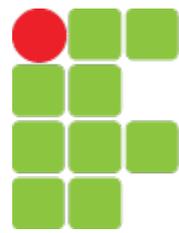


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

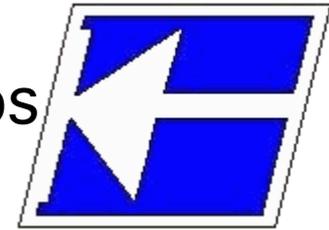
Departamento Acadêmico de Eletrônica

Pós-Graduação em Desen. de Produtos Eletrônicos

Conversores Estáticos e Fontes Chaveadas



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA



Revisão de Eletromagnetismo

Prof. Clovis Antonio Petry.
Prof. Joabel Moia.

Florianópolis, abril de 2014.

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	<p>Ref. Design Sect. R3-1: Coupled Filter Inductors Yield Improved Performance</p> <p>Introduction and Basic Magnetics (Magnetics Design for Six Power Supplies)</p> <p>Magnetic Core Characteristics</p> <p>Windings</p> <p>Power Transformer Design</p> <p>Inductor and Flyback Transformer Design</p> <p>Ref. Design Sect. R1-1: Magnetic Core Properties</p> <p>Ref. Design Sect. R2-1: Eddy Current Losses in X-former Windings</p> <p>Ref. Design Sect. R3-1: Deriving the Equivalent Electrical Circuit</p> <p>Ref. Design Sect. R4-1: The Effect of Leakage Inductance on Performance</p> <p>Ref. Design Sect. R6-1: How to Design a Transformer with Fractional Turns</p> <p>Ref. Design Sect. R7-1: Winding Data</p> <p>All 2001 Magnetics Design Handbook Sections in a single compressed zip file</p>

www.ProfessorPetry.com.br



Disciplina

Plano de Ensino (2009/1)

Data das avaliações

Notas da disciplina

Aulas

Notas de Aula

Apresentações

Complementos

Listas de exercícios

Avaliações anteriores

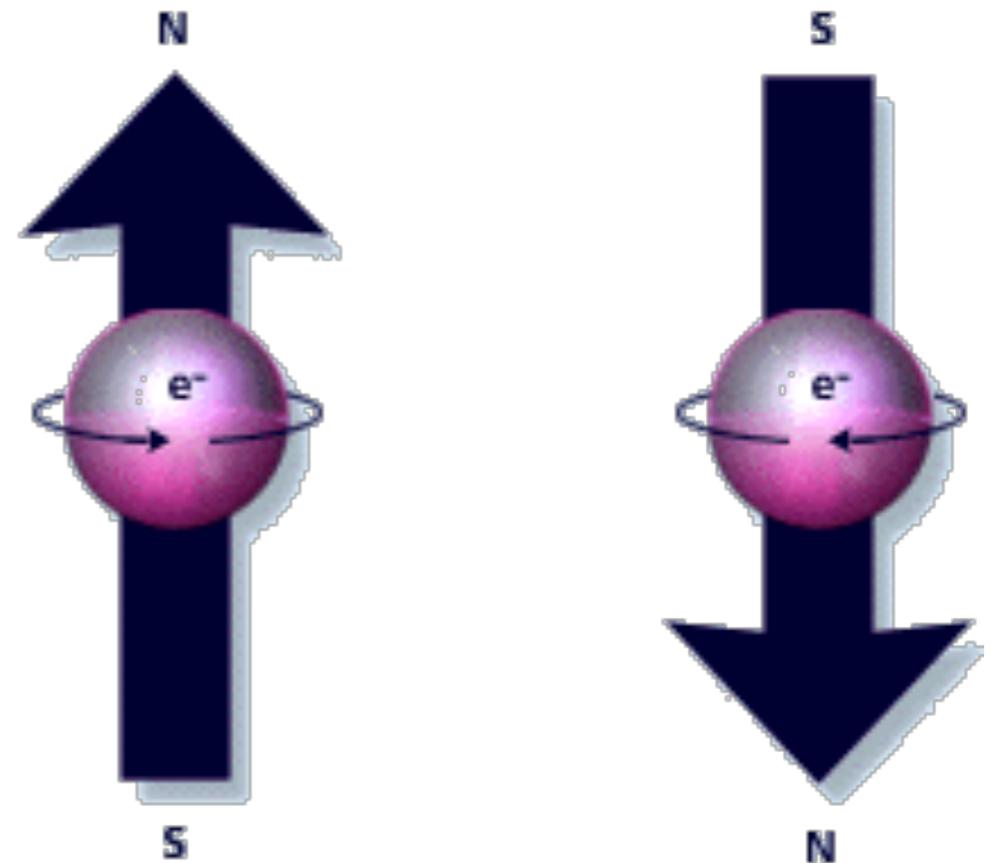
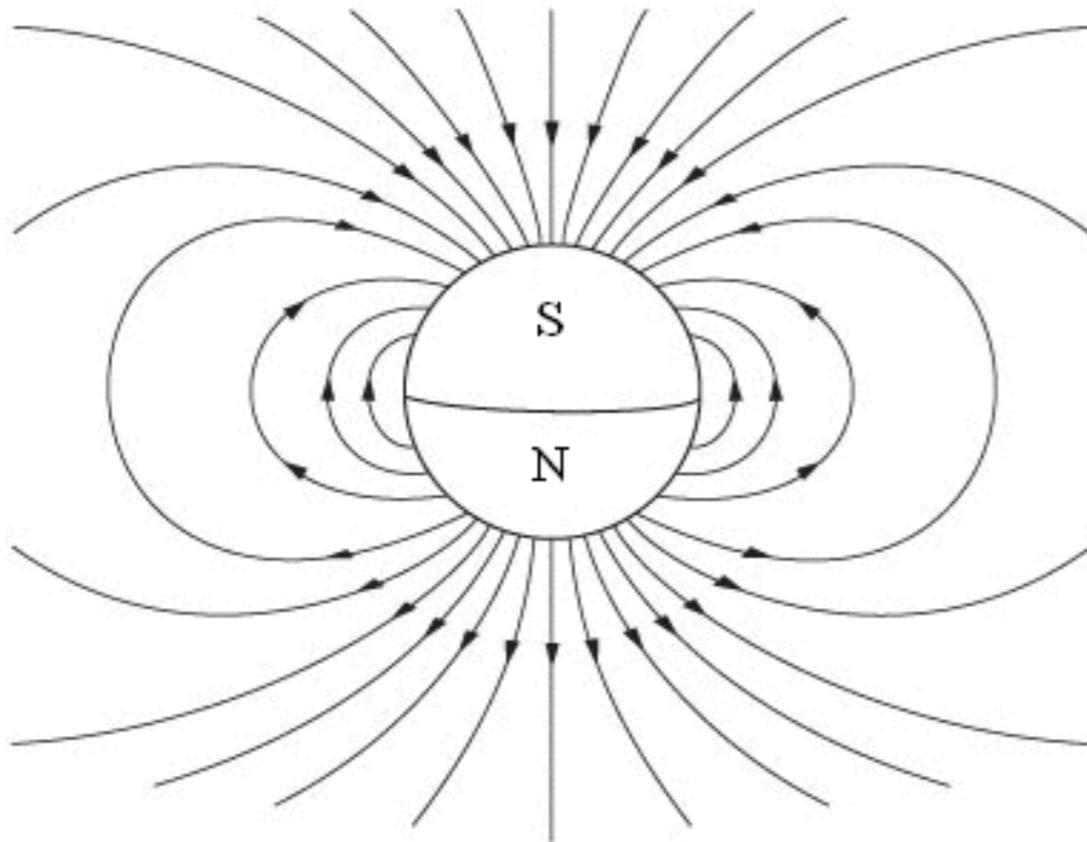
Revisão de eletromagnetismo:

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

Conceitos Iniciais

Dipolos magnéticos:

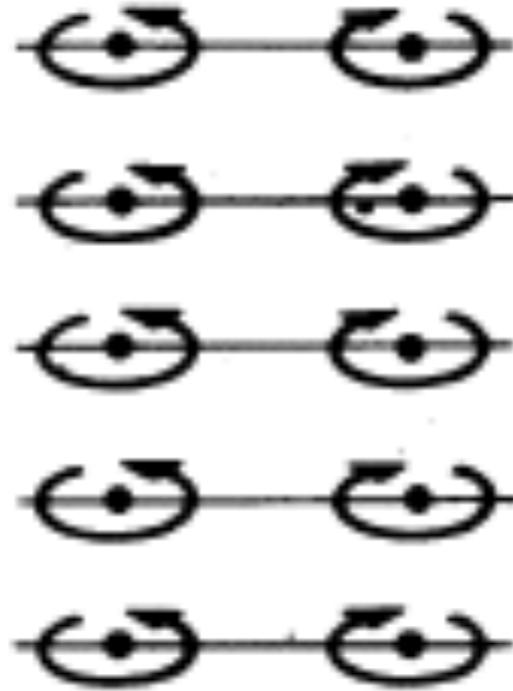
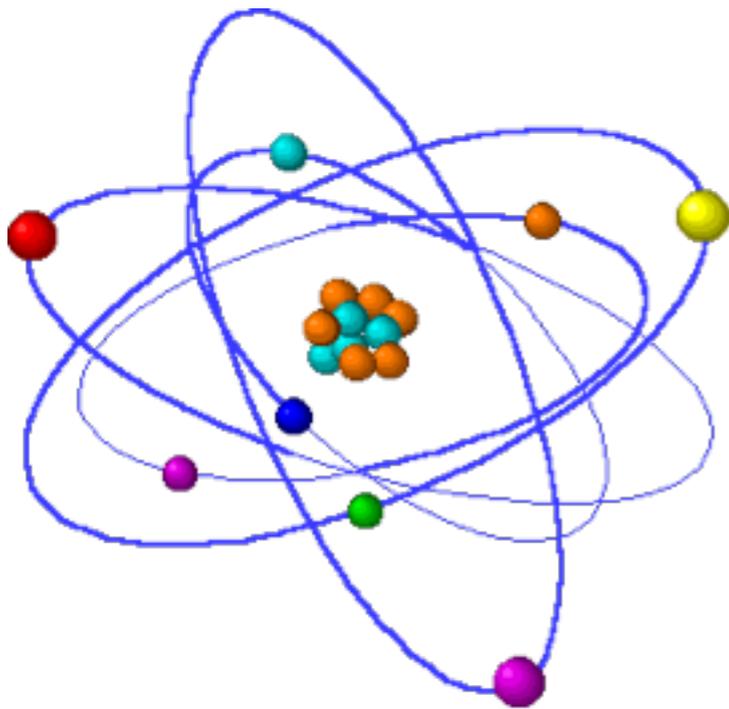
- Determinam o comportamento dos materiais num campo magnético;
- Tem origem no momentum angular dos elétrons nos íons ou átomos que formam a matéria.



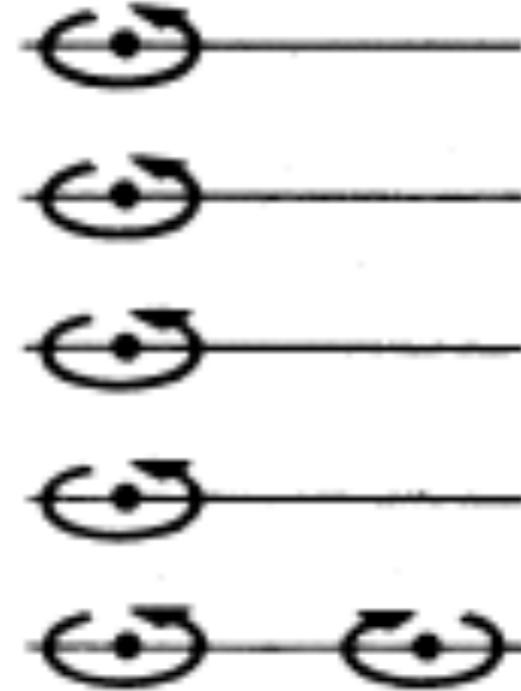
Conceitos Iniciais

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

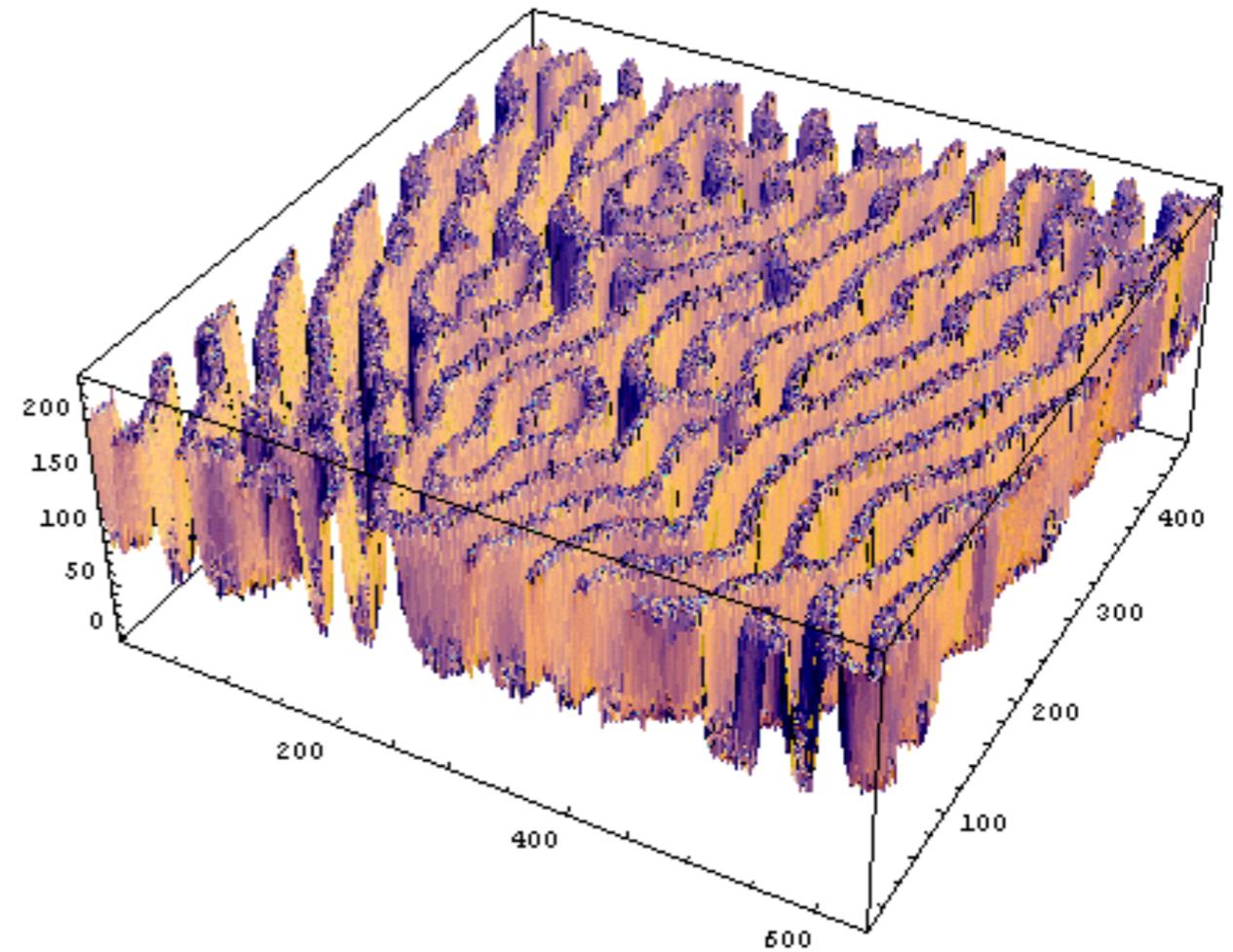
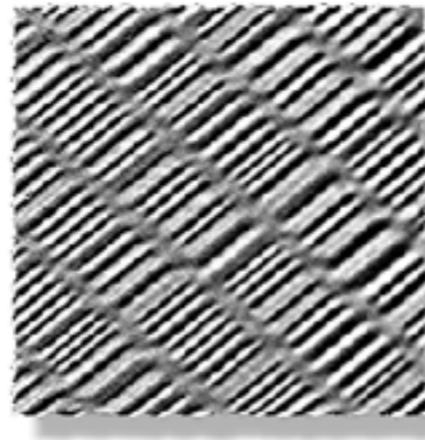
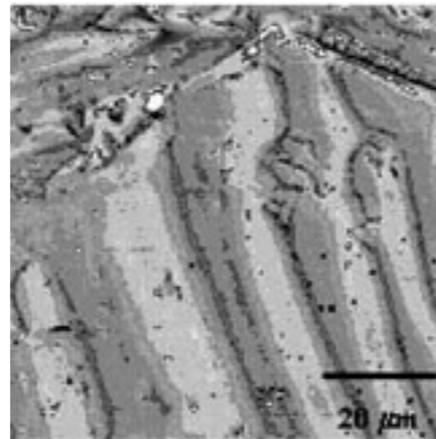
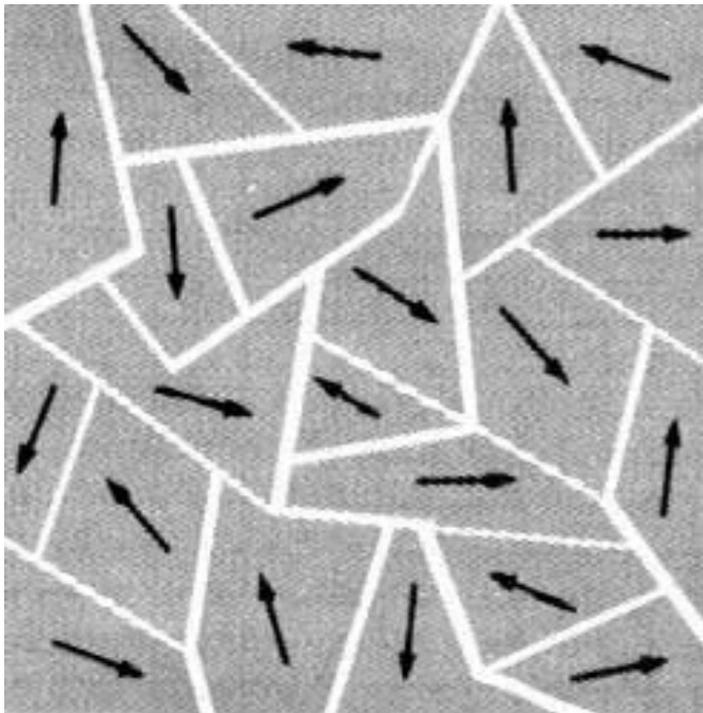


Momento $\neq 0$

Conceitos Iniciais

Domínios magnéticos:

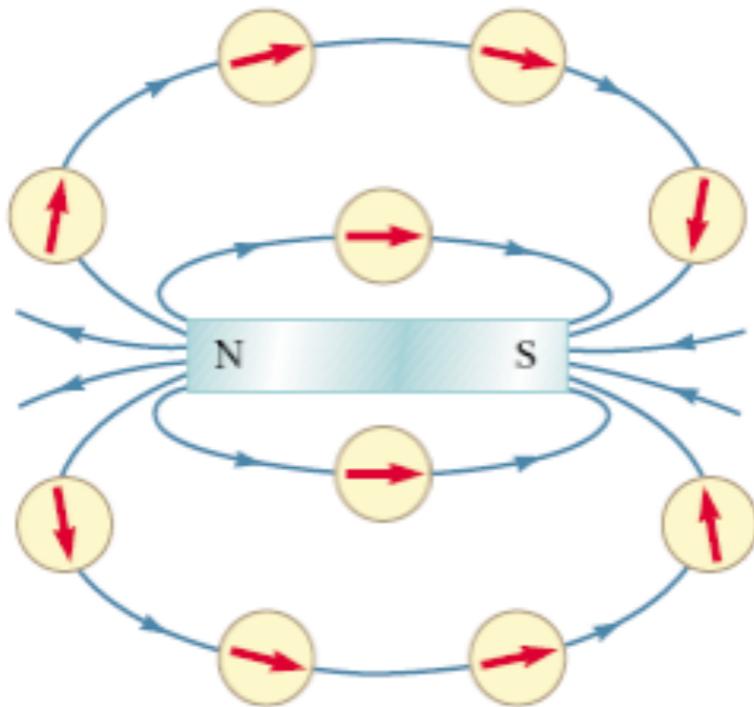
- Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
- Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
- Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.



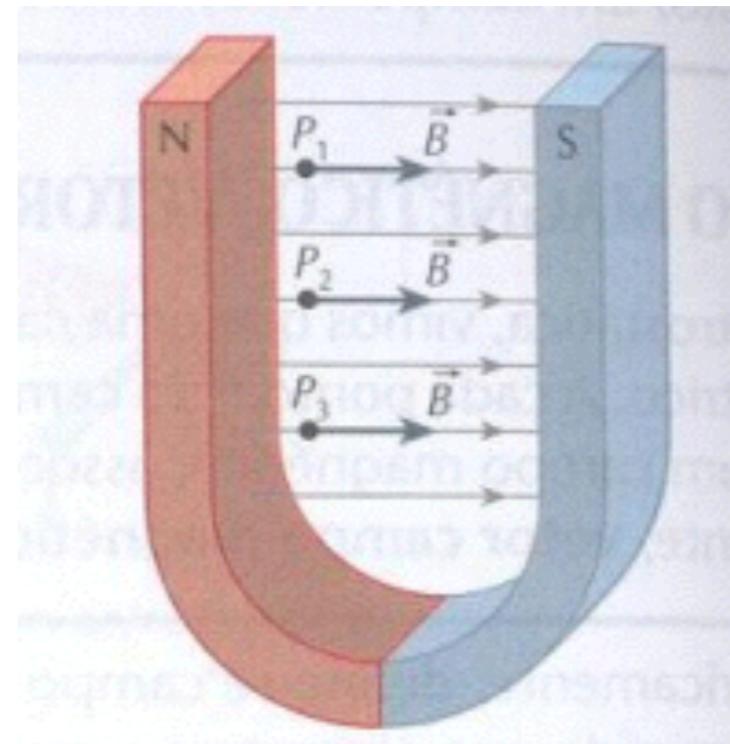
Campo Magnético

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.

