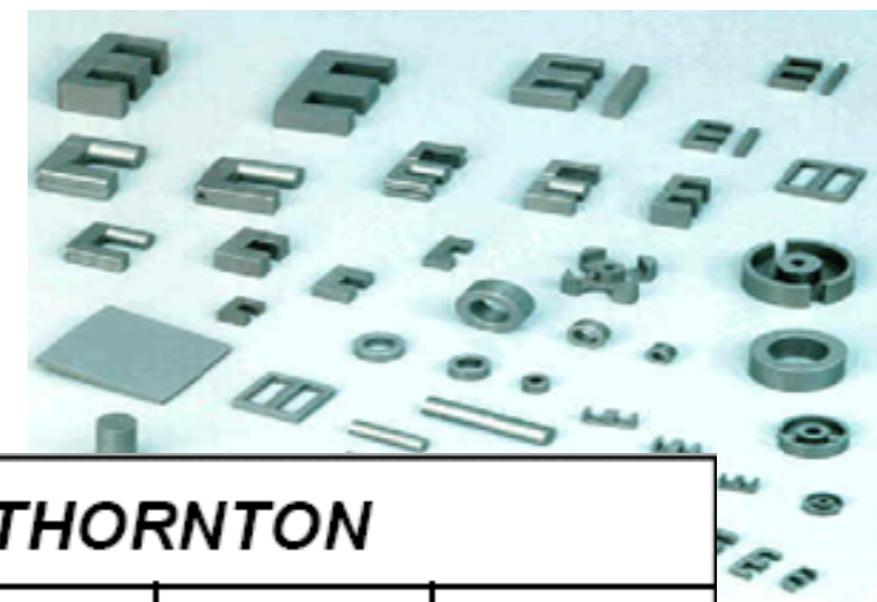
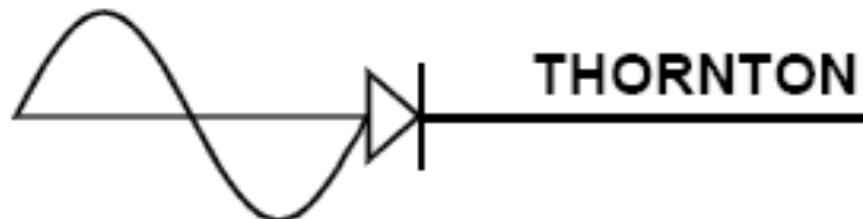