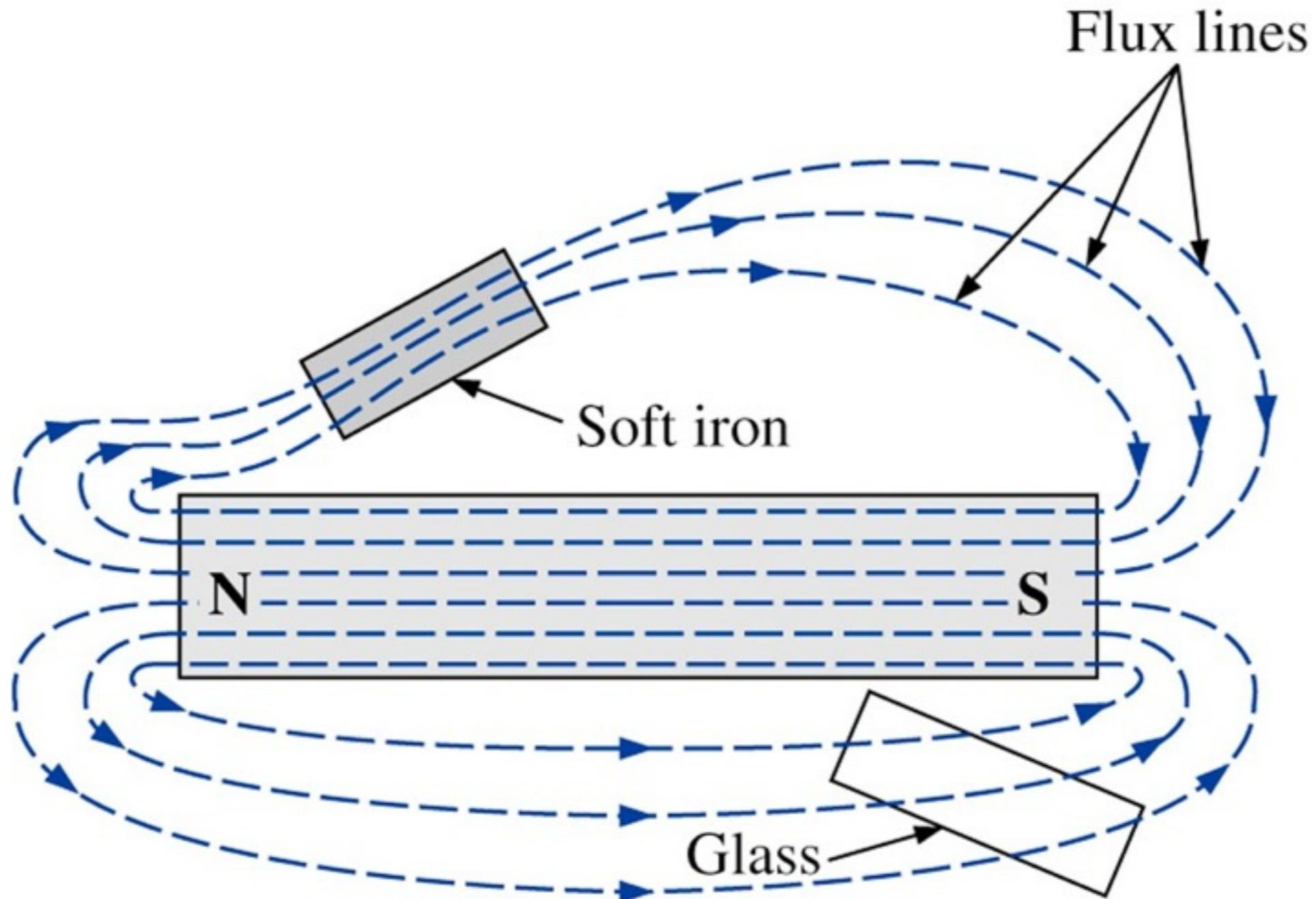


Campo não-uniforme



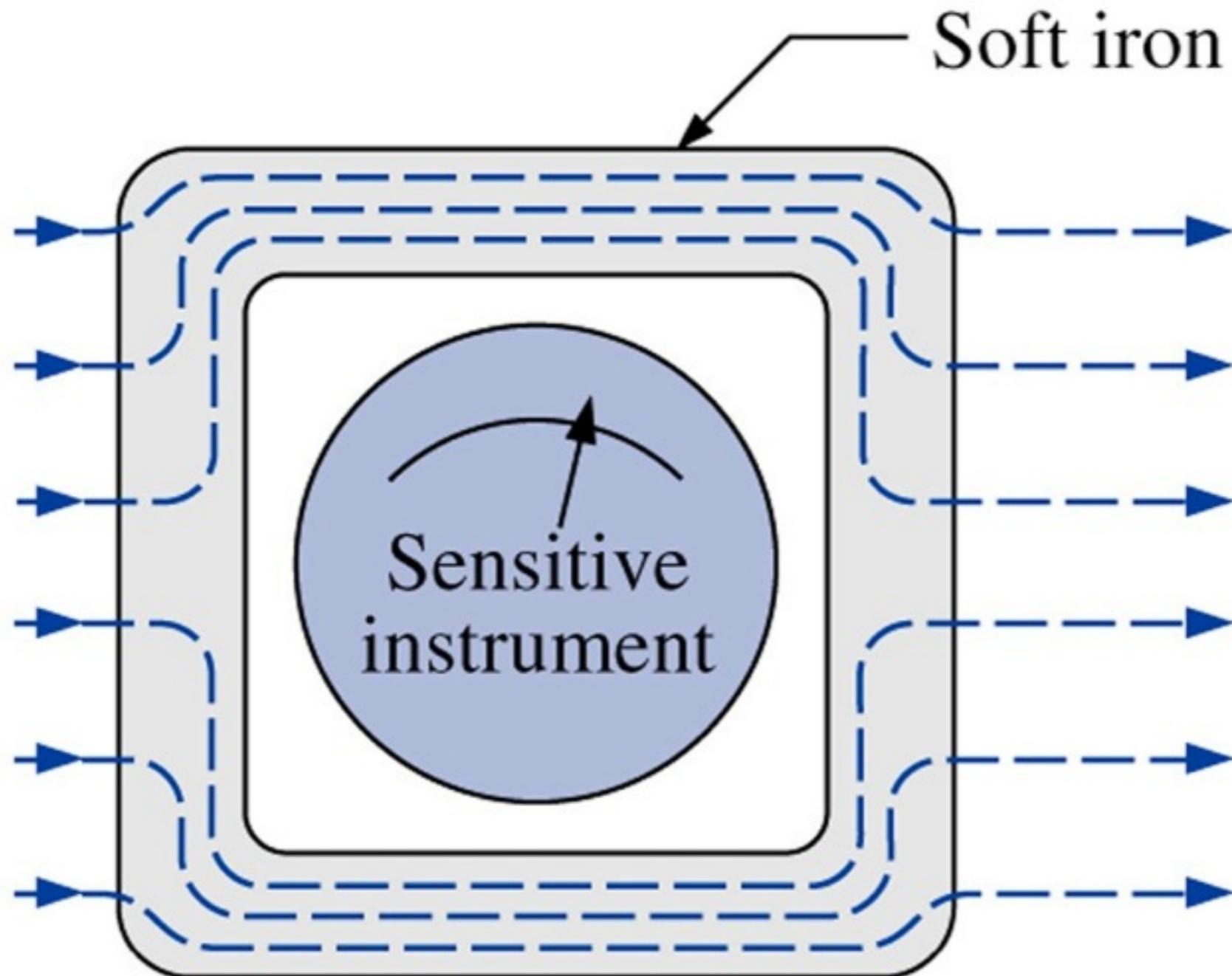
Campo uniforme

Campo Magnético



Efeito de material ferromagnético sobre as linhas de campo.

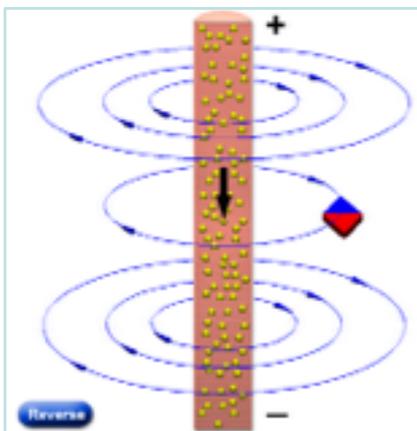
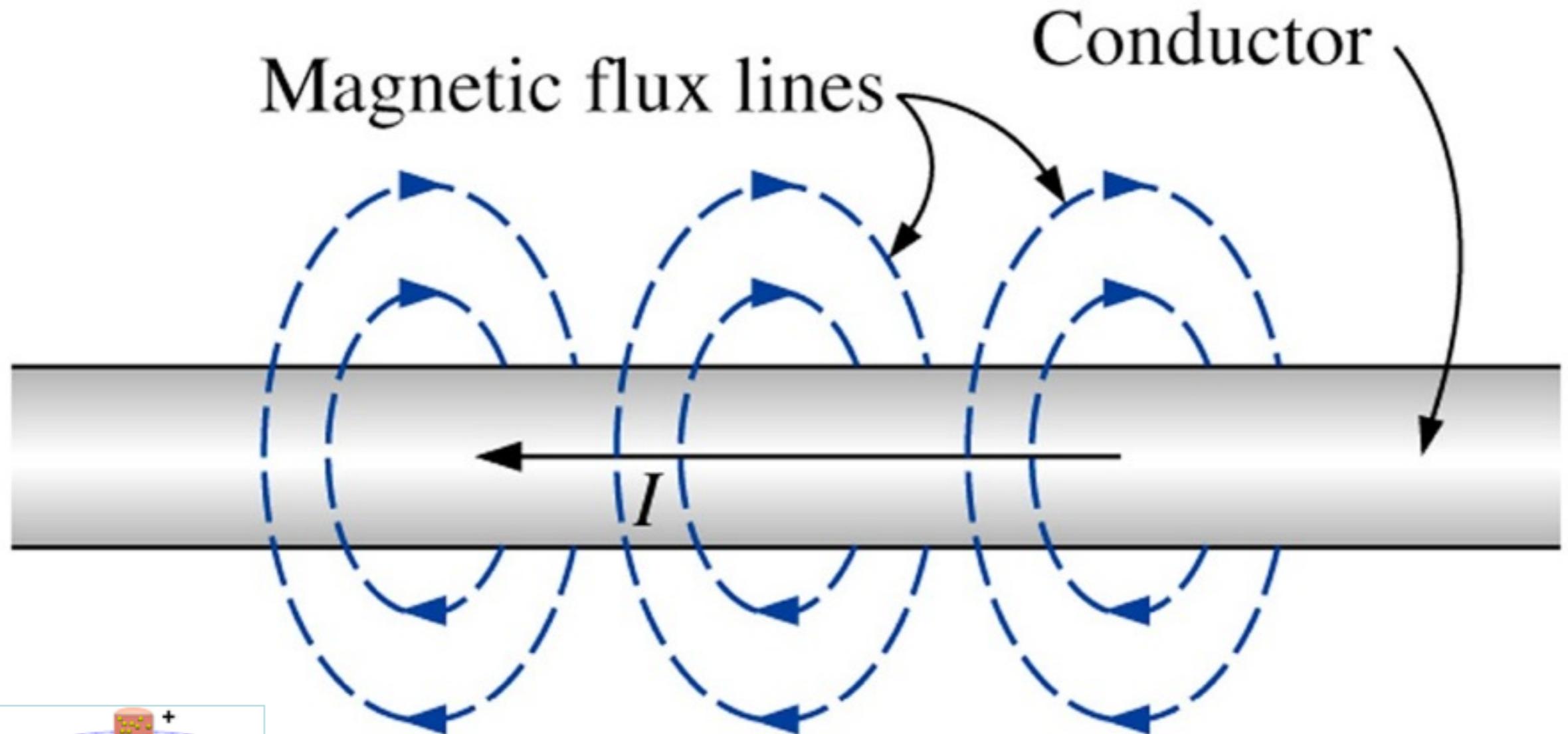
Campo Magnético



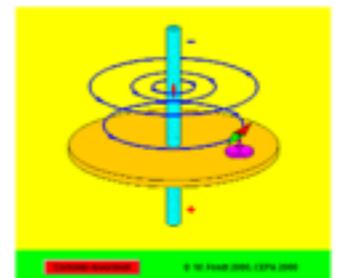
Efeito de material ferromagnético sobre as linhas de campo.

Campo Magnético

Linhas de campo em um condutor retilíneo percorrido por corrente:

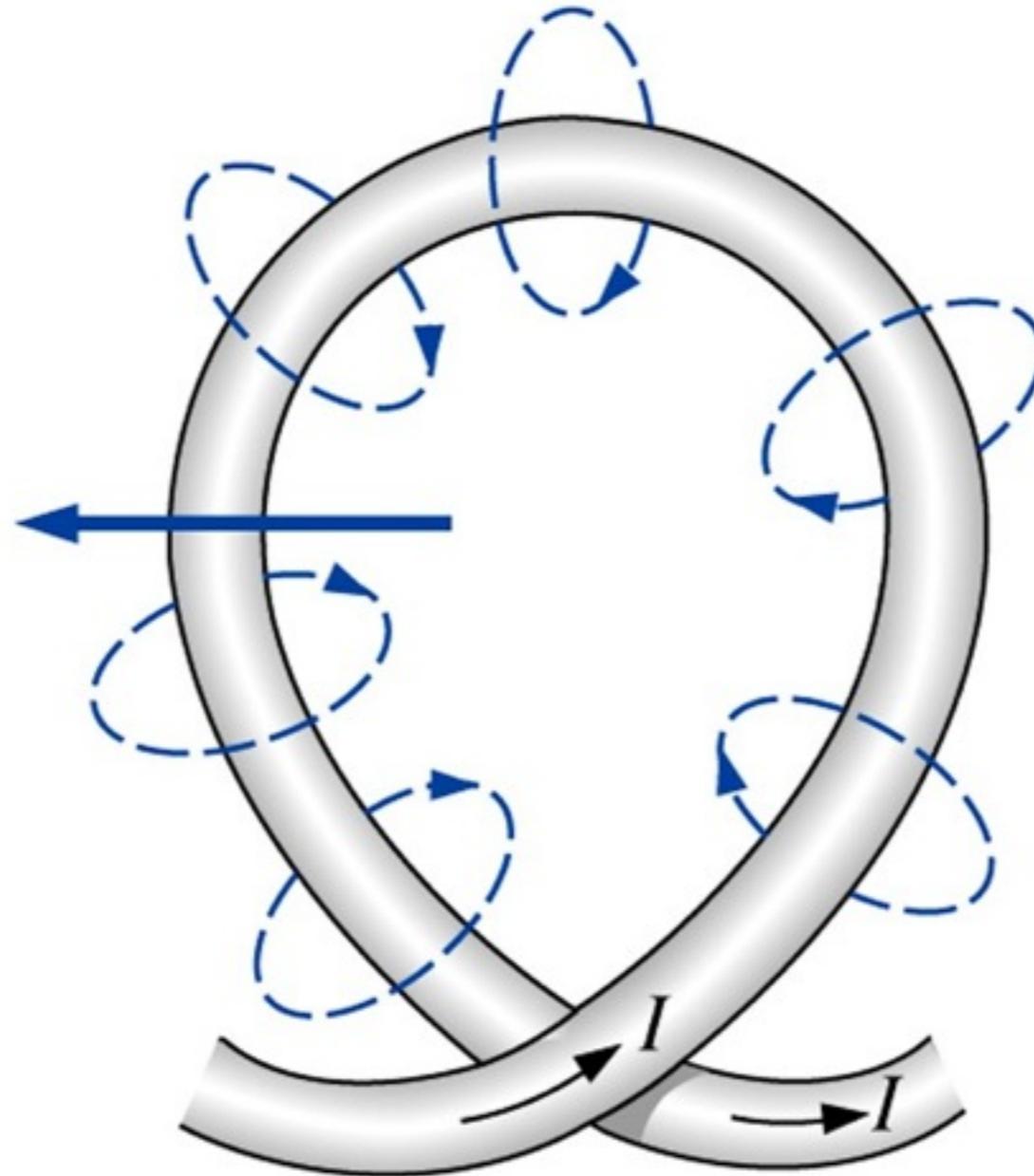


<http://www.walter-fendt.de/ph11br/>

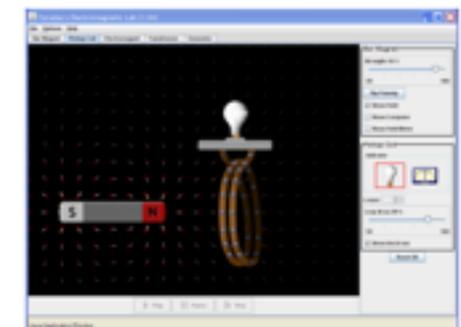


Campo Magnético

Linhas de campo em uma espira circular percorrida por corrente:

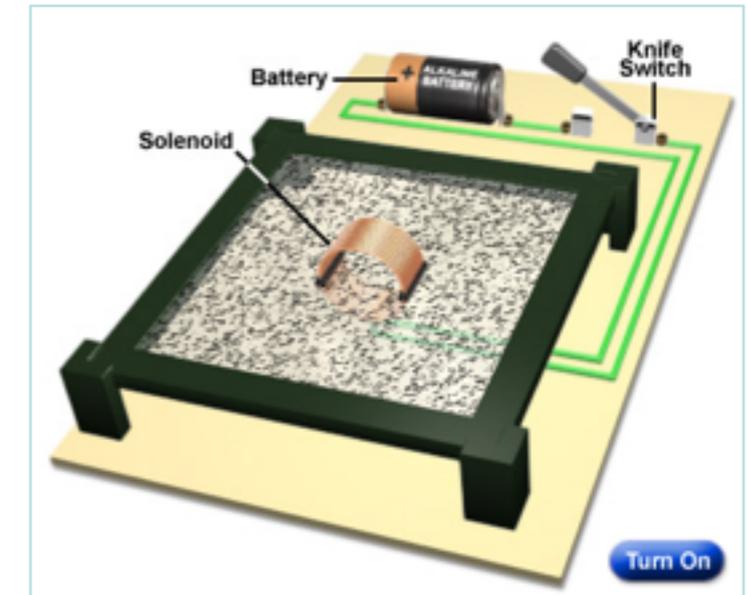
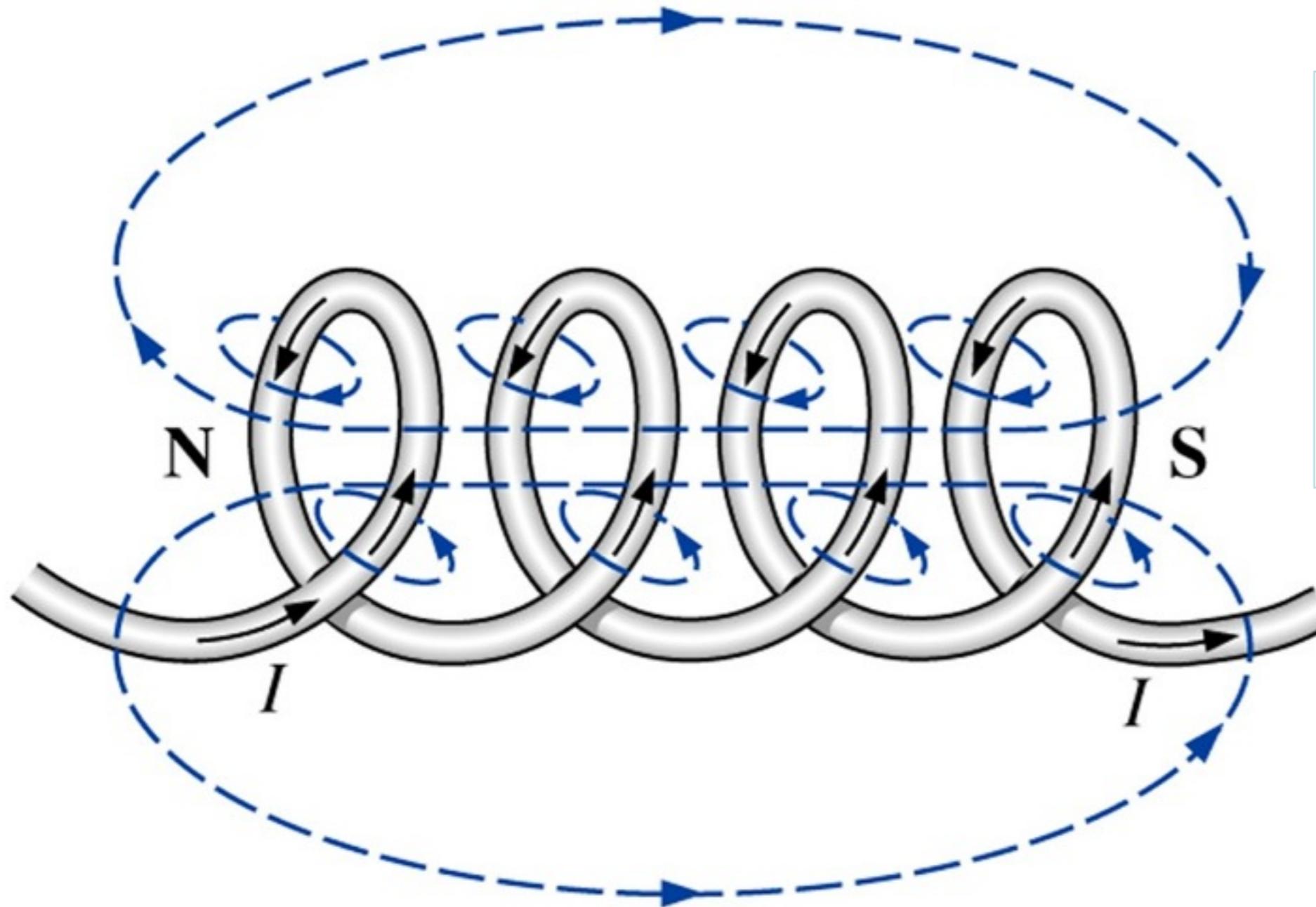


<http://phet.colorado.edu>



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.

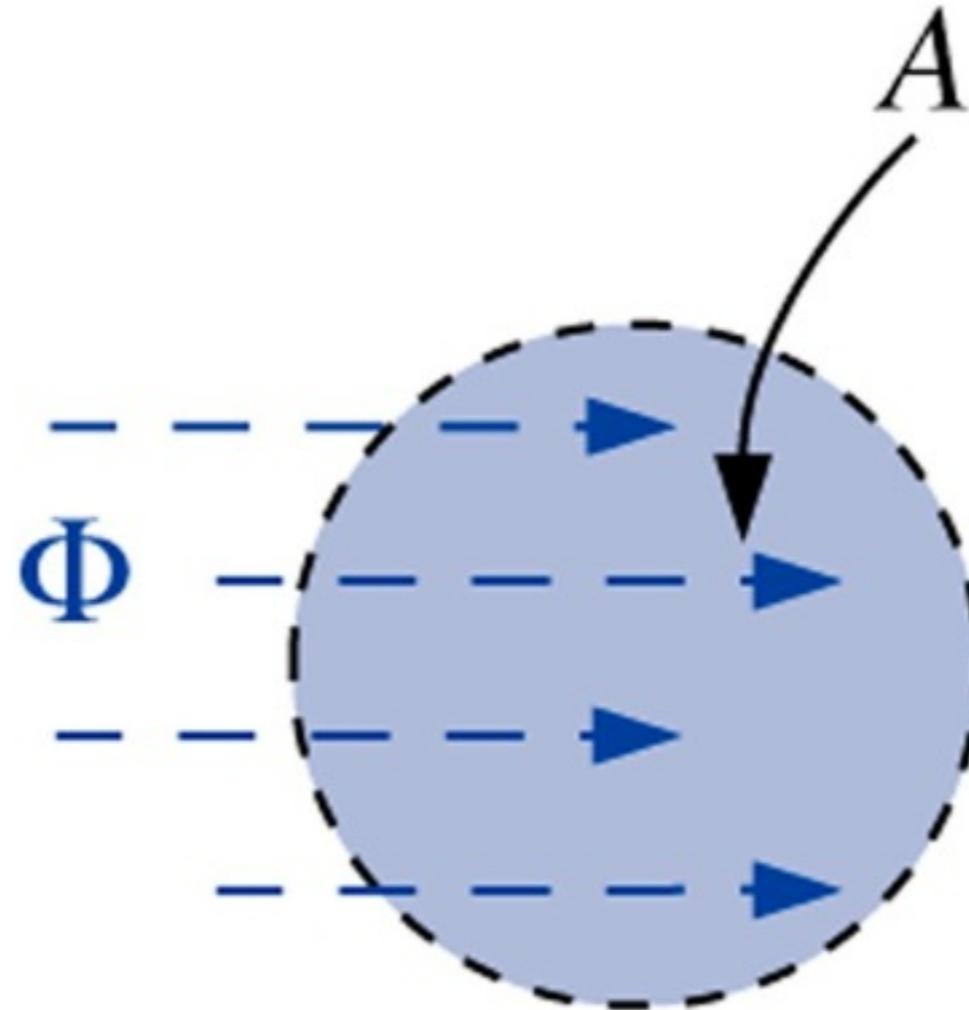
Fluxo magnético:

- 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

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

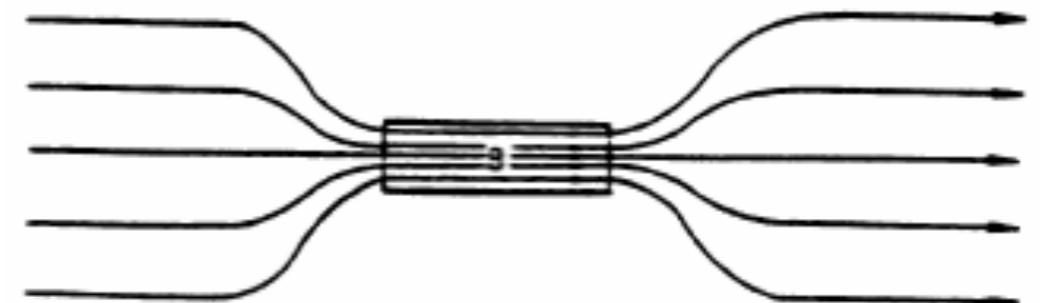
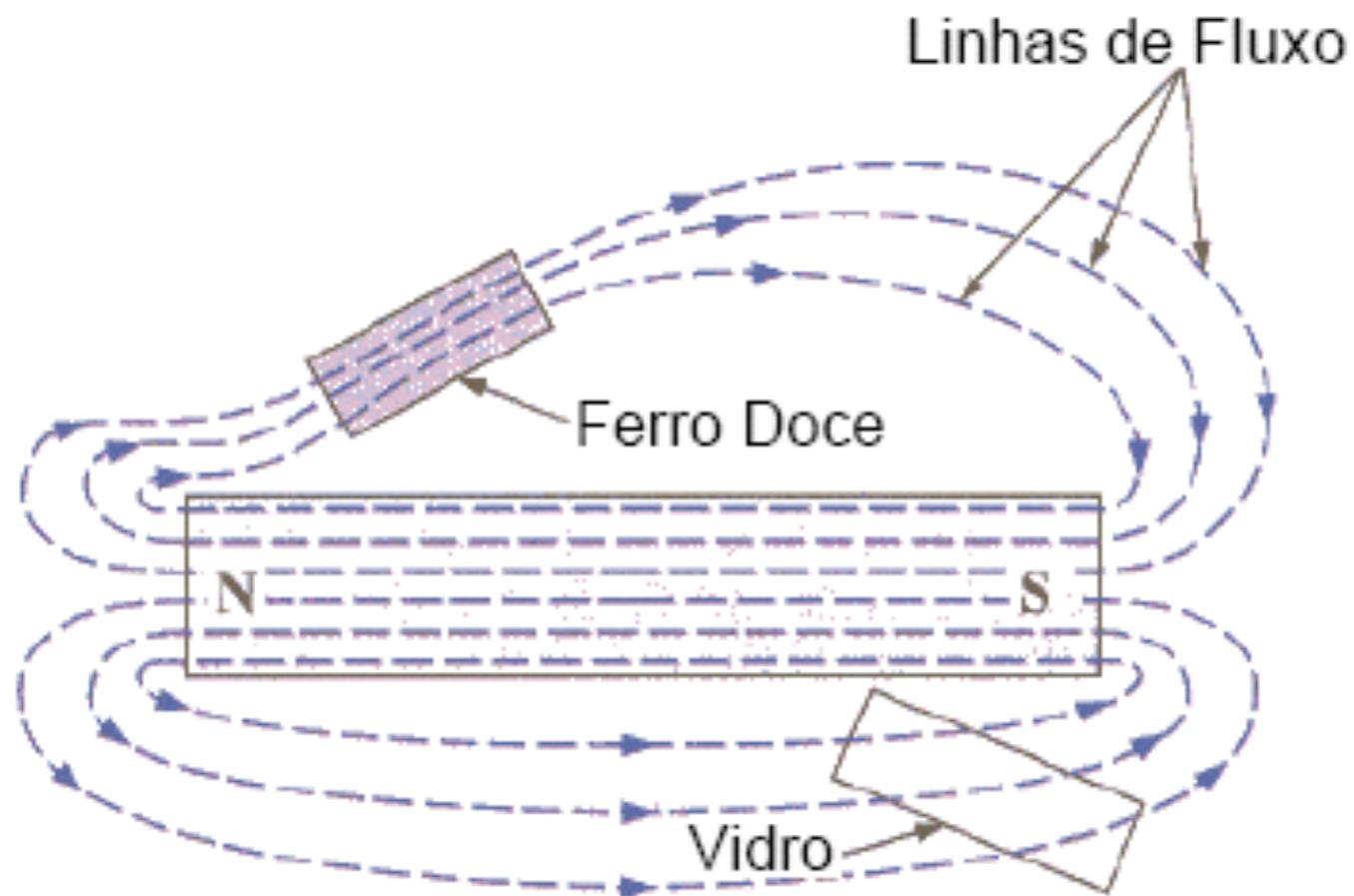
- B = teslas (T)
- Φ = webers (Wb)
- A = metros quadrados (m^2)



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 .



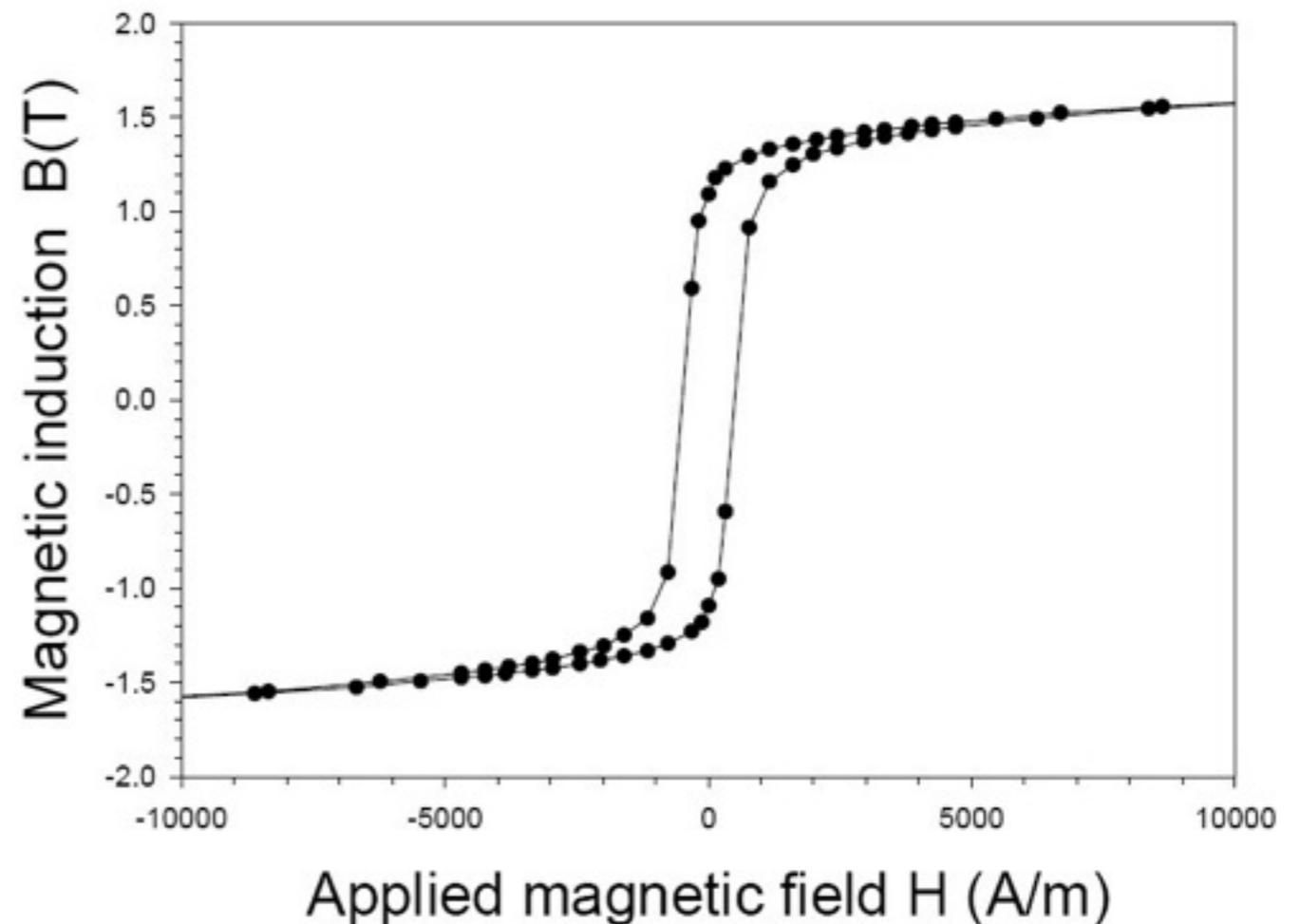
Permeabilidade Magnética

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

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

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

Permeabilidade do vácuo



Permeabilidade Magnética

Permeabilidade Relativa, μ_R	Tipo de Material
$\gg 1$	Ferromagnéticos
$\cong 1$	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:

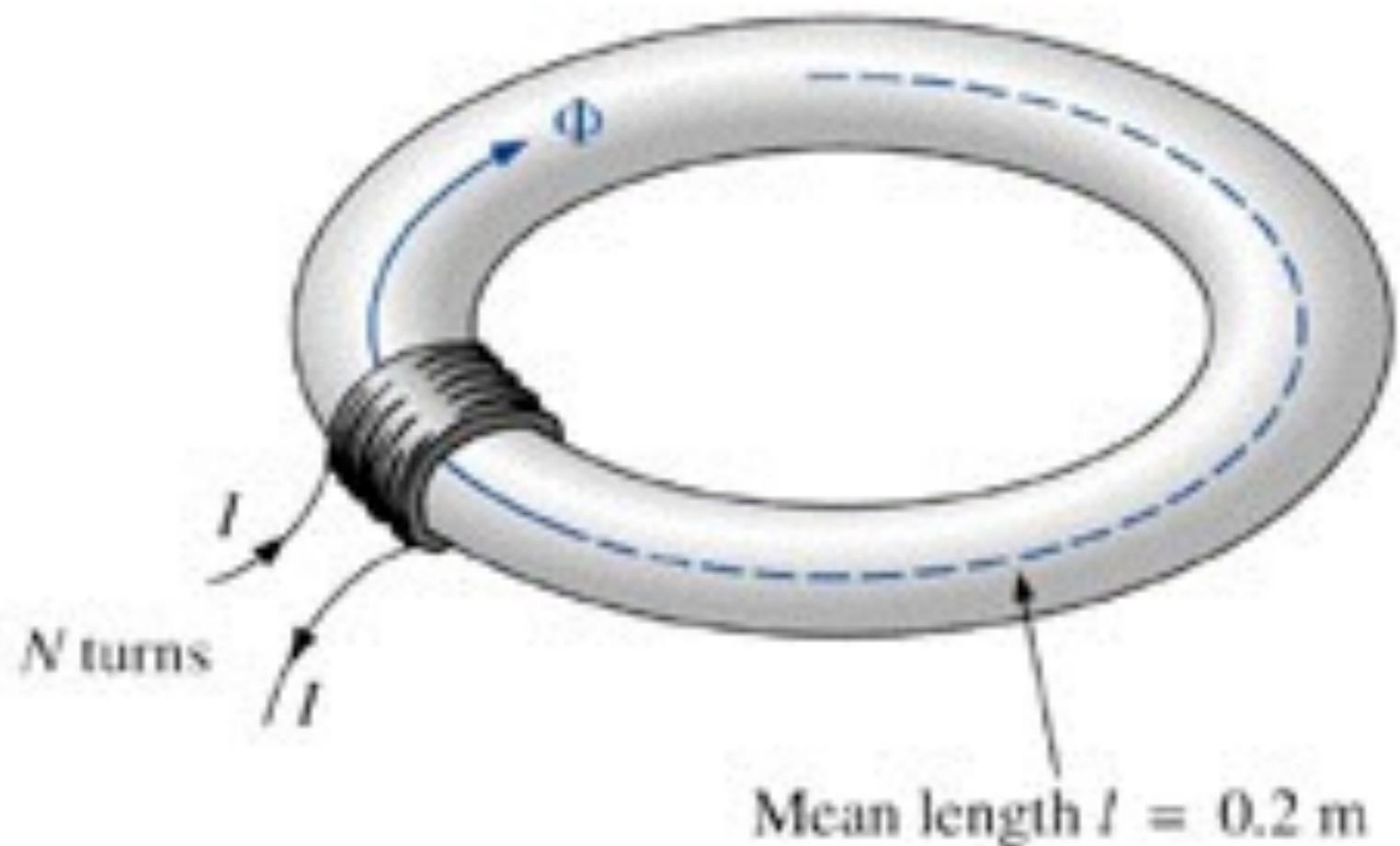
$$H = \frac{\mathfrak{S}}{l} \quad \longrightarrow \quad H = \frac{NI}{l}$$

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

Força Magnetizante

O campo eletromagnético depende basicamente de:

- Da intensidade da corrente;
- Da forma do condutor (reto, espira ou solenóide);
- Do meio (permeabilidade magnética);
- Das dimensões;
- Do número de espiras.

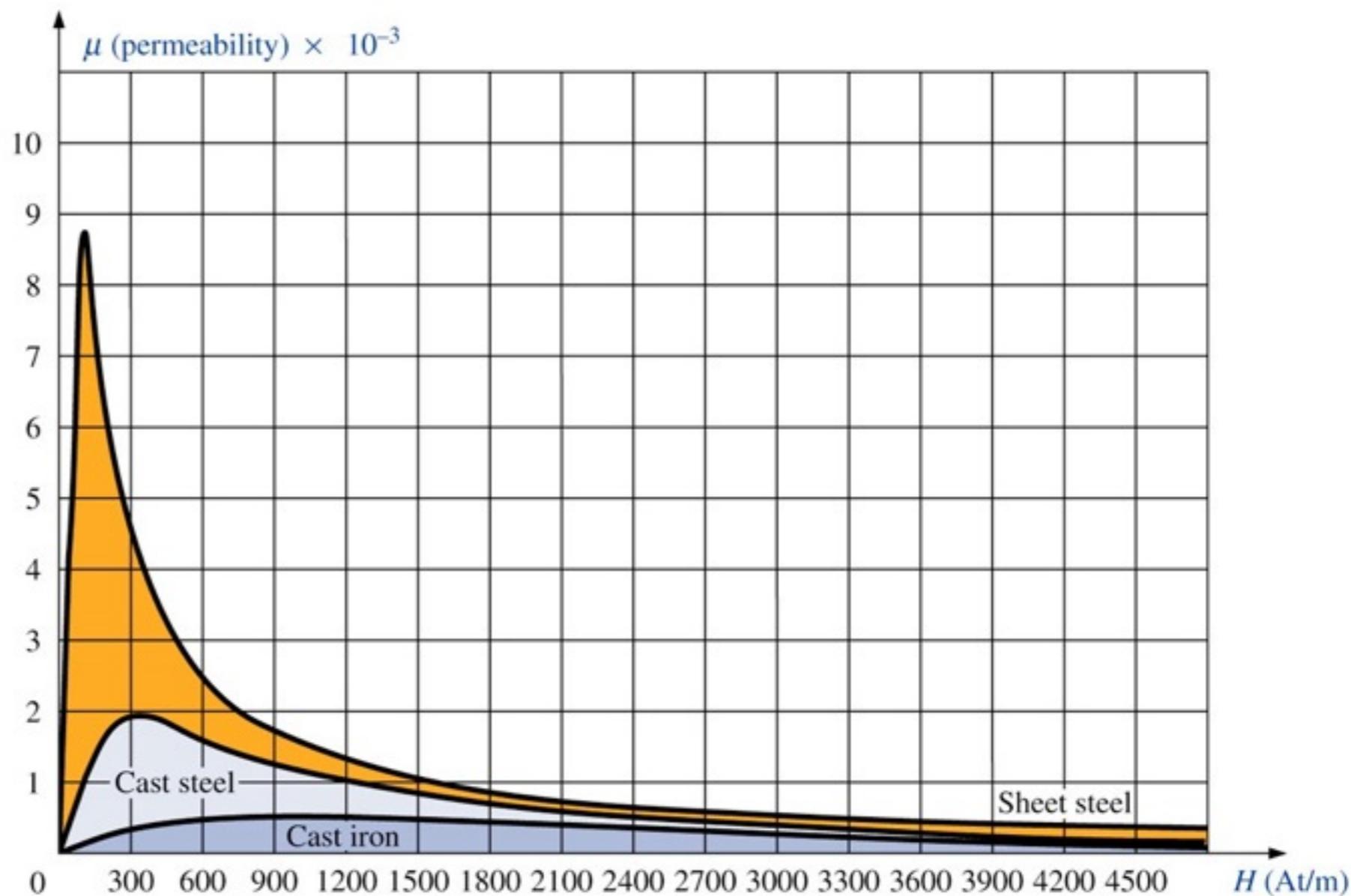


Força Magnetizante

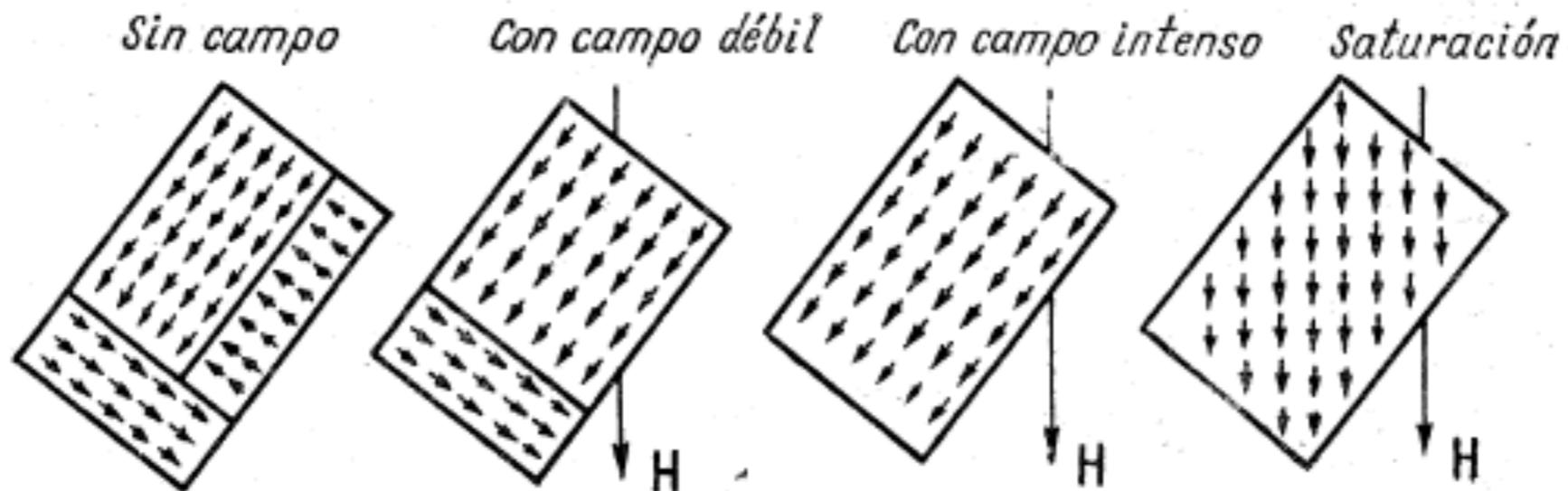
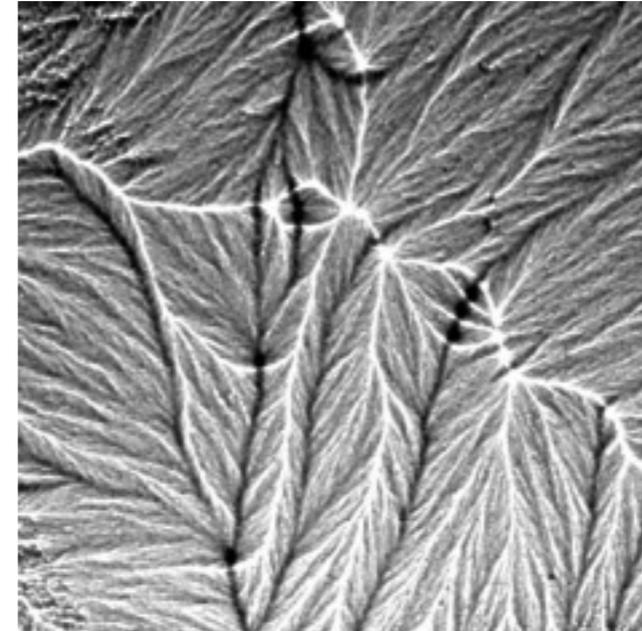
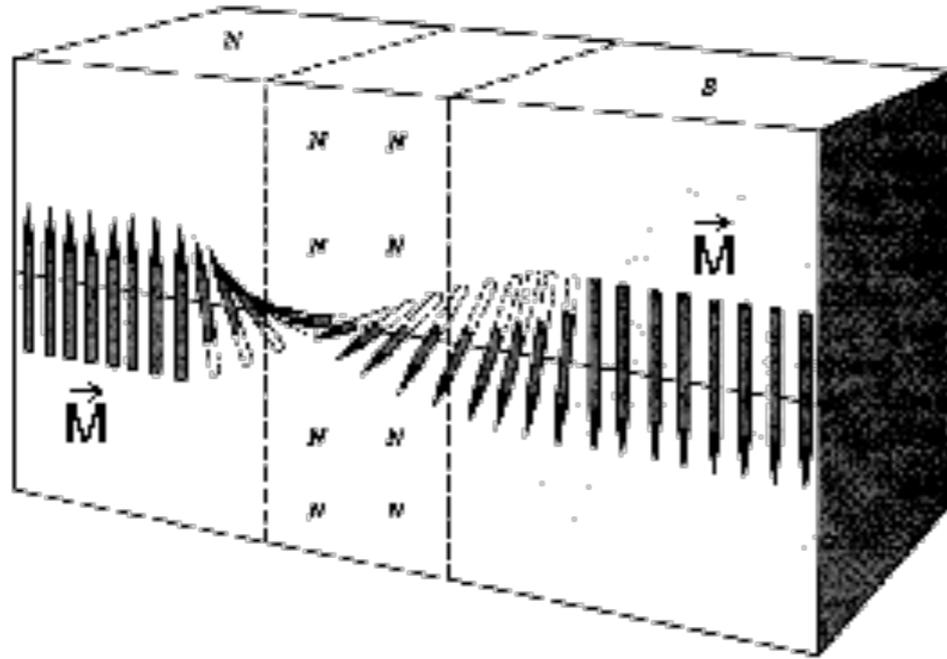
Relação densidade de fluxo e força magnetizante:

$$B = \mu H$$

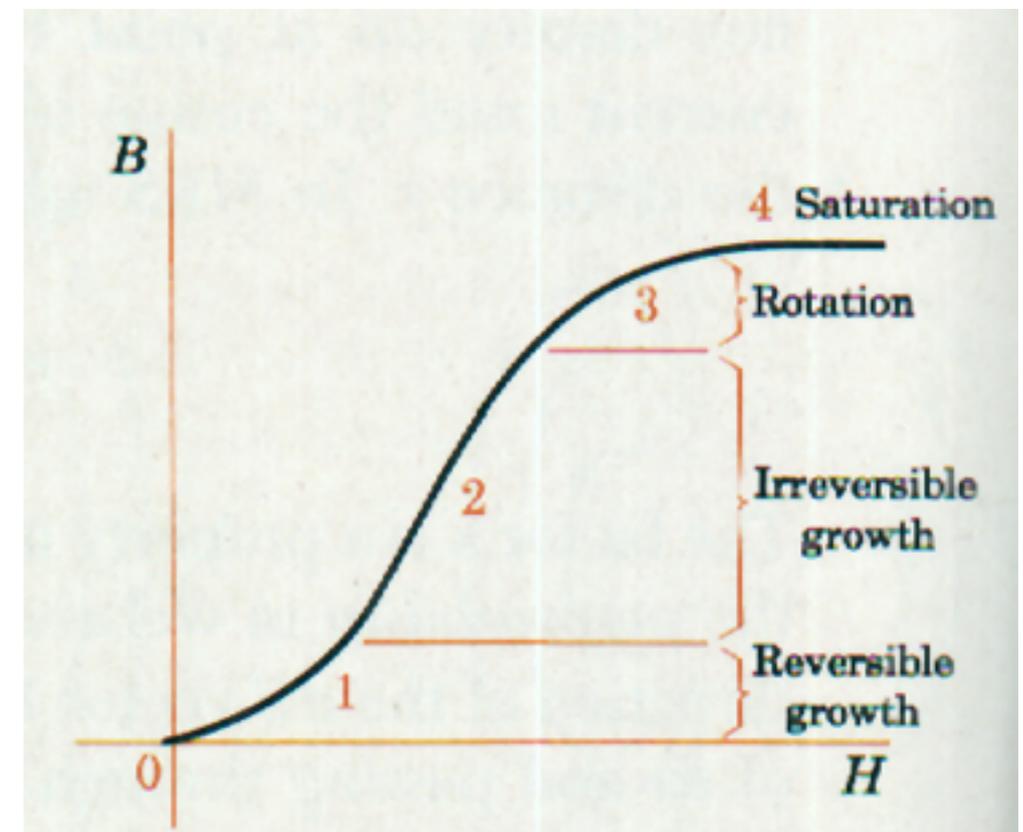
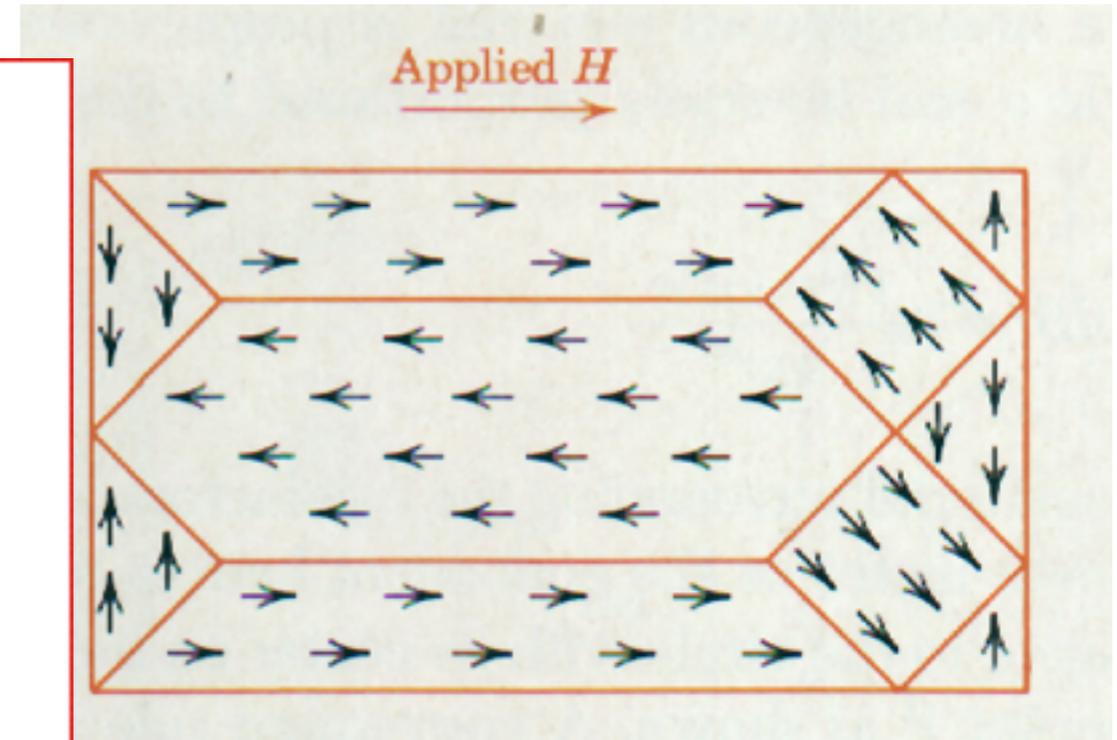
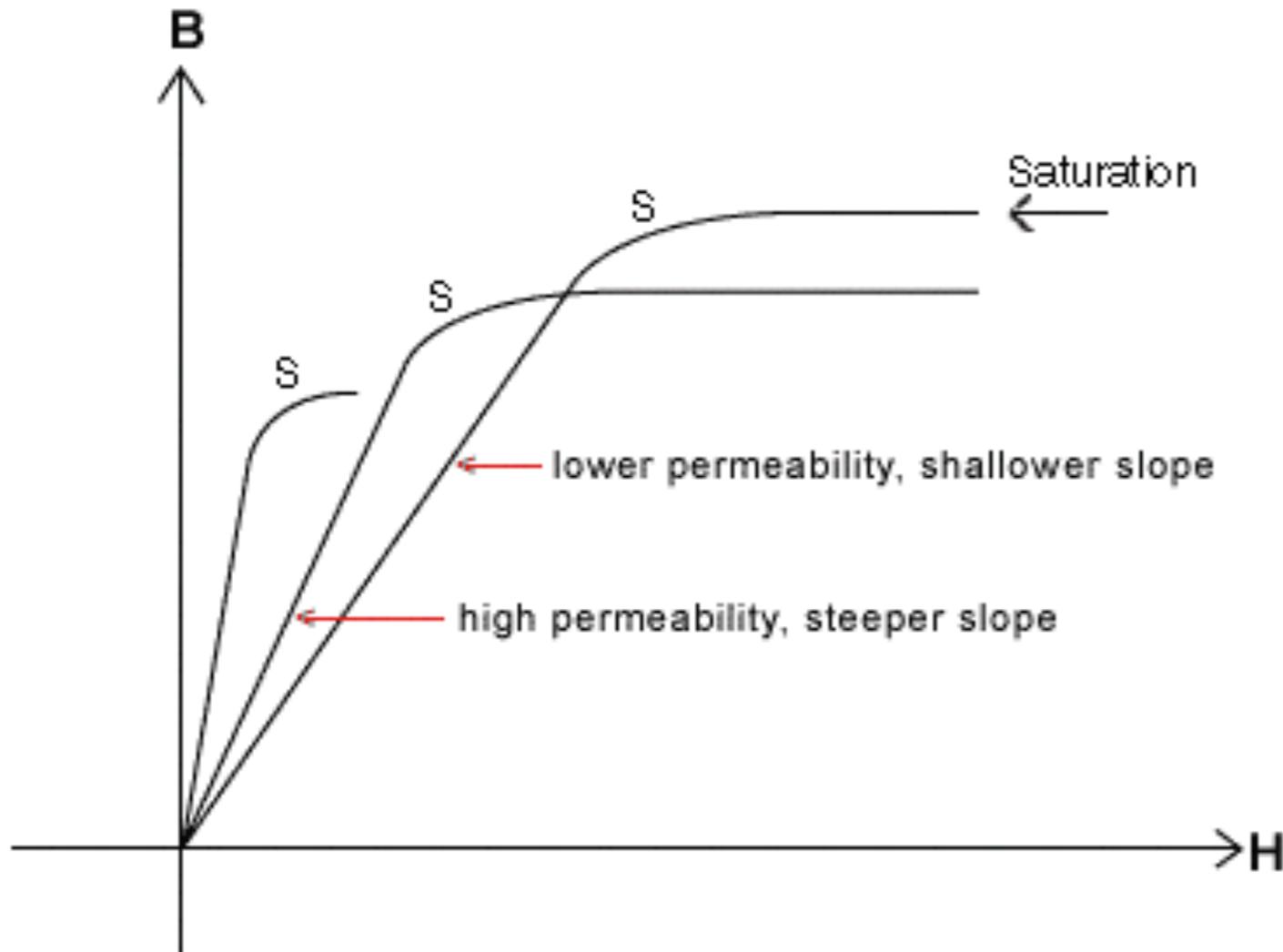
Variação de μ com
a força magnetizante