Núcleos planares





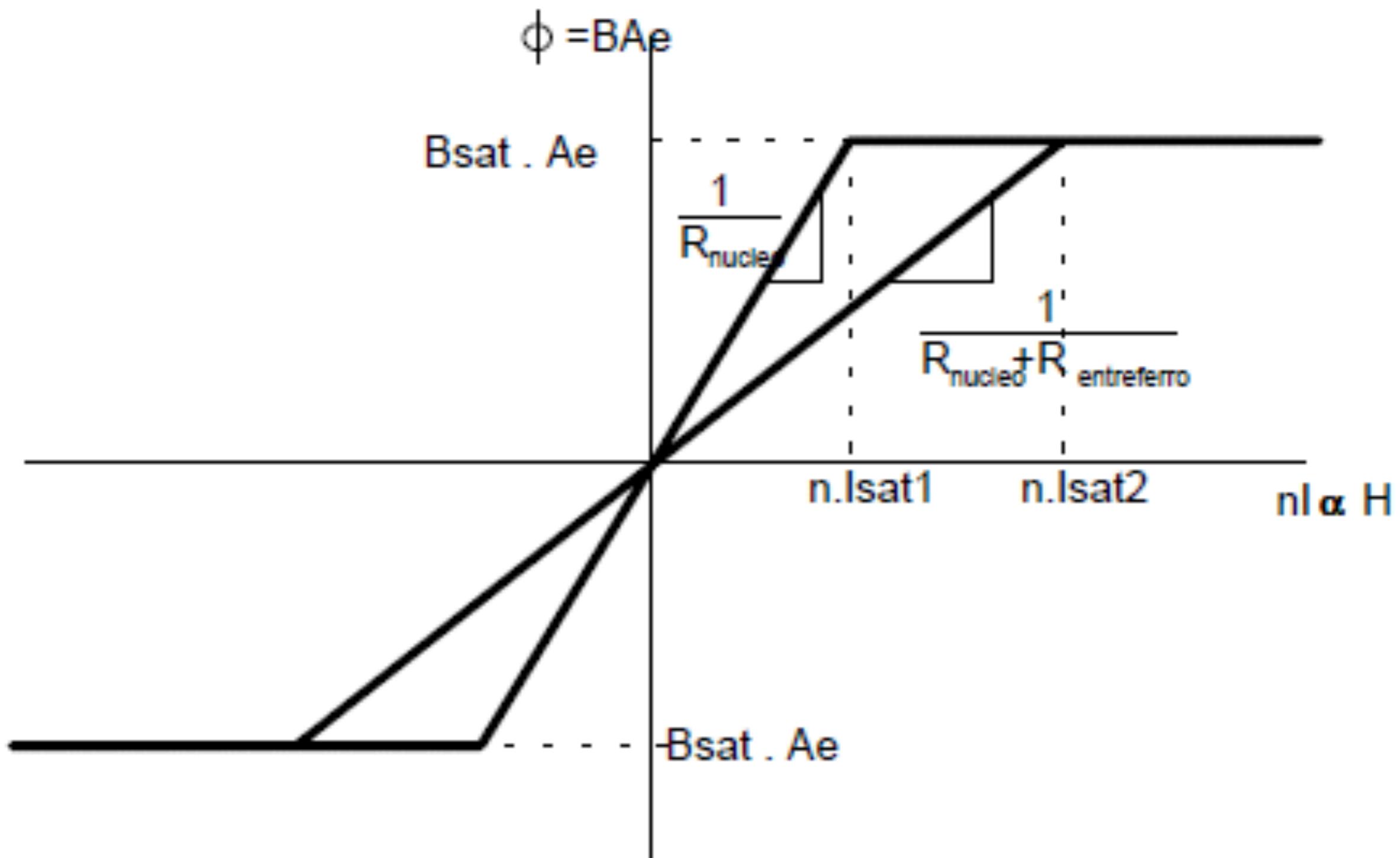
Núcleos Magnéticos

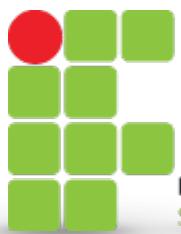


CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS THORNTON

Material	IP 6	IP 12R	IP12E
Permeabilidade Inicial μ_1	$2000 \pm 25\%$	$2100 \pm 25\%$	$2300 \pm 25\%$
Fator de Dissipação (Rel.) $f = 10$ [Khz]	-----	-----	-----
$\tan \delta / \mu_1 \cdot 10^{-6}$ $f = 100$ [Khz]	-----	-----	-----
Temperatura de Curie [°C]	≥ 165	≥ 210	≥ 210
Coercividade [A/m]	18.0	18.0	18.0
Densidade de Fluxo (\mathcal{B}) a 15 Oe, 23 °C [10 ⁻³ T]	480	510	510
Constante de Histerese (η_B) [10 ⁻³ / T]	≤ 8.0	-----	-----
Fator de desacomodação (D_F) [ppm]	10.0	-----	-----
Densidade (ρ) [Kg/m ³]	4800	4800	4800