Curva de Magnetização

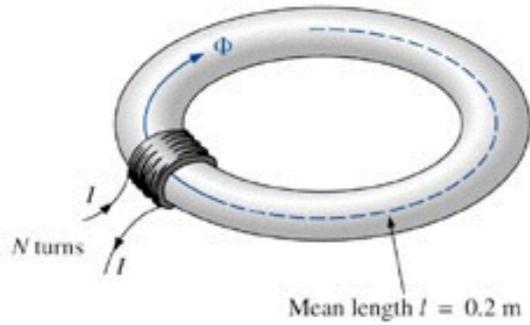


Curva de Magnetização

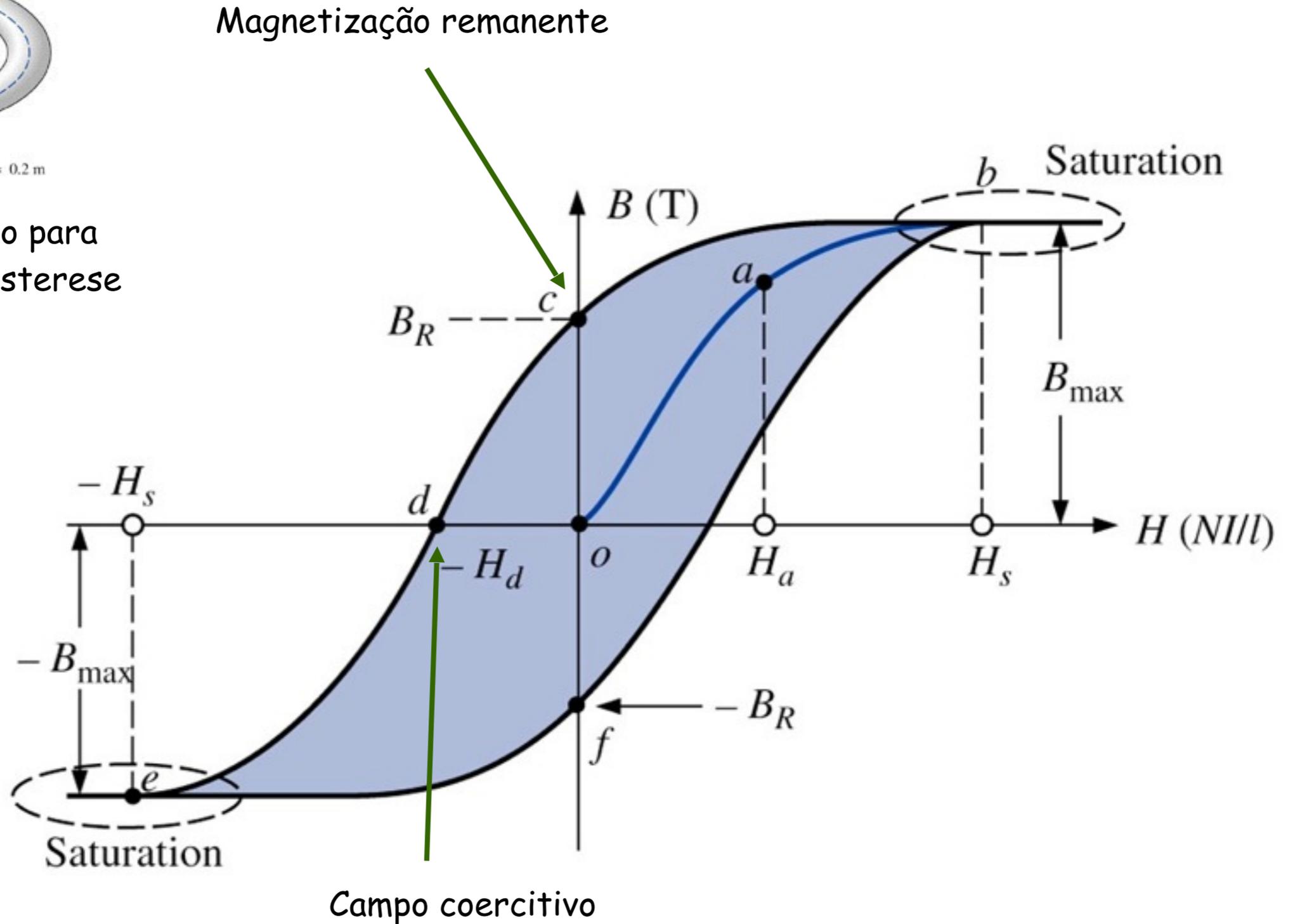


$$H \uparrow = \frac{NI \uparrow}{l}$$

Histerese



Circuito magnético para obter a curva de histerese



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.

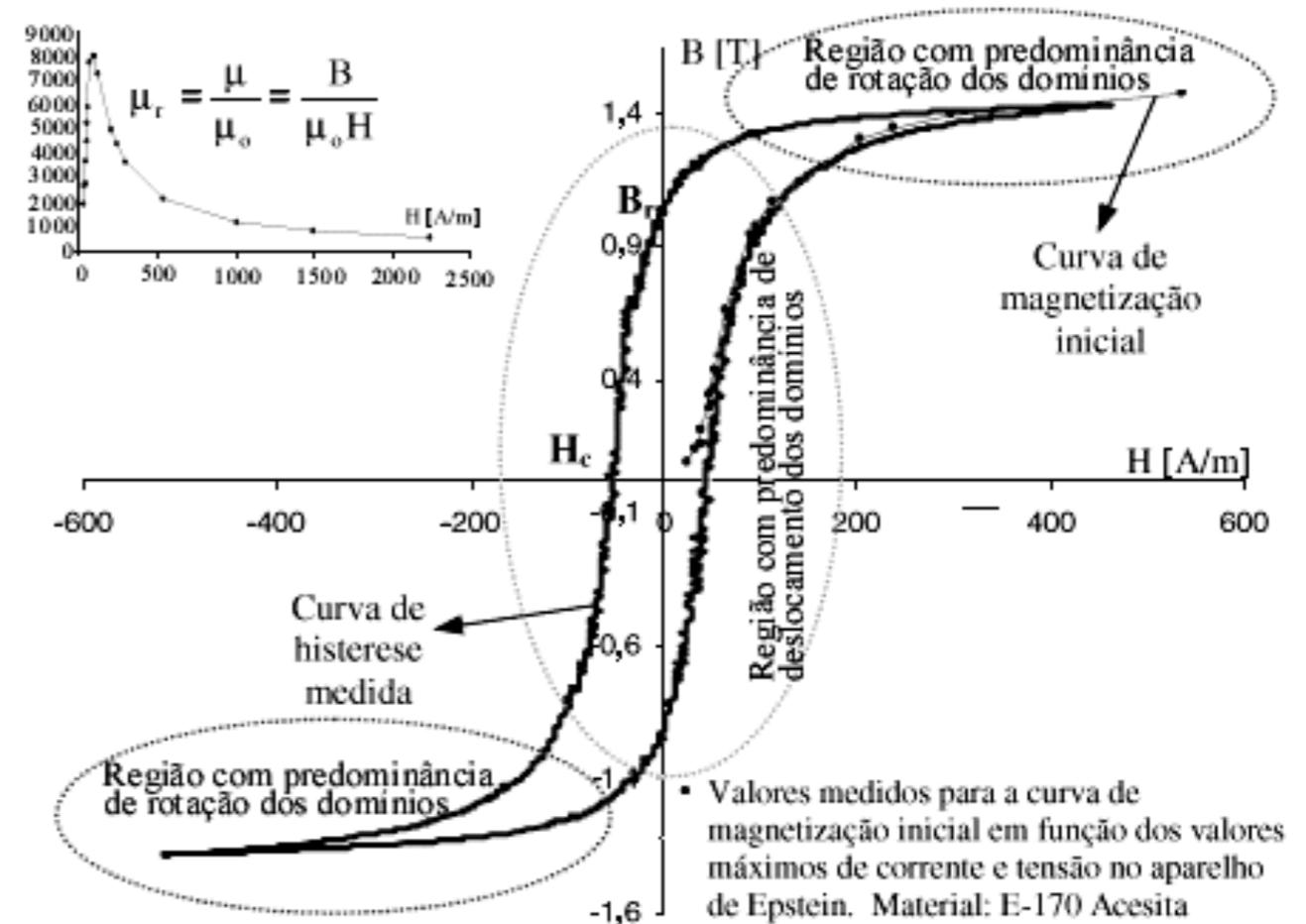


Figura 1: Curva representativa da histerese medida à 1Hz.

Efeitos de Proximidade e Pelicular

Efeito de proximidade:

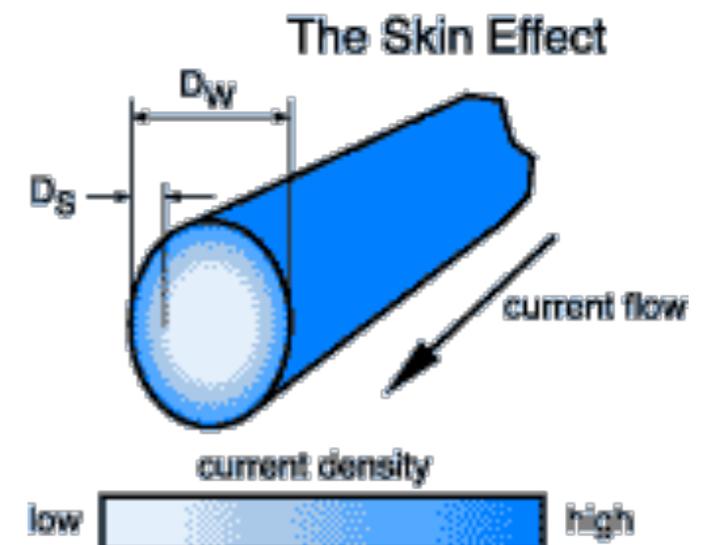
-Relaciona um aumento na resistência em função dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

Efeito pelicular (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 $\longrightarrow \Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_s}} [cm]$



Classificação dos Materiais

Classificação quanto ao alinhamento magnético:

- Materiais magnéticos moles - não retido;
- Materiais magnéticos duros - permanentemente retido.

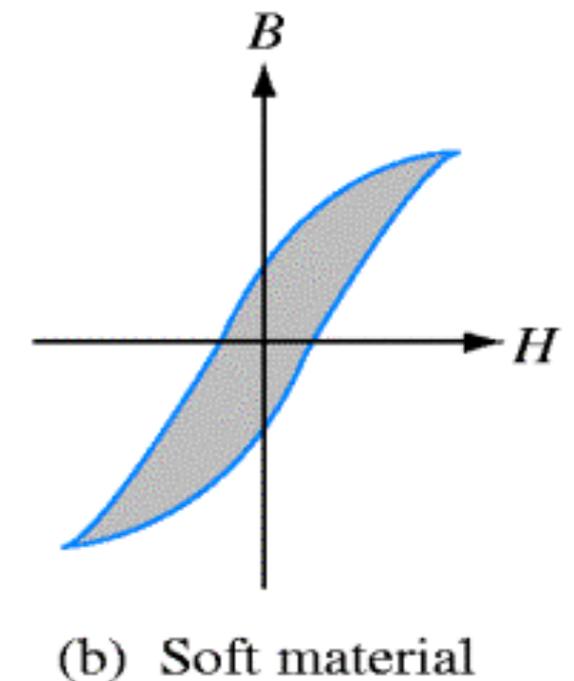
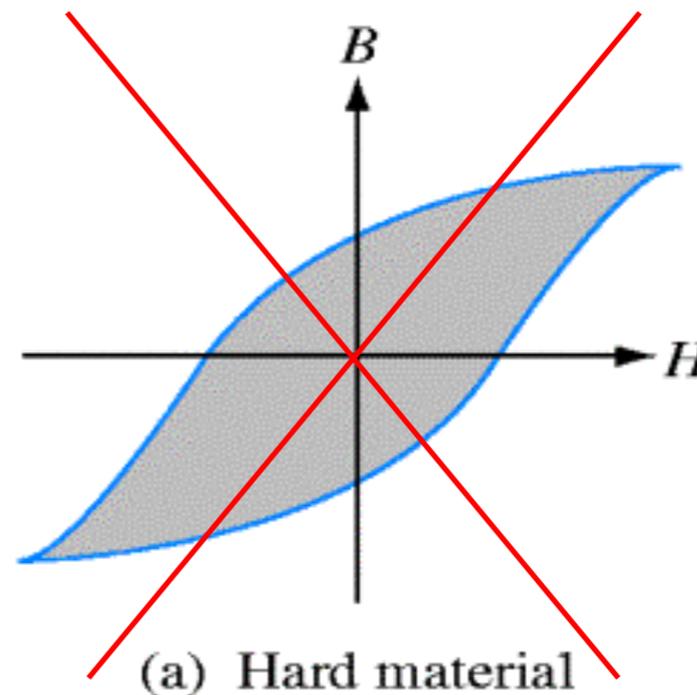
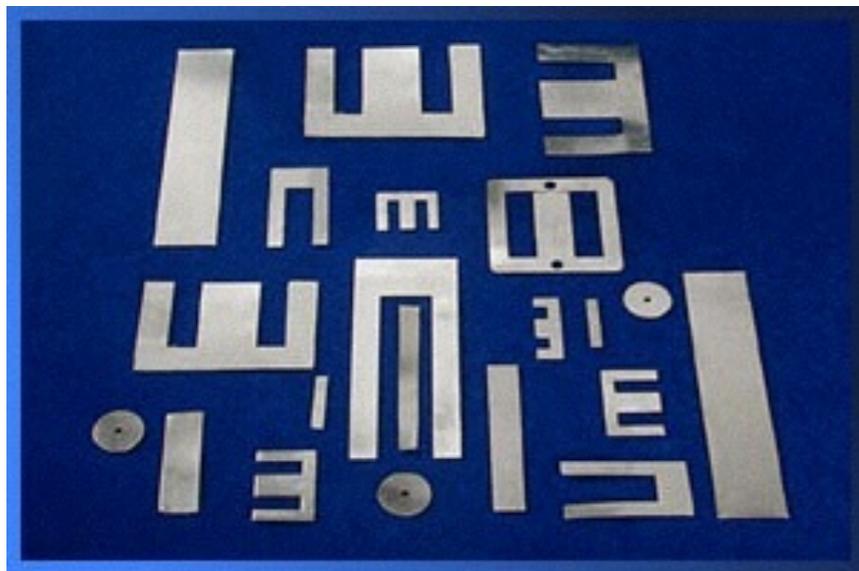
Classificação quanto a susceptibilidade e permeabilidade:

- Diamagnéticos;
- Paramagnéticos;
- Ferromagnéticos;
- Ferrimagnéticos;
- Antiferromagnéticos.

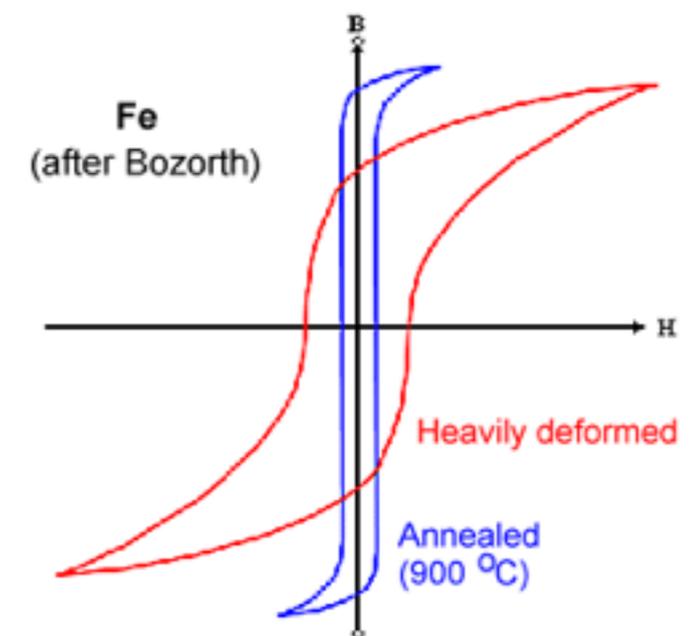
Materiais Magnéticos Moles

Característica geral:

- Não apresentam magnetismo remanente.



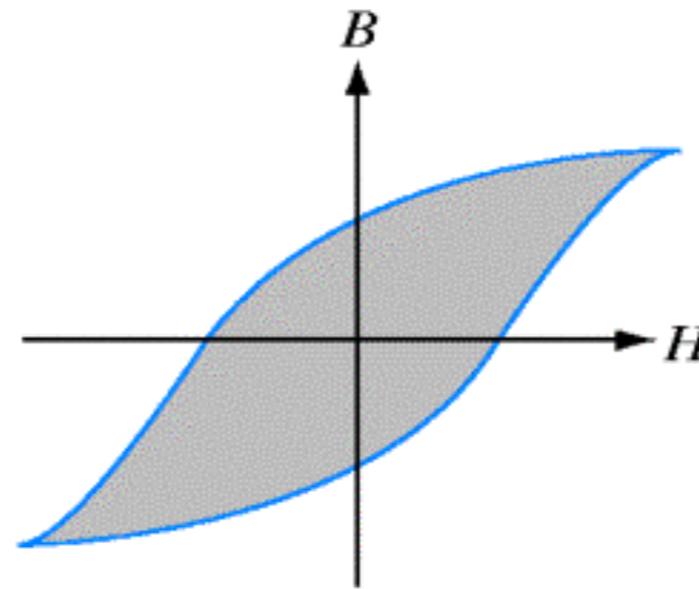
Recozimento →



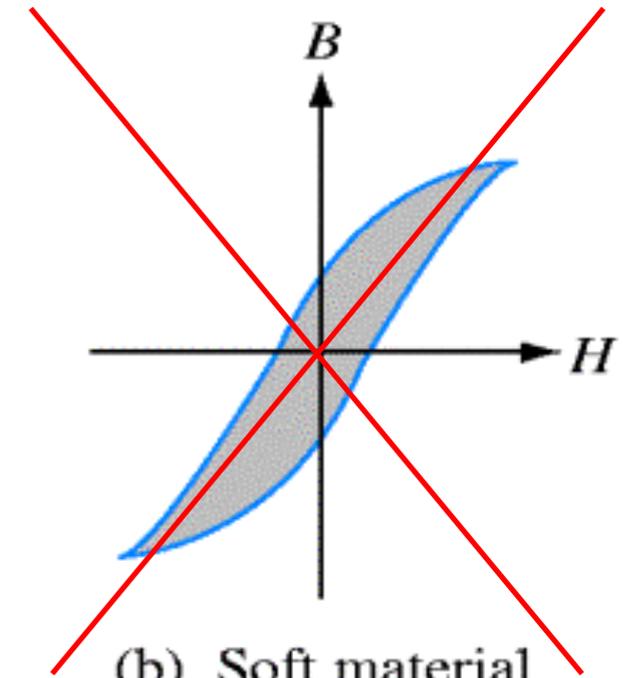
Materiais Magnéticos Duros

Característica geral:

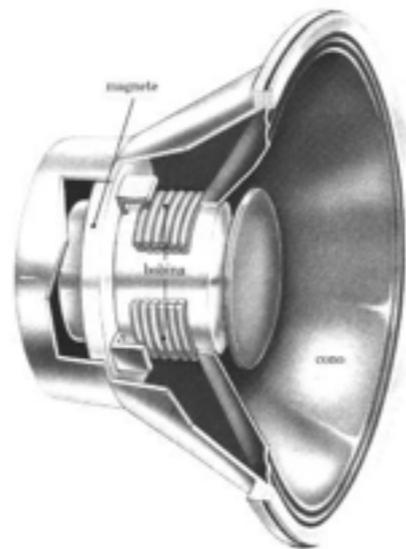
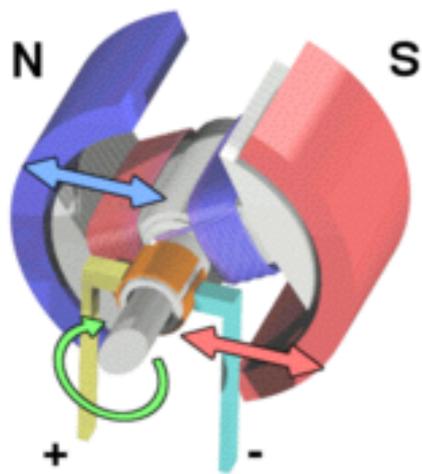
- Apresentam elevado magnetismo remanente.



(a) Hard material



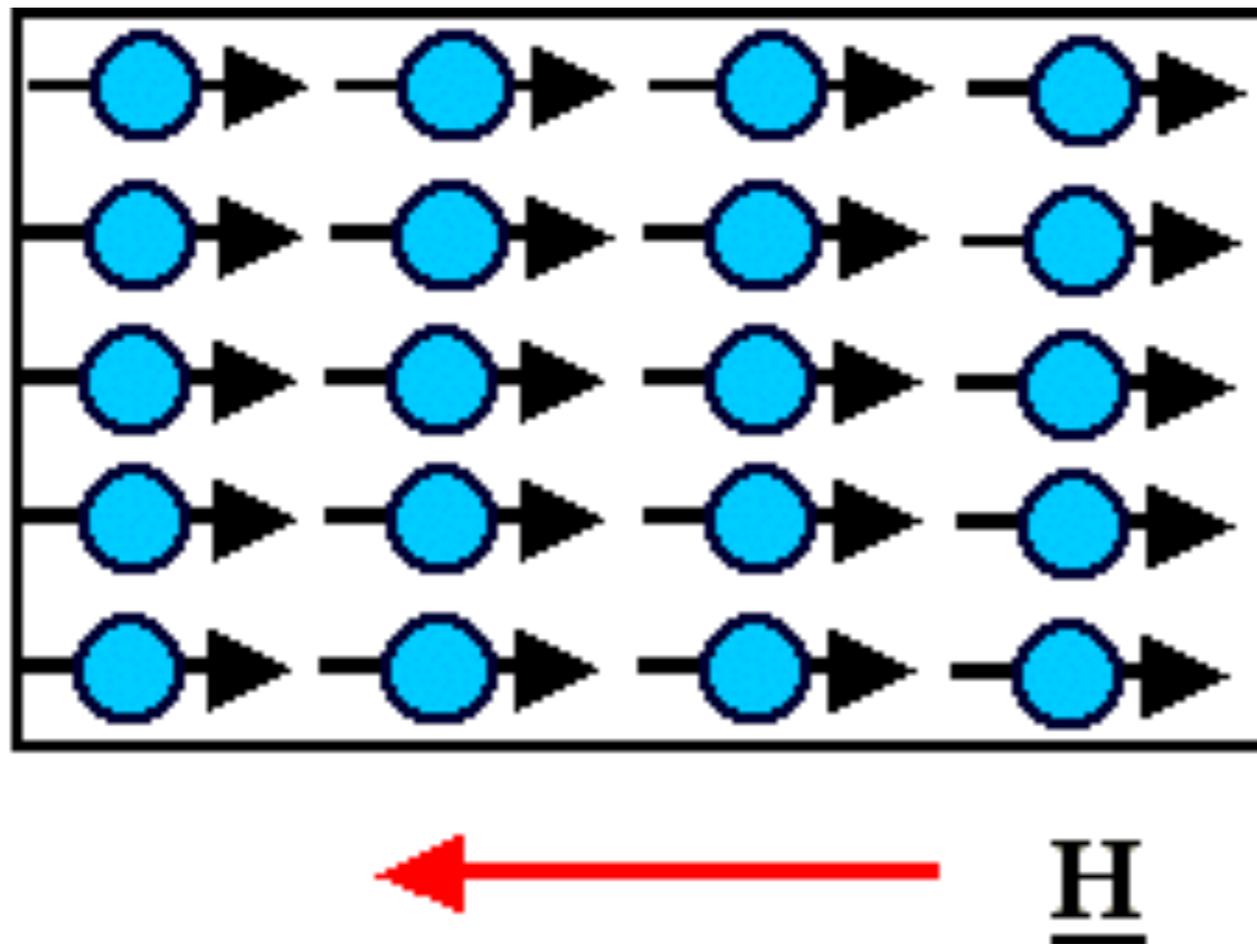
(b) Soft material



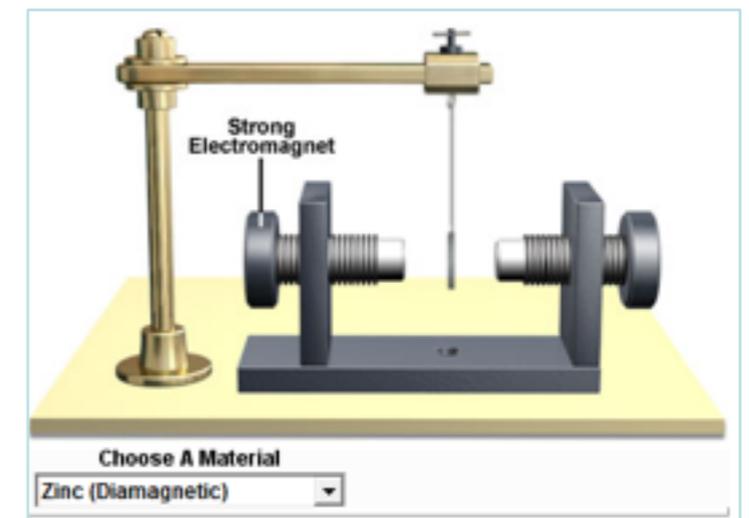
Materiais Diamagnéticos

Características:

- Apresentam susceptibilidade negativa $\approx 10^{-5}$;
- Permeabilidade abaixo de 1, $\mu < 1$;
- Exemplos: gases inertes, metais (cobre, bismuto, ouro, etc.).



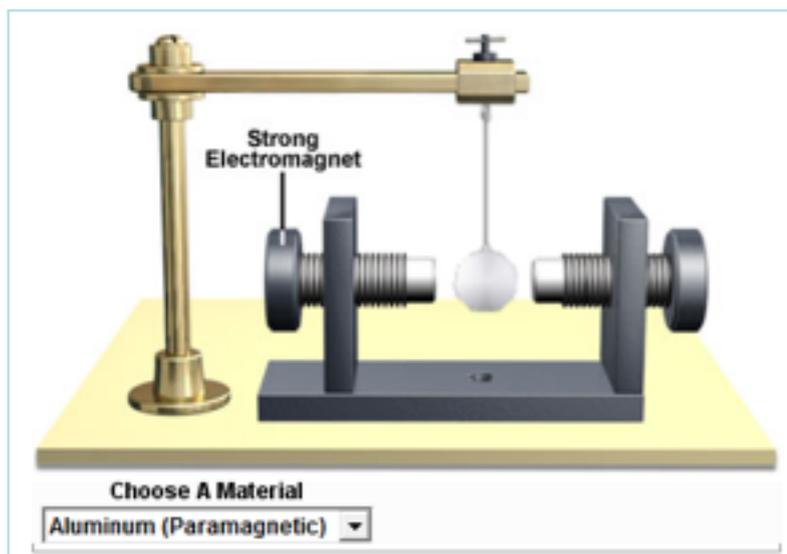
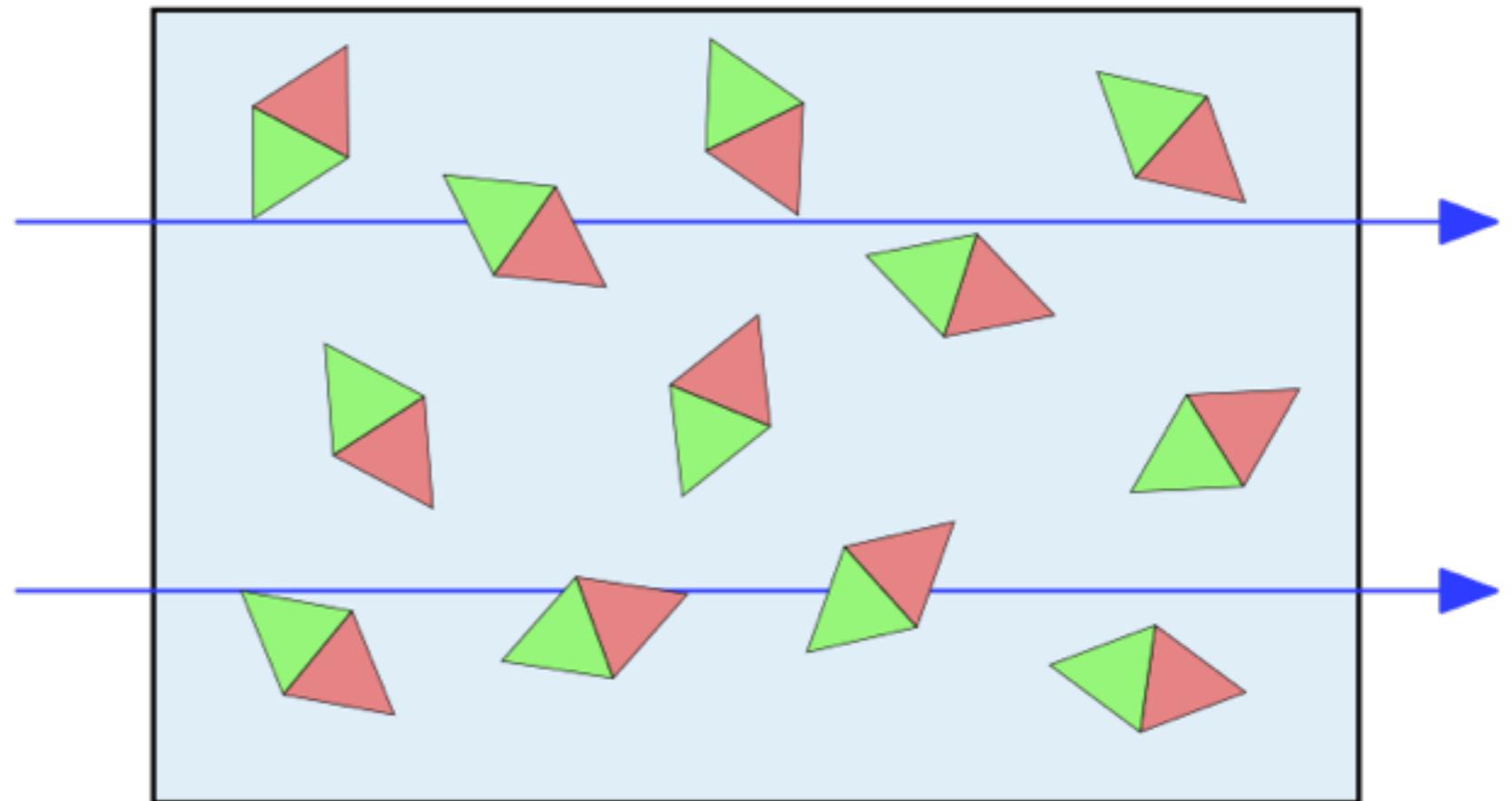
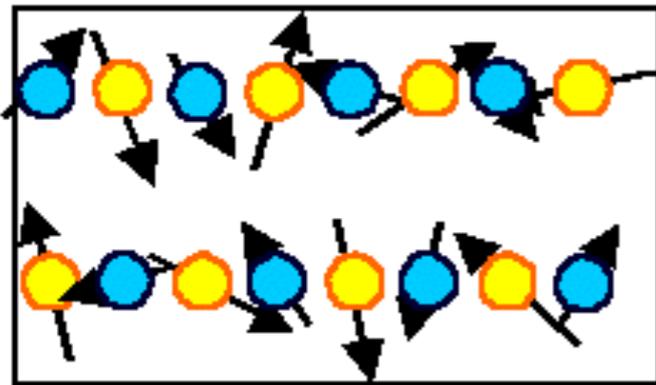
<http://www.magnet.fsu.edu>



Materiais Paramagnéticos

Características:

- Apresentam susceptibilidade positiva $\approx 10^{-5}$ - 10^{-3} ;
- Permeabilidade acima de 1, $\mu > 1$;
- Exemplos: alumínio, platina, sais de: ferro, cobalto, níquel, etc.

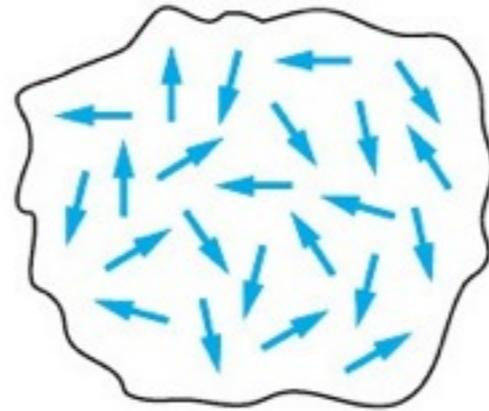


Materiais Ferromagnéticos

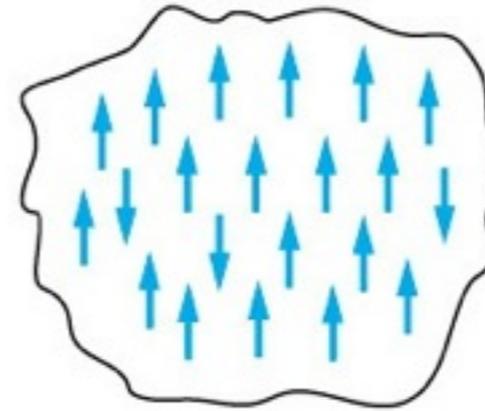
Características:

- Apresentam alta susceptibilidade;
- Permeabilidade muito maior que 1, $\mu \gg 1$;
- Exemplos: ferro, níquel, cobalto, cromo, etc.

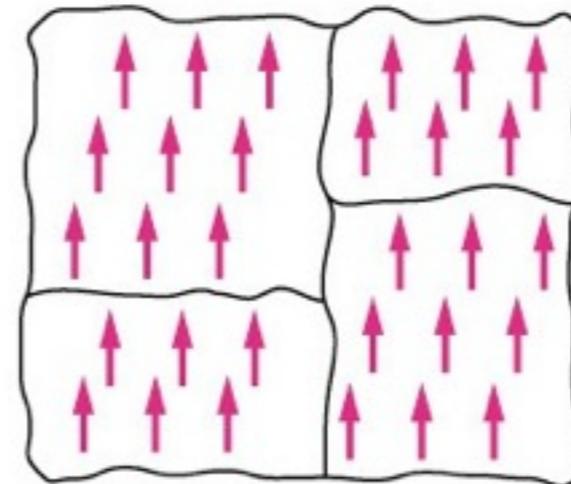
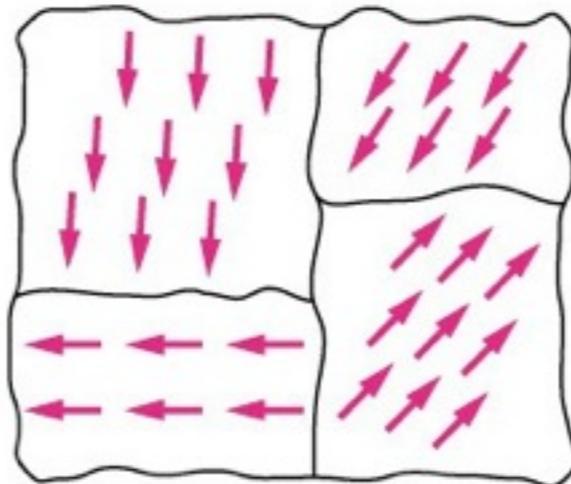
Magnetic field absent



In presence of magnetic field

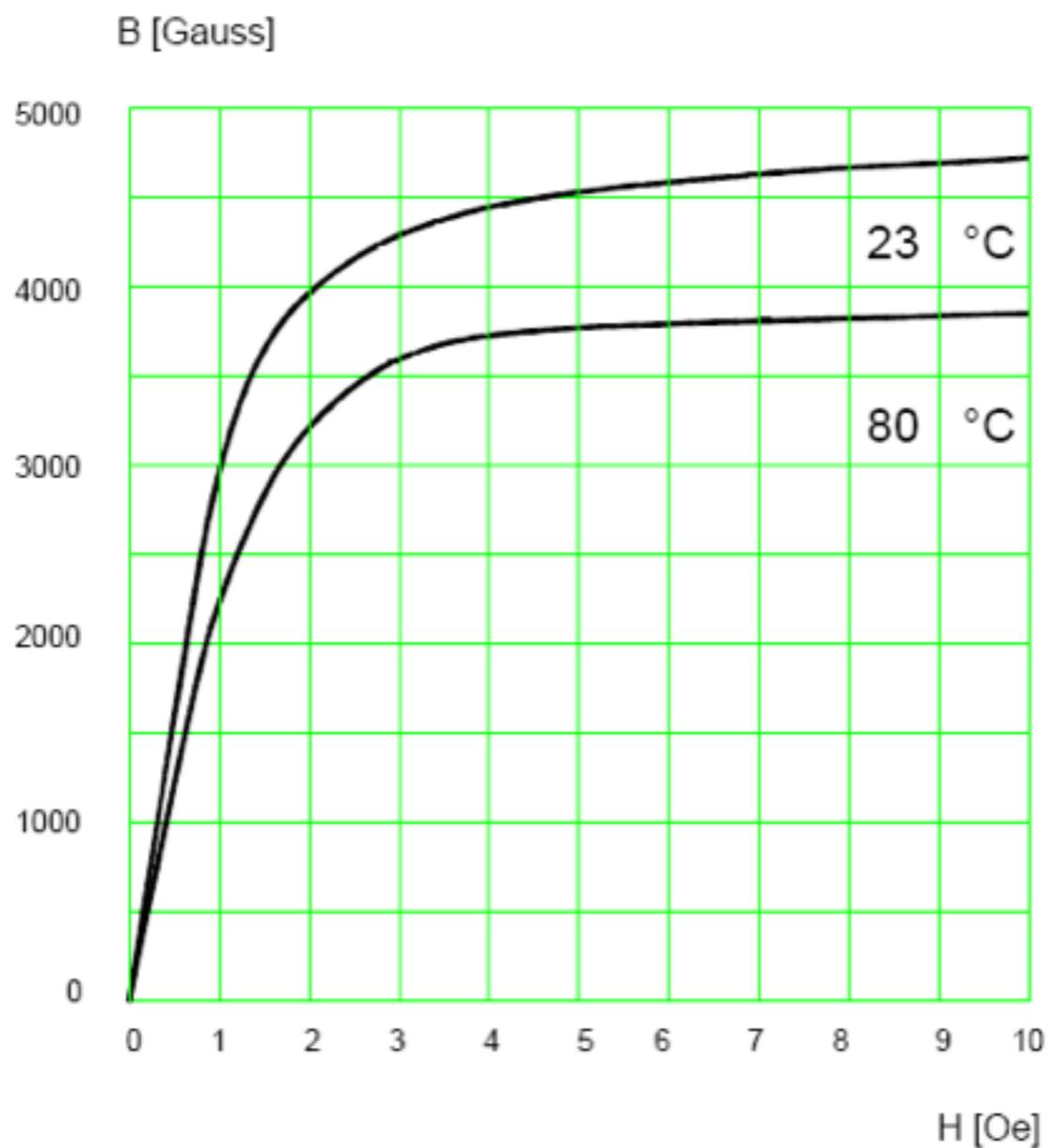


Paramagnetism

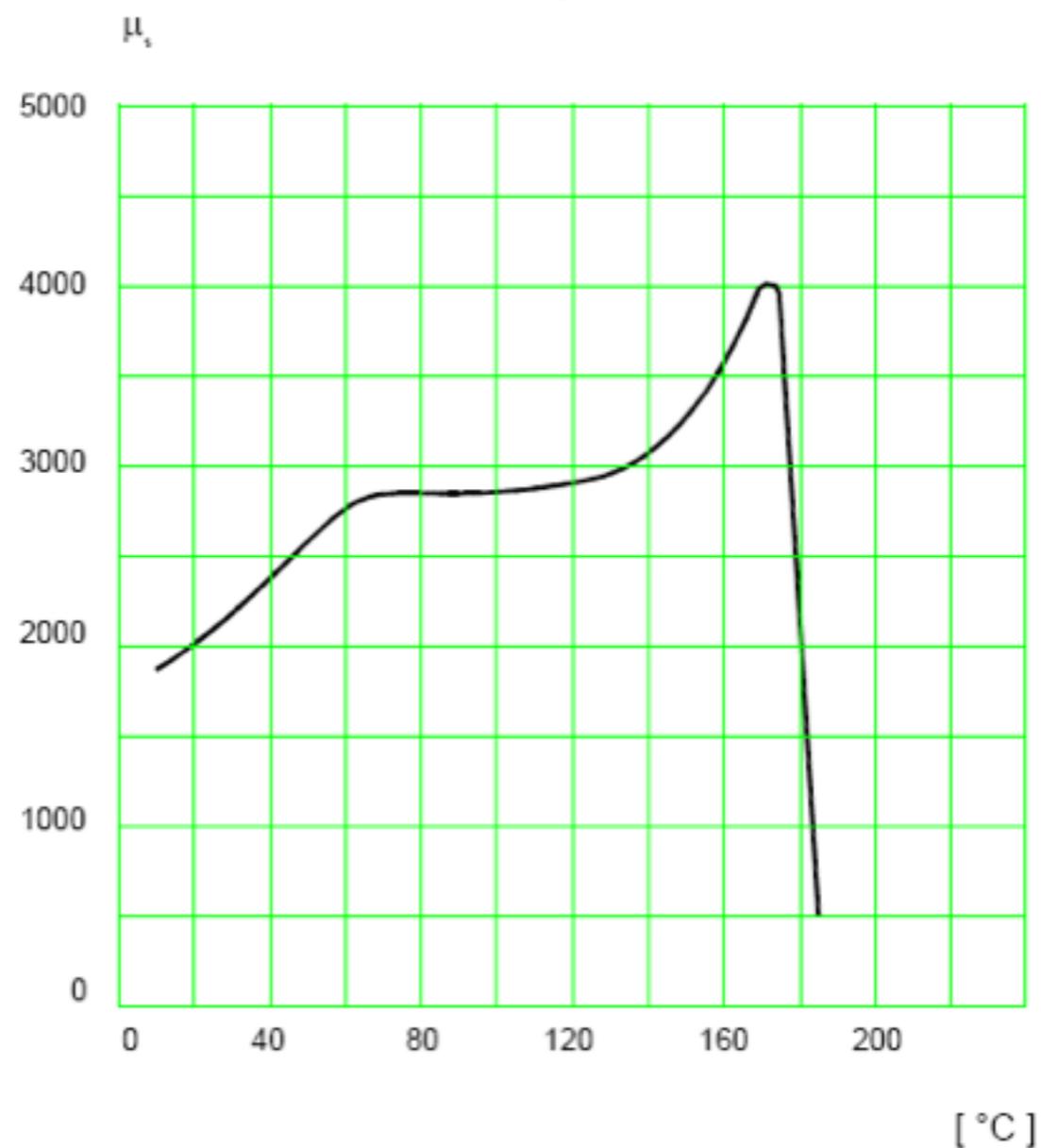


Ferromagnetism

Permeabilidade versus Temperatura



Típico B x H



μ_r x Temperatura

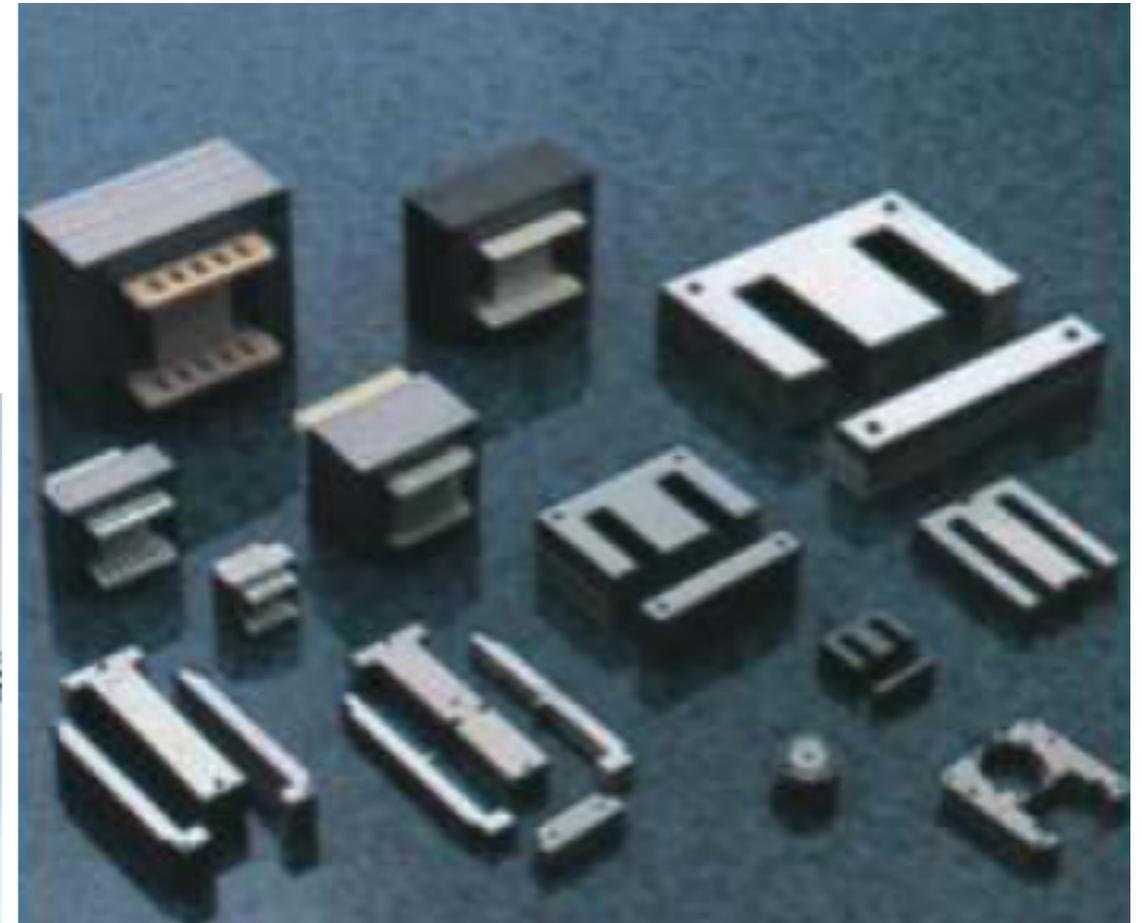
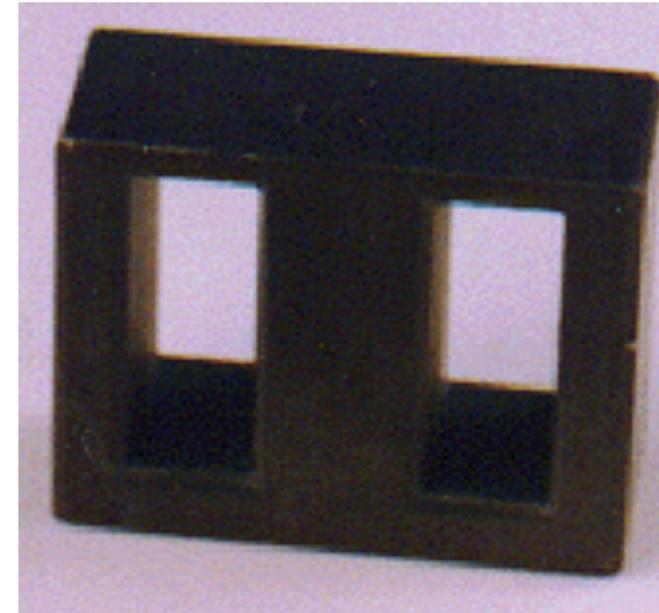
Núcleos Magnéticos

Perdas magnéticas:

- Por correntes de Foucault;
- Perda por histerese.

Perdas dependem de:

- Metalurgia do material;
- Porcentagem de silício;
- Frequência;
- 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

Freios magnéticos:

- Alta resistividade.