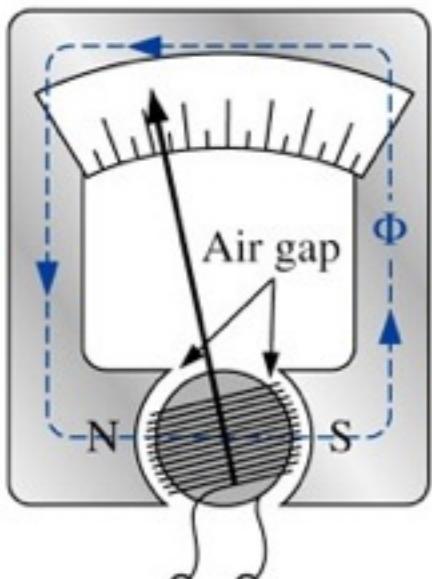
Entreferros



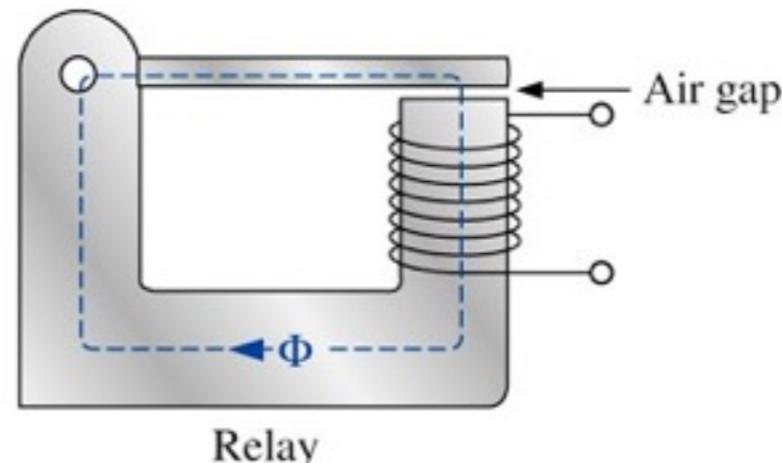


Entreferros

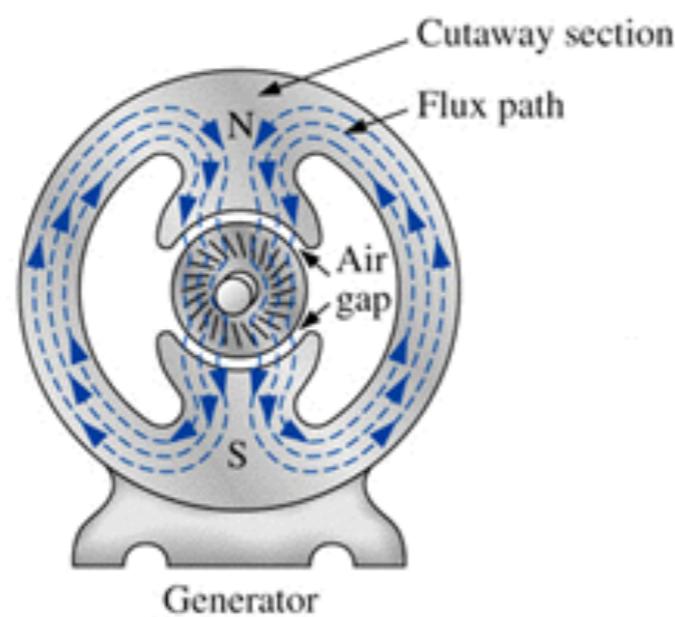
Espaço sem núcleo nos circuitos magnéticos:



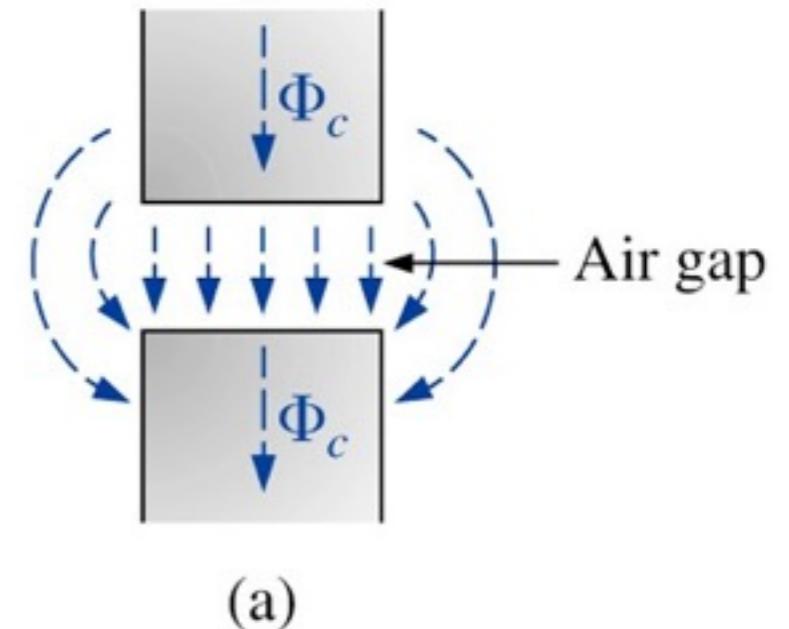
Meter movement



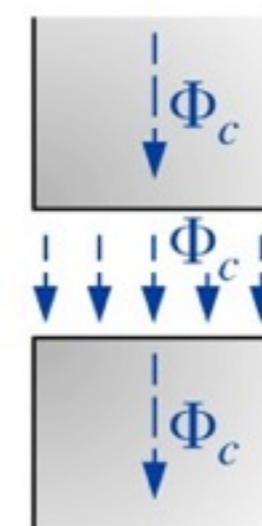
Relay



Generator

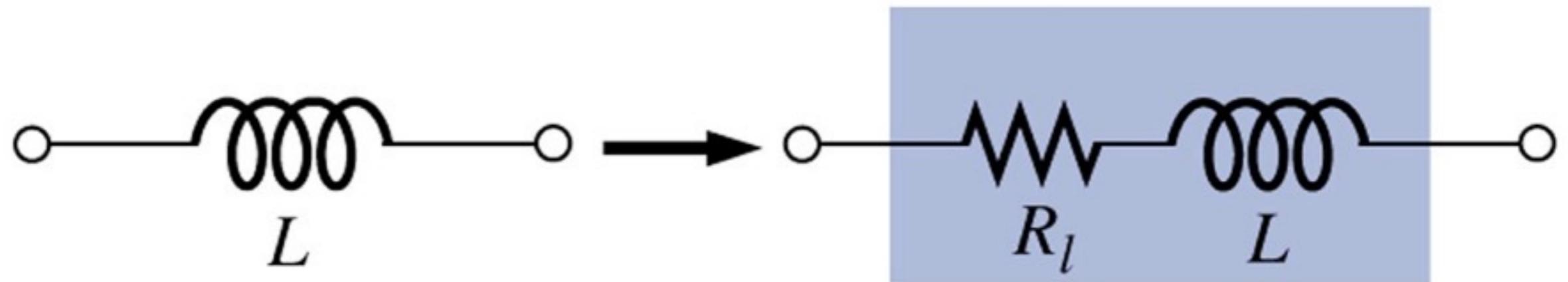


(a)



(b)

Círculo Equivalente de Um Indutor



Círculo equivalente prático de um indutor

Próxima Aula

Conversores cc-cc:

- Projeto de elementos magnéticos.