Estabilizadores de tensão e acionamentos:

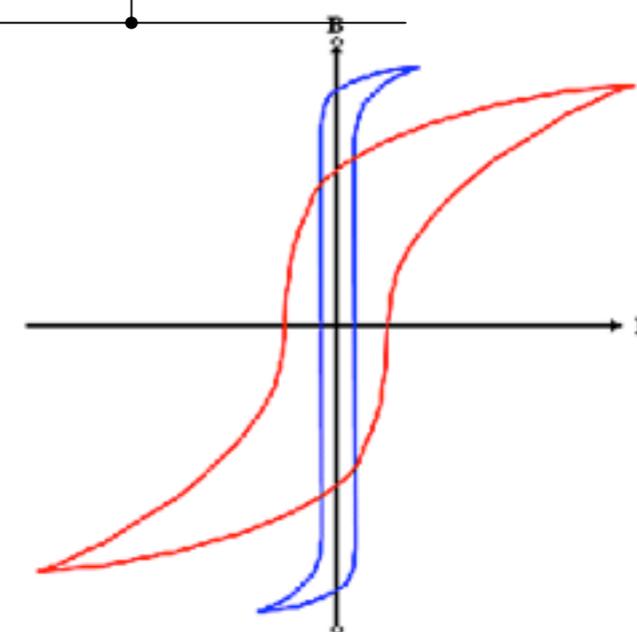
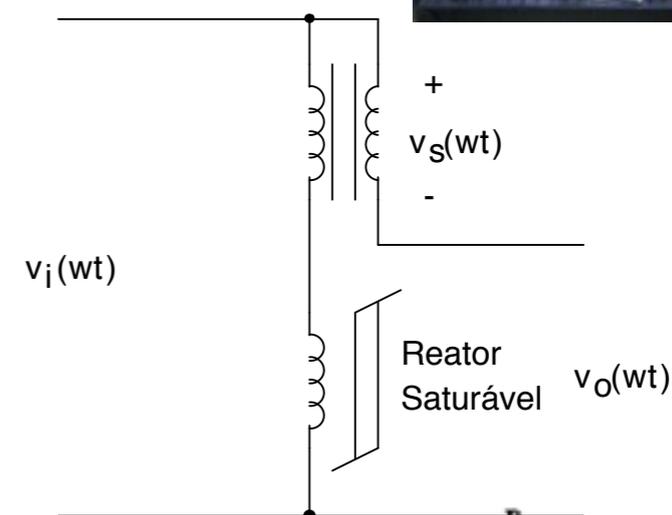
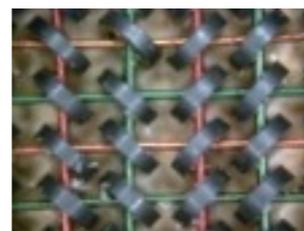
- Operação na saturação.

Memórias:

- Laço de histerese retangular.

Imãs permanentes:

- Elevado magnetismo residual.



Núcleos Magnéticos

Ferro: alta permeabilidade, ciclo histerético estreito e baixa resistividade.

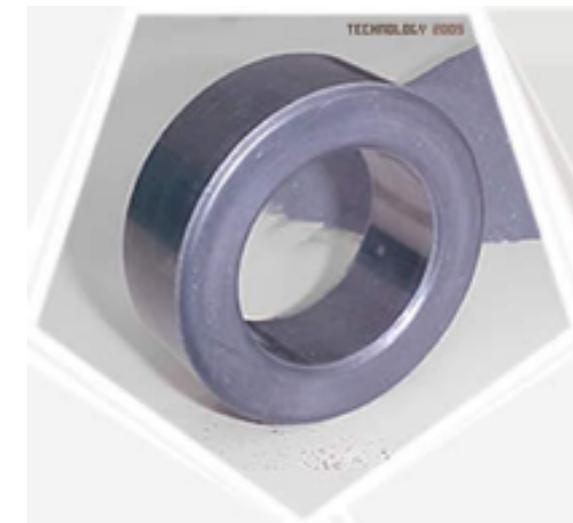
Ligas de ferro-silício: até 6,5% de silício, mas se torna quebradiço. Máquinas estáticas usam mais Si do que máquinas girantes.

Imãs permanentes: devem ter elevado magnetismo residual, por isso usam materiais duros.

Ferrites: sinterização de óxidos metálicos possuindo alta resistividade. Usados em altas frequências devido a alta resistividade.

Ligas ferro-níquel: permalloy (78,5% de Ni) tem alta permeabilidade, baixas perdas por histerese e força magnetizante fraca.
Deltamax - orthonic (48% de Ni) tem alta permeabilidade e laço de histerese retangular na direção da laminação.

Núcleos Magnéticos

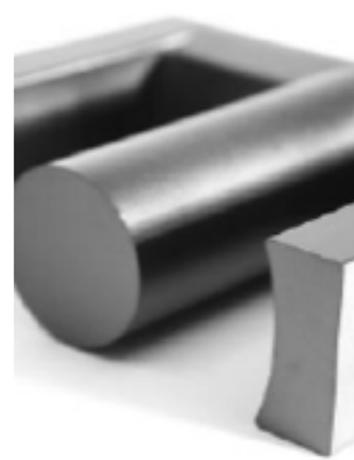
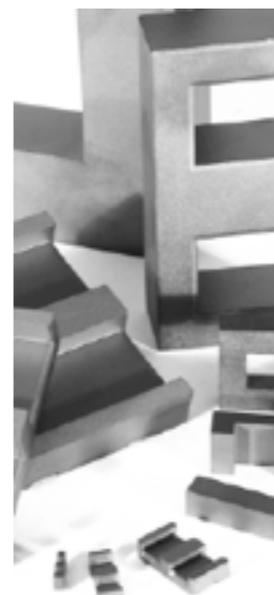
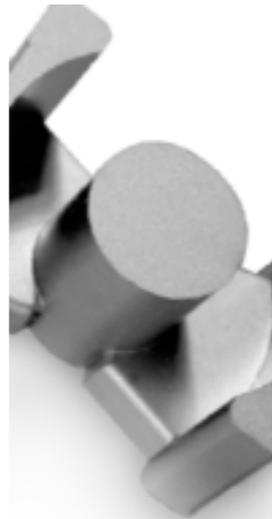


Núcleos Magnéticos

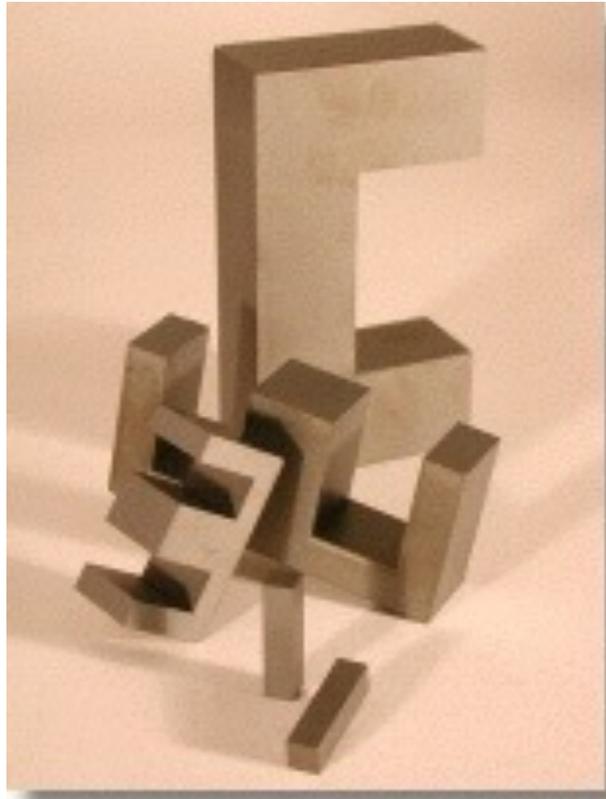


TABLE 1: FERRITE CORE COMPARATIVE GEOMETRY CONSIDERATIONS

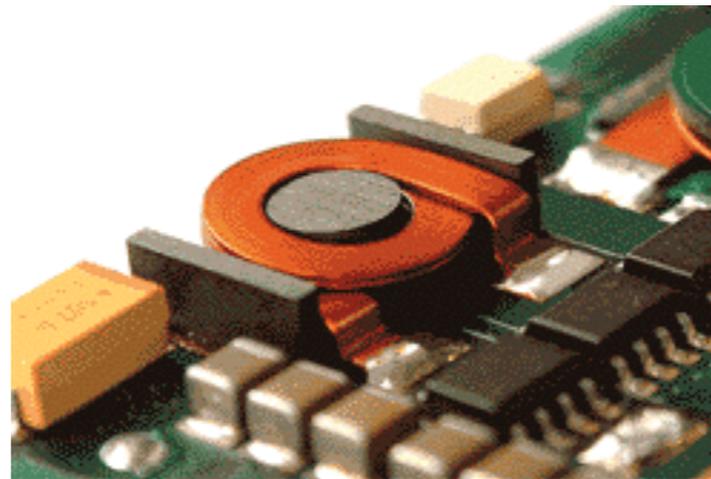
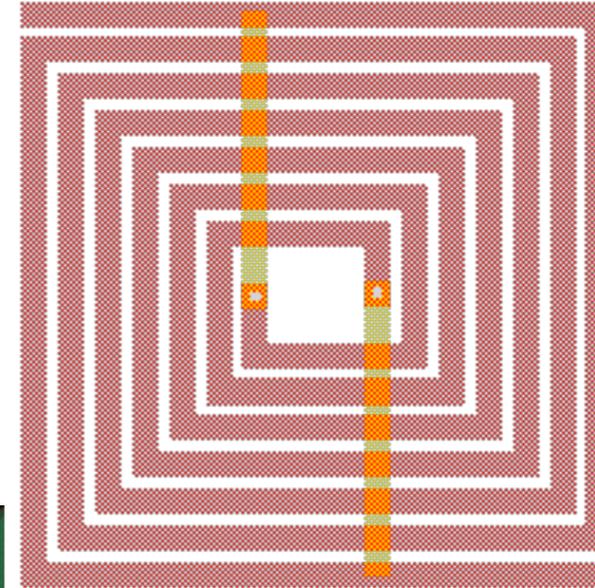
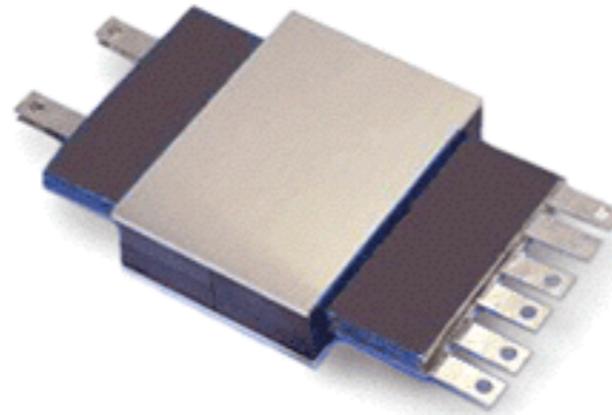
	POT CORES	DOUBLE SLAB, RM CORES	EP CORES	PQ CORES	E CORES	E _C , ETD, EER, ER CORES	TOROIDS
See Catalog Section	6	7-8	9	10	11	12	13
Core Cost	High	High	Medium	High	Low	Medium	Very Low
Bobbin Cost	Low	Low	High	High	Low	Medium	None
Winding Cost	Low	Low	Low	Low	Low	Low	High
Winding Flexibility	Good	Good	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



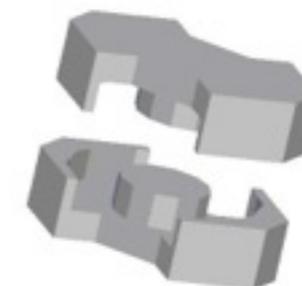
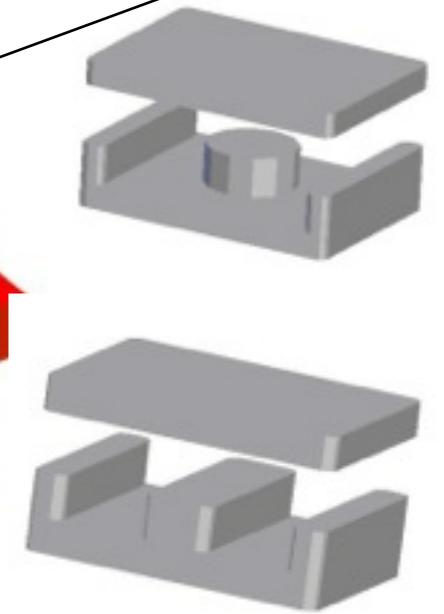
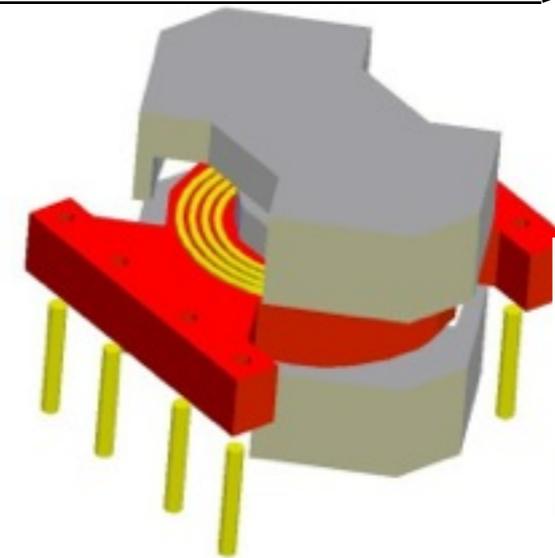
Núcleos Magnéticos



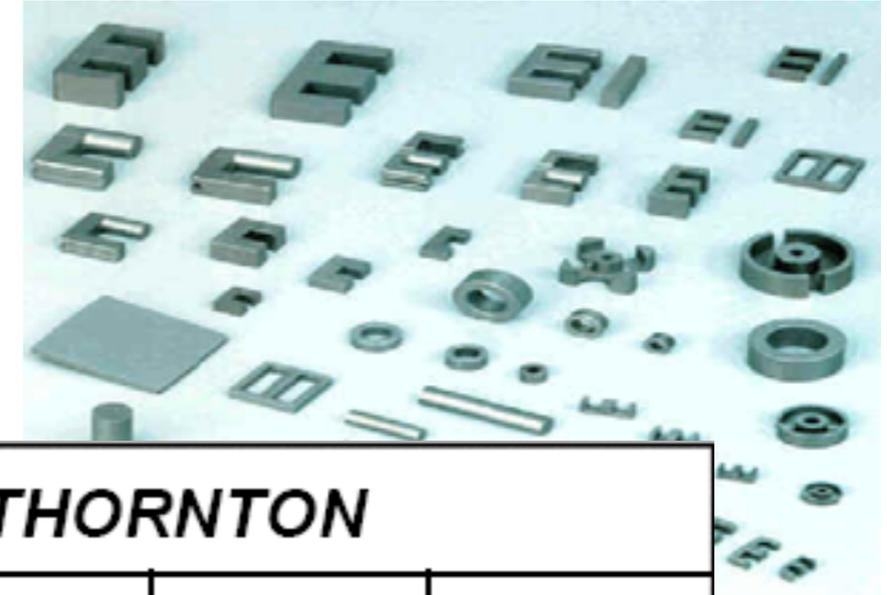
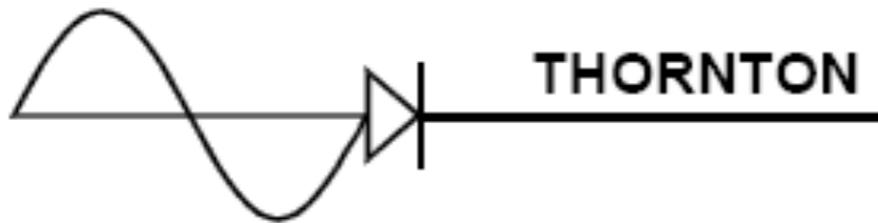
Núcleos planares



A
B



Núcleos Magnéticos



CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS THORNTON			
Material	IP 6	IP 12R	IP12E
Permeabilidade Inicial μ_i	2000 \pm 25%	2100 \pm 25%	2300 \pm 25%
Fator de Dissipação (Rel.) $f = 10$ [KHz]	-----	-----	-----
$\tan \delta / \mu_i \cdot 10^{-6}$ $f = 100$ [KHz]	-----	-----	-----
Temperatura de Curie [°C]	≥ 165	≥ 210	≥ 210
Coercividade [A/m]	18.0	18.0	18.0
Densidade de Fluxo (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

Lei Circuital de Ampère

O somatório das forças em um caminho fechado é nulo:

$$\sum V = 0$$

Lei de Kirchhoff das tensões

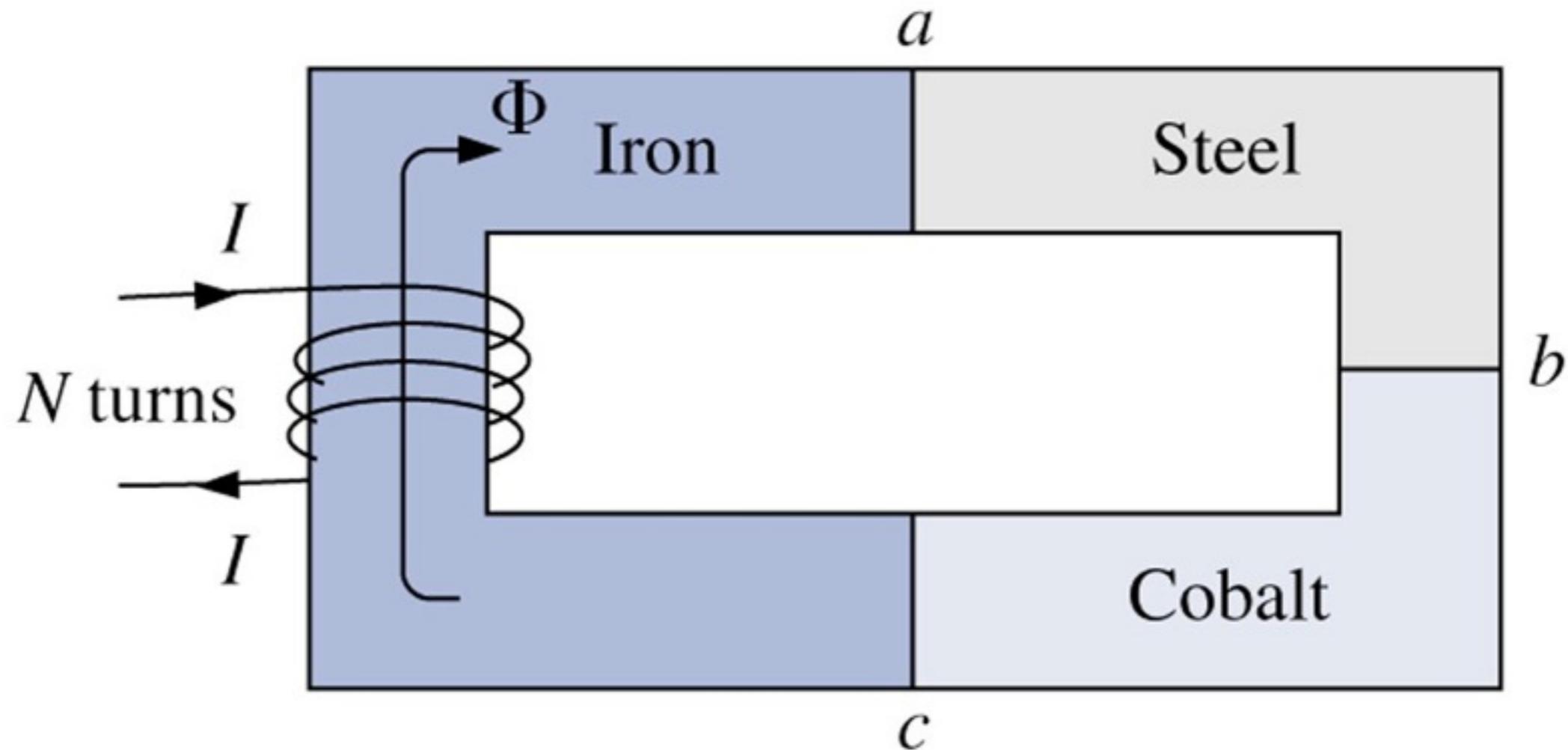


Lei circuital de Ampère

$$\sum \mathcal{S} = 0$$

Ação de	Circuitos elétricos	Circuitos magnéticos
Causa	E	F
Efeito	I	Φ
Oposição	R	R

Lei Circuital de Ampère



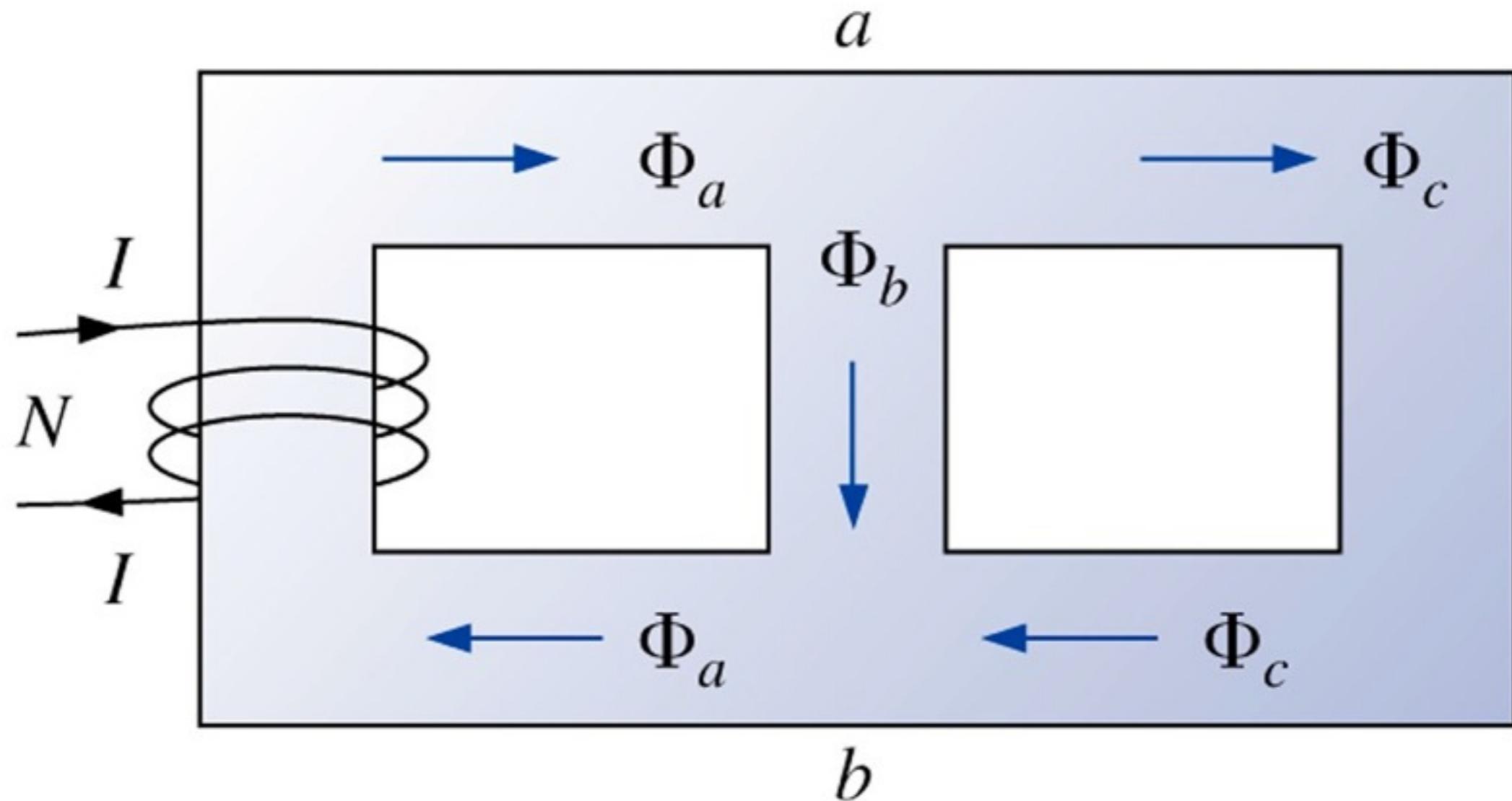
$$\sum \mathcal{S} = 0 \quad N \cdot I - H_{ab} \cdot l_{ab} - H_{bc} \cdot l_{bc} - H_{ca} \cdot l_{ca} = 0$$

$$N \cdot I = H_{ab} \cdot l_{ab} + H_{bc} \cdot l_{bc} + H_{ca} \cdot l_{ca}$$

Fmm aplicada

Queda de fmm

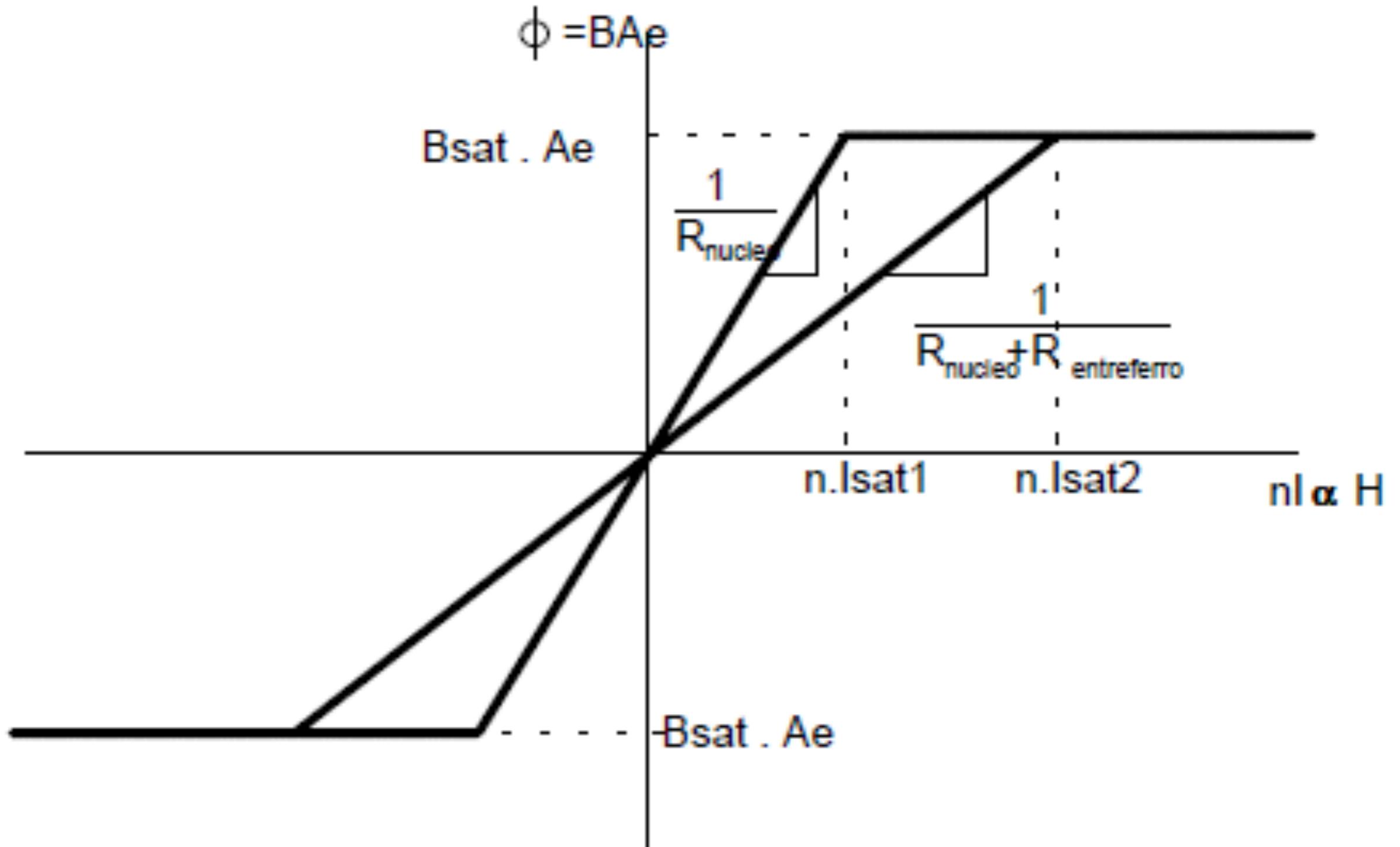
Lei Circuital de Ampère



$$\Phi_a = \Phi_b + \Phi_c \quad (\text{na junção a})$$

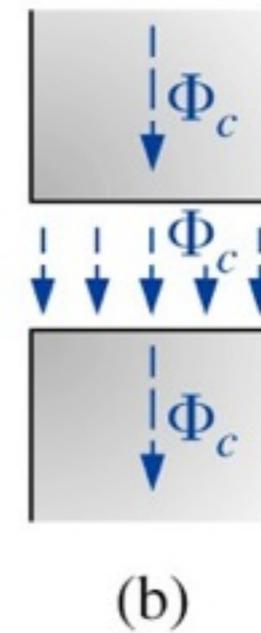
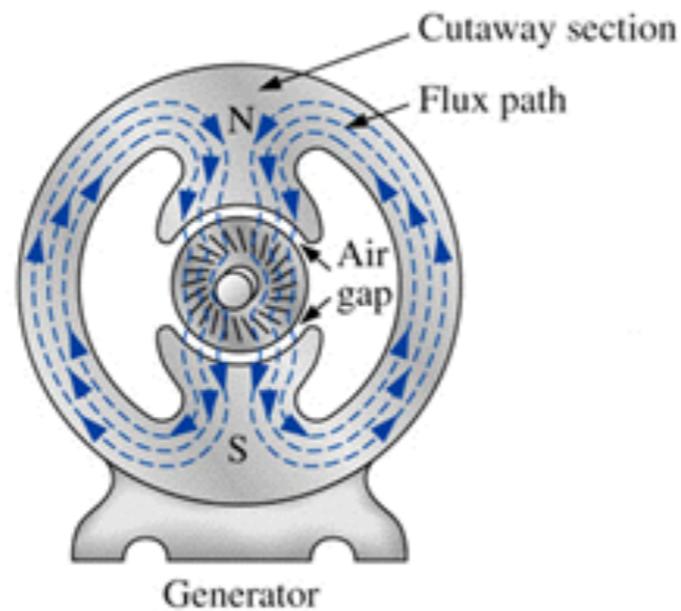
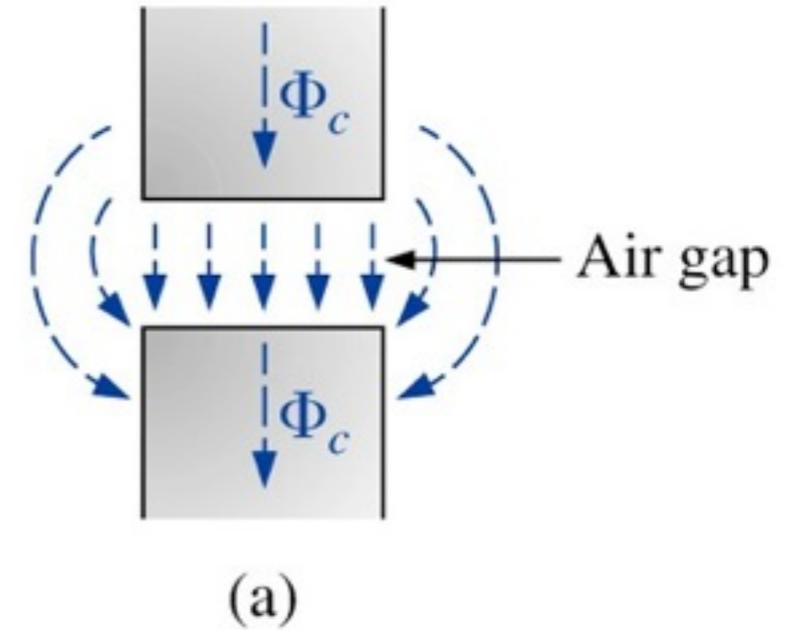
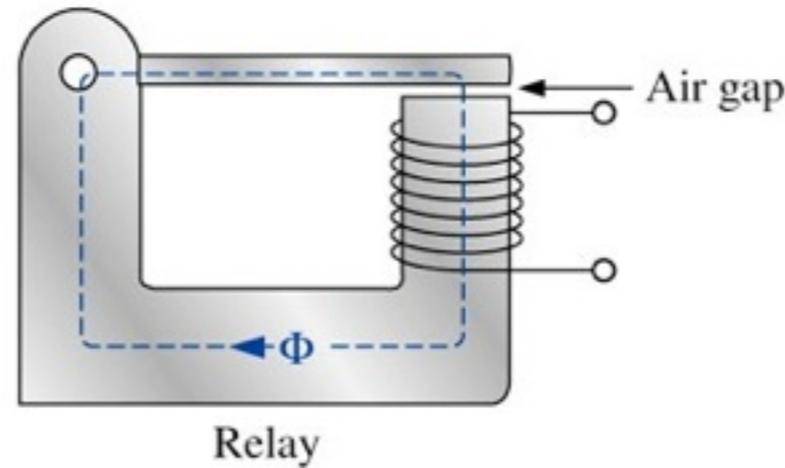
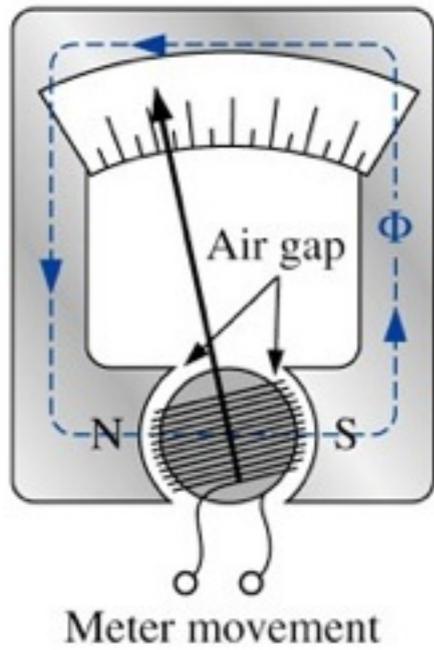
$$\Phi_b + \Phi_c = \Phi_a \quad (\text{na junção b})$$

Entreferros



Entreferros

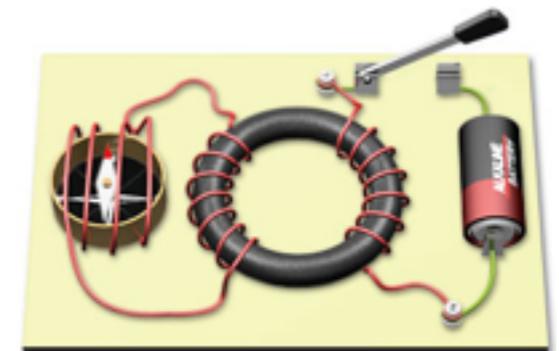
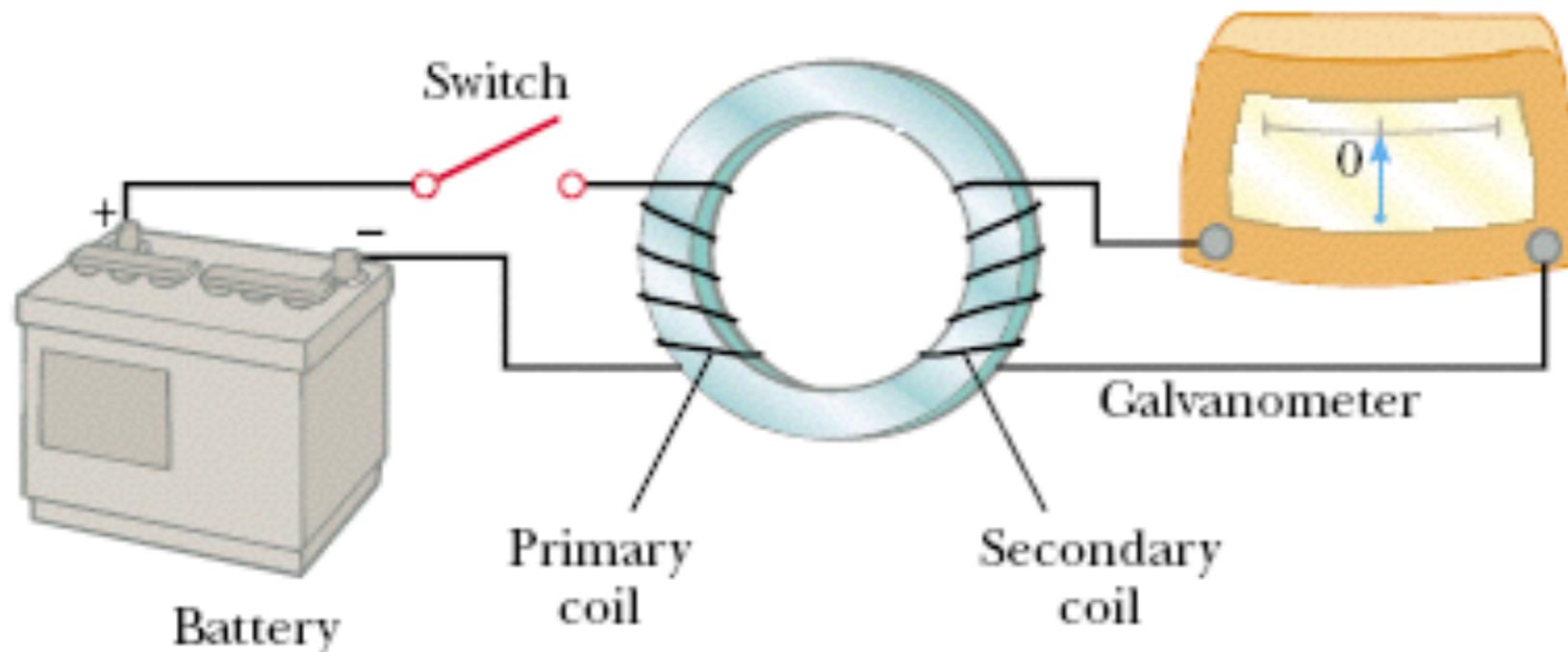
Espaço sem núcleo nos circuitos magnéticos:



Indução Eletromagnética

Experiência de Faraday:

- No momento que a chave é fechada, o galvanômetro acusa uma pequena corrente de curta duração;
- Após a corrente cessar e durante tempo em que a chave permanecer fechada, o galvanômetro não mais acusa corrente;
- Ao abrir-se a chave, o galvanômetro volta a indicar uma corrente de curta duração, em sentido oposto ao observado no momento de fechamento da chave.

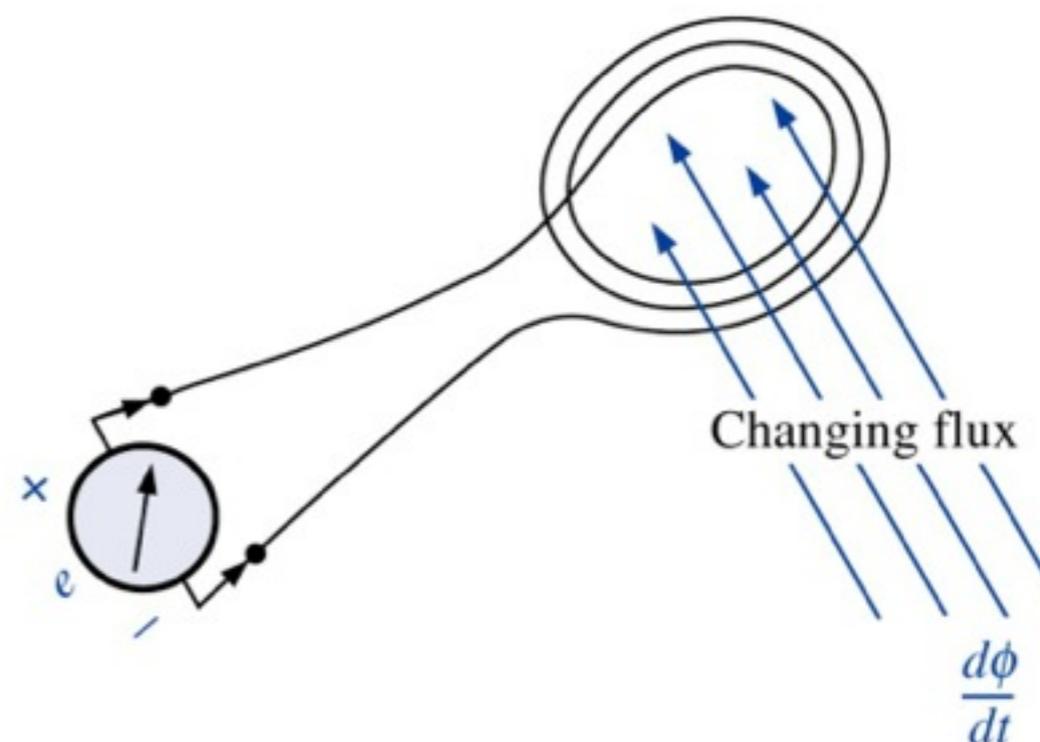
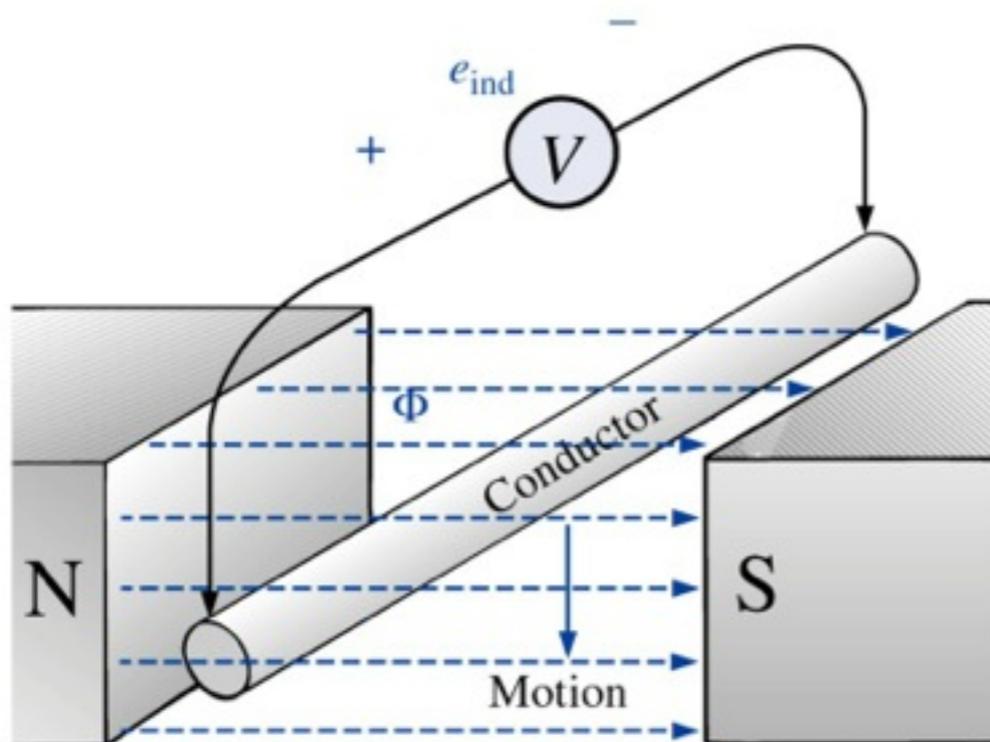


<http://micro.magnet.fsu.edu>

Indução Eletromagnética

A indução eletromagnética é regida por duas leis:

- Lei de Faraday;
- Lei de Lenz.

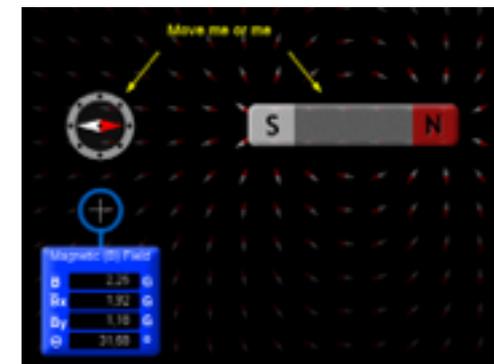
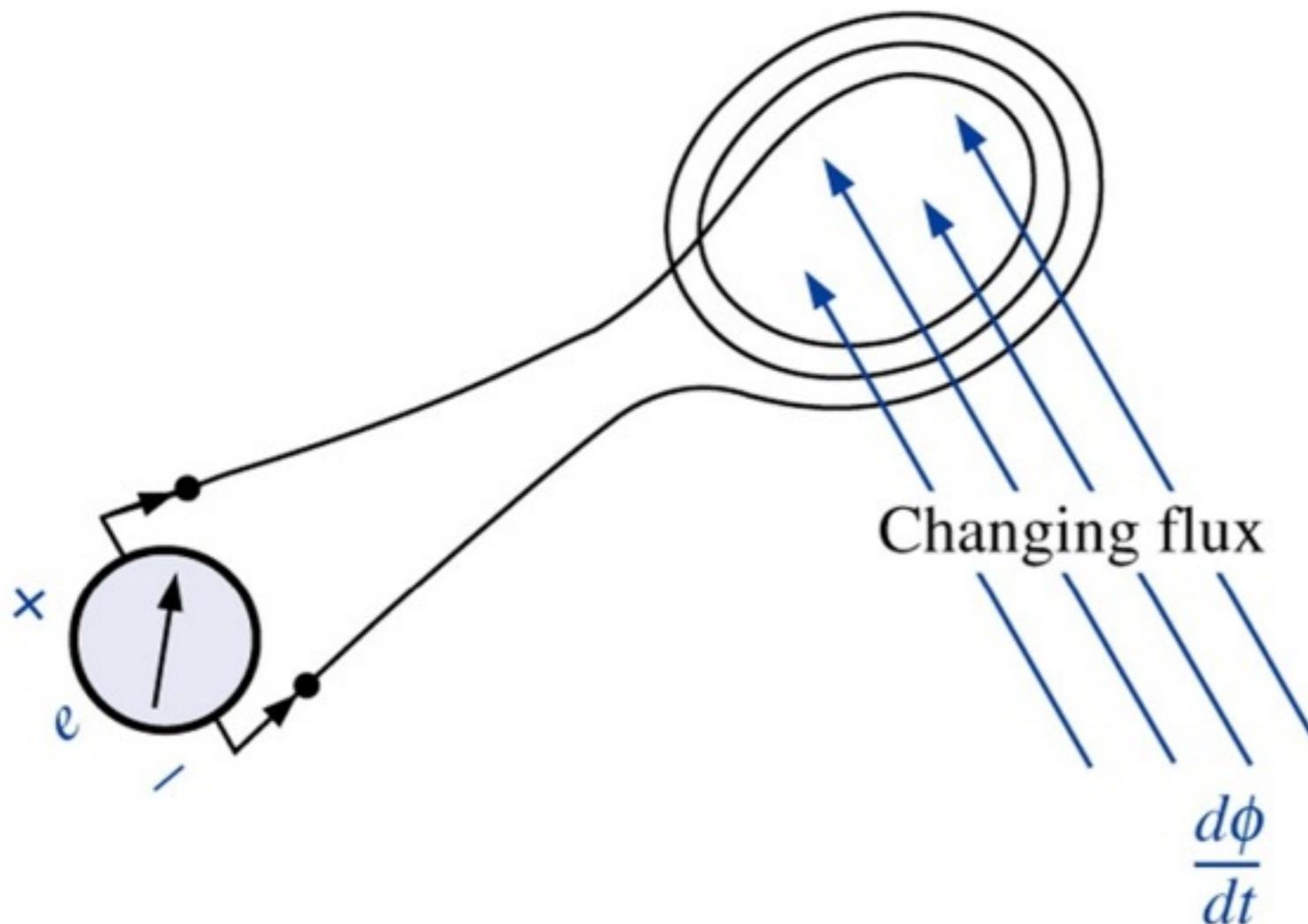


Indução Eletromagnética

Lei da indução eletromagnética de Faraday:

Em todo condutor enquanto sujeito a uma variação de fluxo magnético é estabelecida uma força eletromotriz (tensão) induzida.

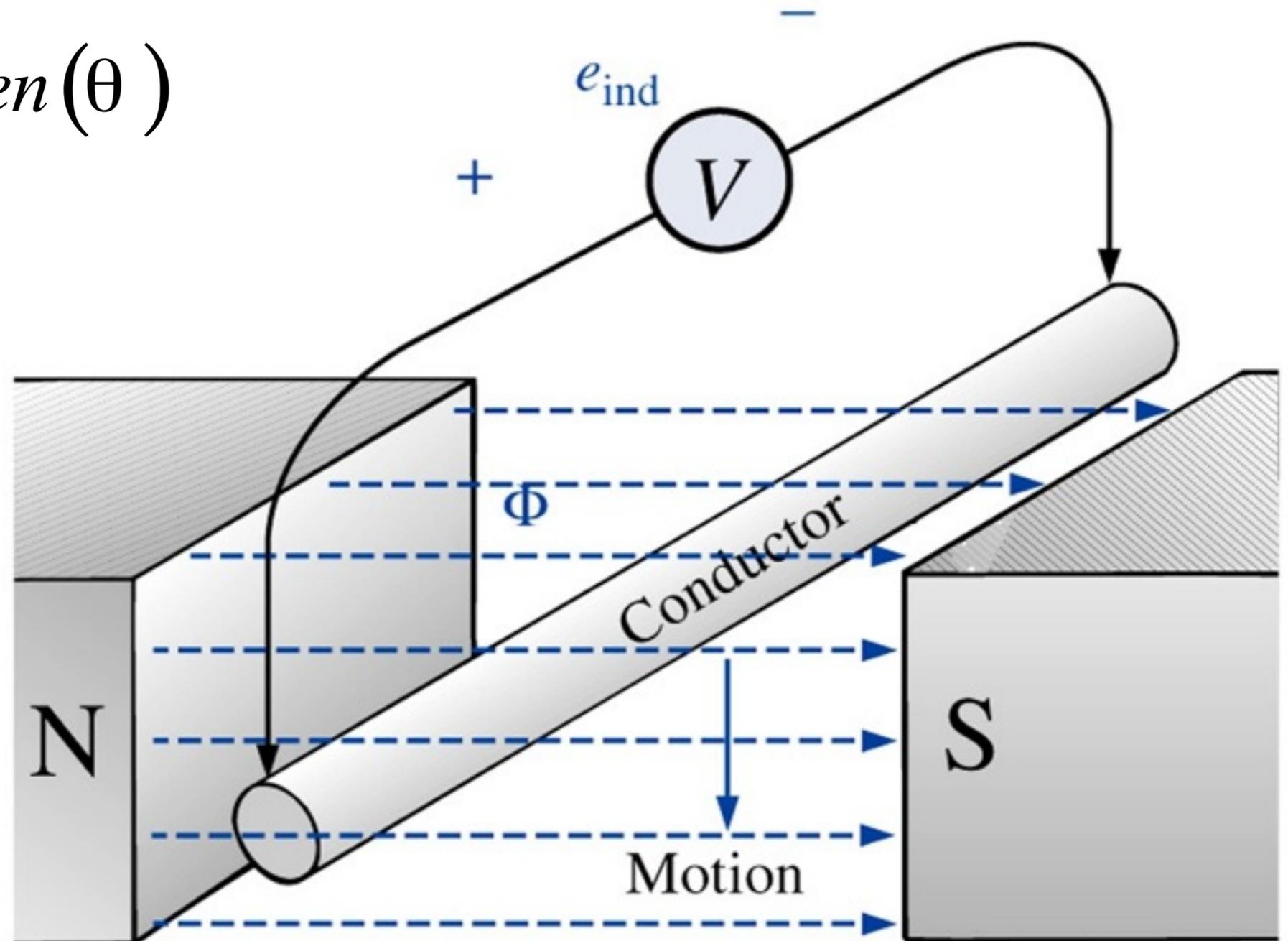
$$\varepsilon = N \frac{d\phi}{dt} \quad [\text{volts, V}]$$



Tensão Induzida

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$$\phi = B \cdot A \cdot \text{sen}(\theta)$$



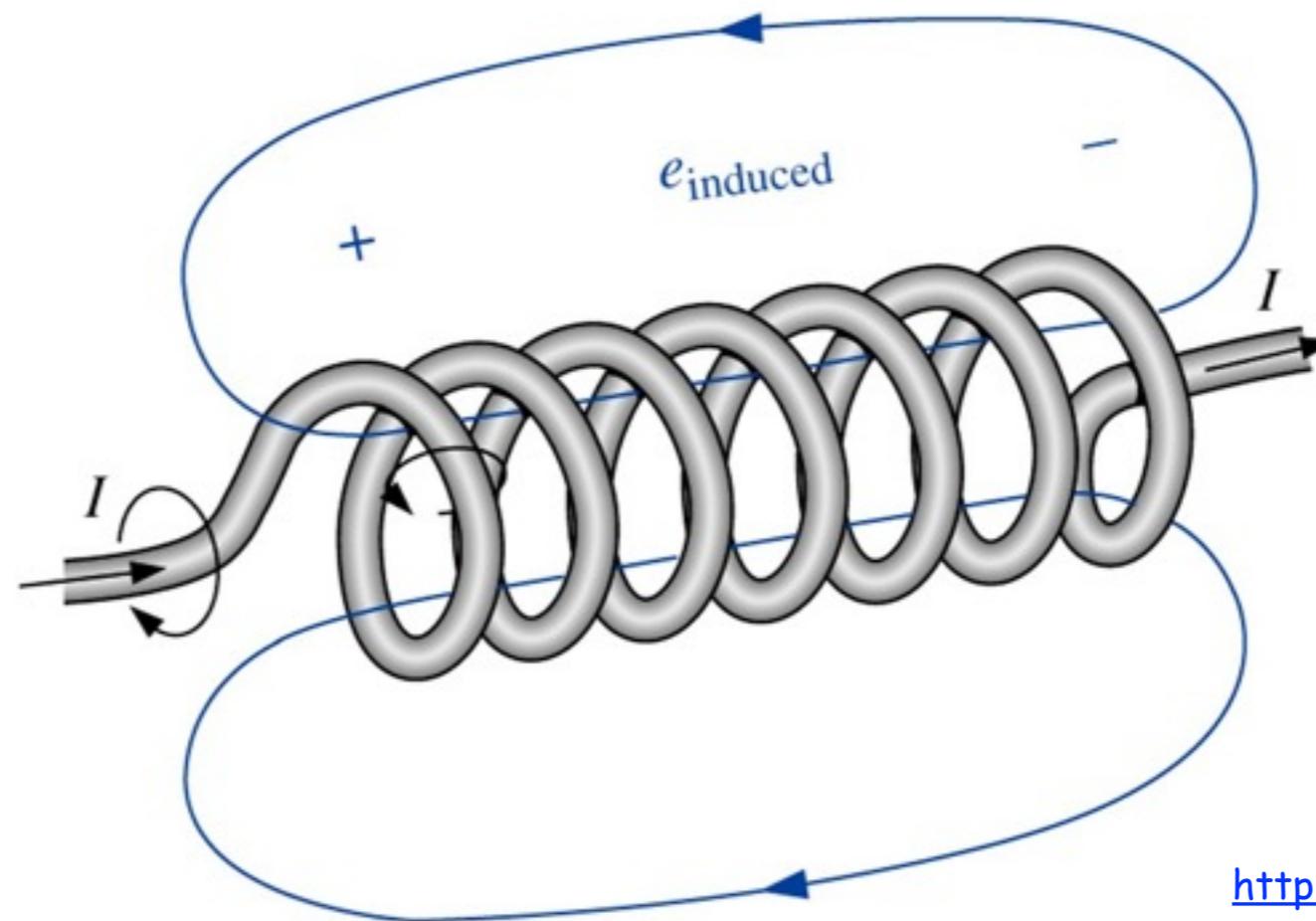
Lei de Lenz

Lei de Lenz:

O sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor.

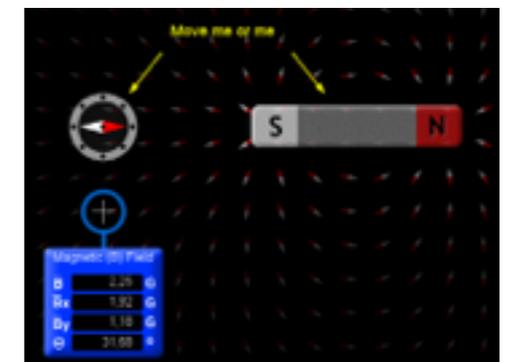
↓

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$$



<http://phet.colorado.edu>

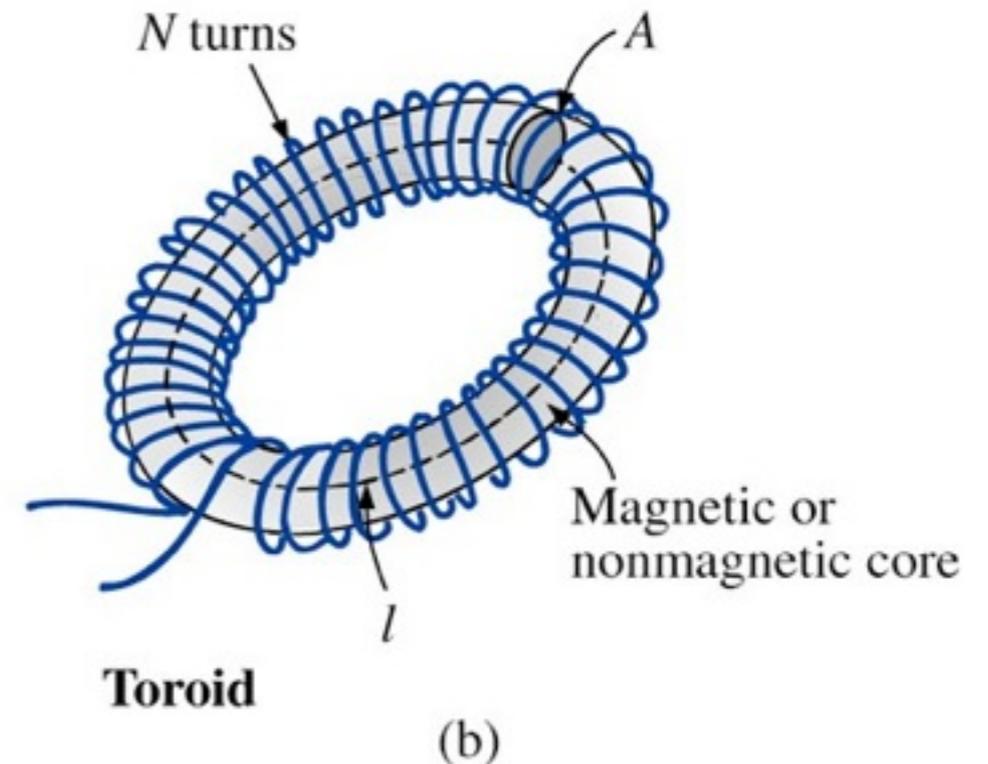
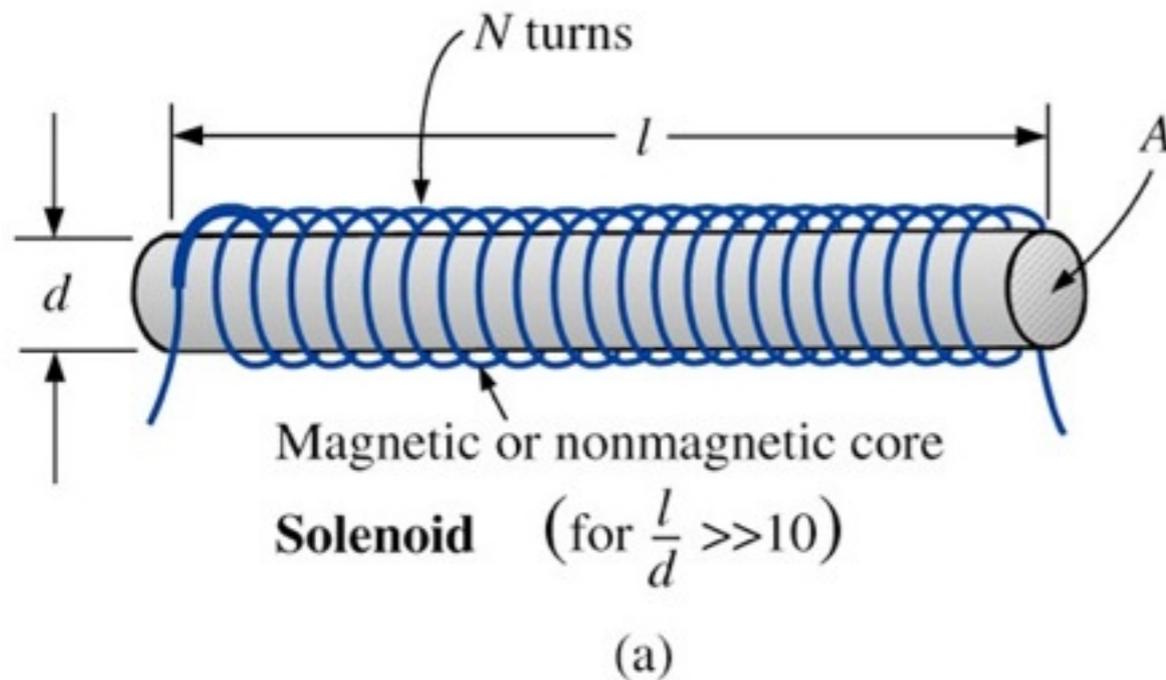
Um efeito induzido ocorre sempre de forma a se opor à causa que o produziu.



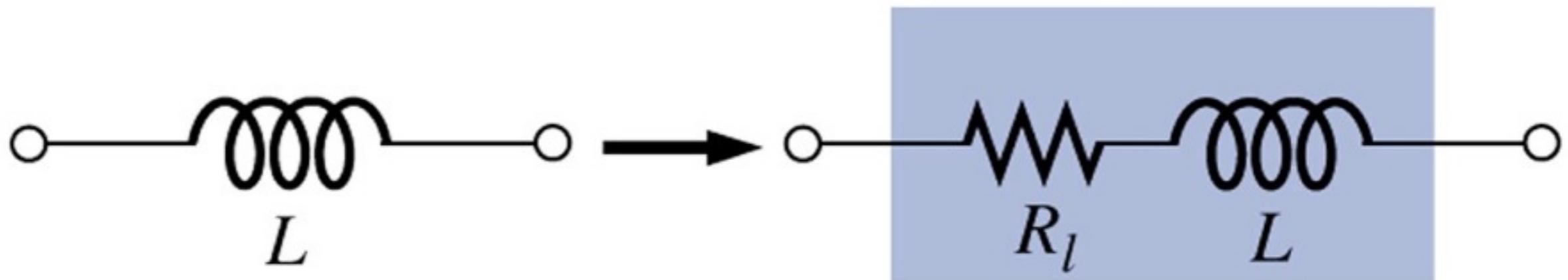
Auto-Indutância

A propriedade de uma bobina de se opor a qualquer variação de corrente é medida pela sua auto-indutância (L). A unidade de medida é o Henry (H).

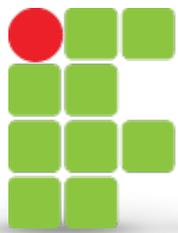
$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l}$$



Circuito Equivalente de Um Indutor

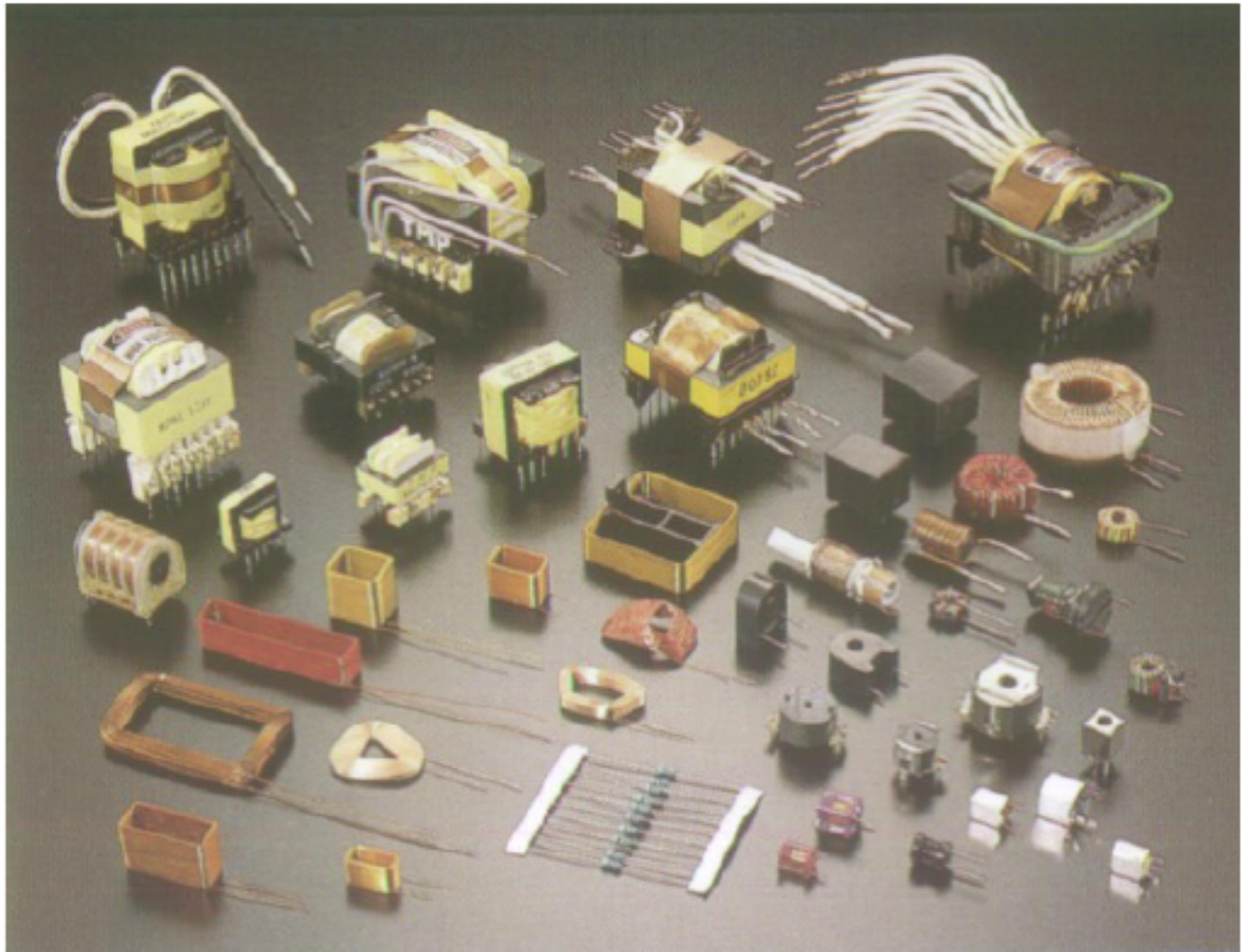


Circuito equivalente prático de um indutor



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Indutores na Prática



Tensão Induzida

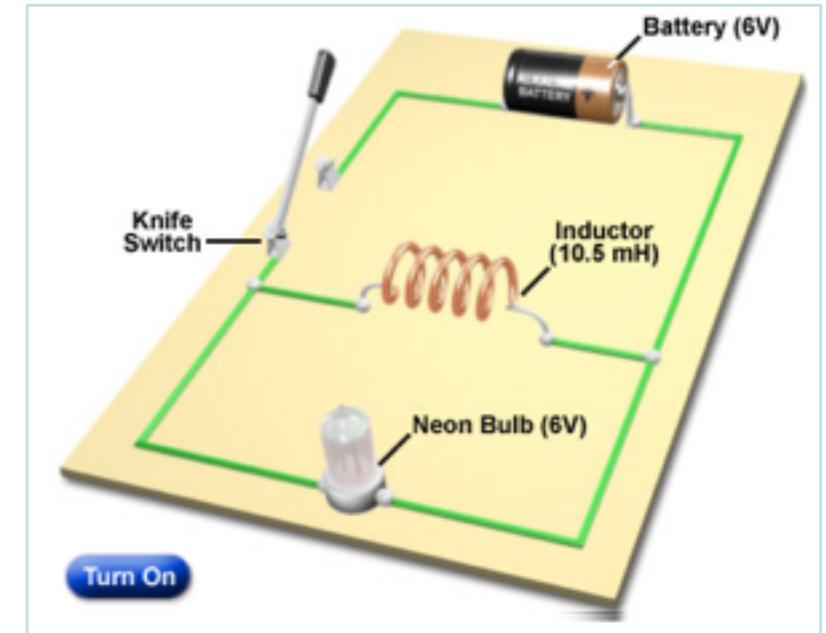
Indutância de um indutor e tensão induzida:

$$L = N \frac{d\phi}{di}$$

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$v_L(t) = N \frac{d\phi}{dt} = \left(N \frac{d\phi}{di} \right) \left(\frac{di}{dt} \right)$$

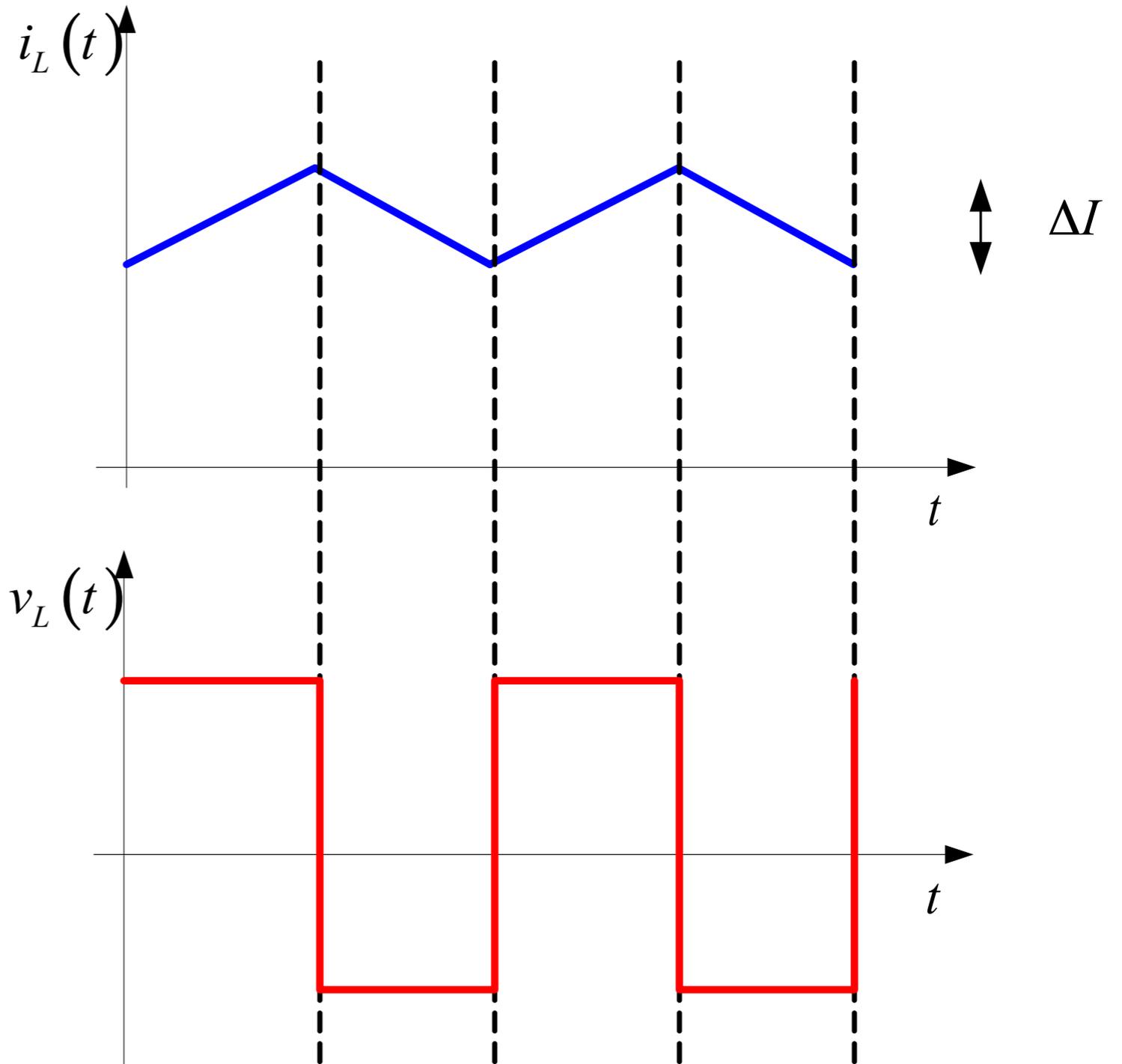
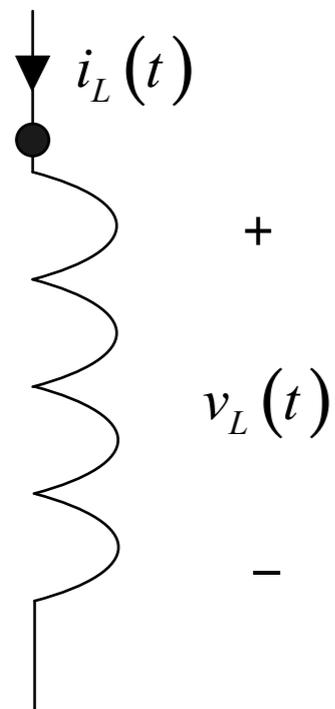
$$v_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$



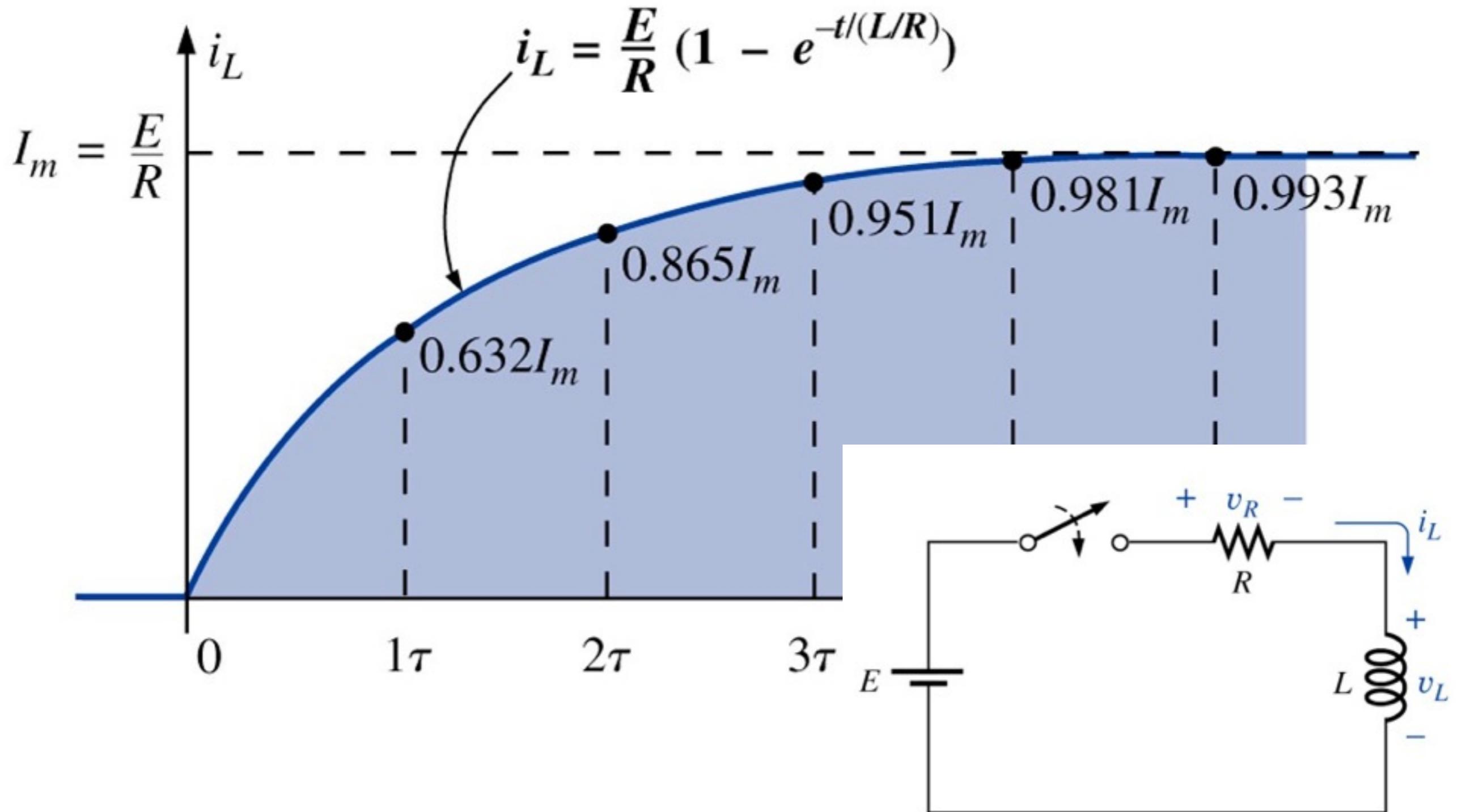
Tensão Induzida

Considerando variações lineares:

$$v_{Lmed} = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$



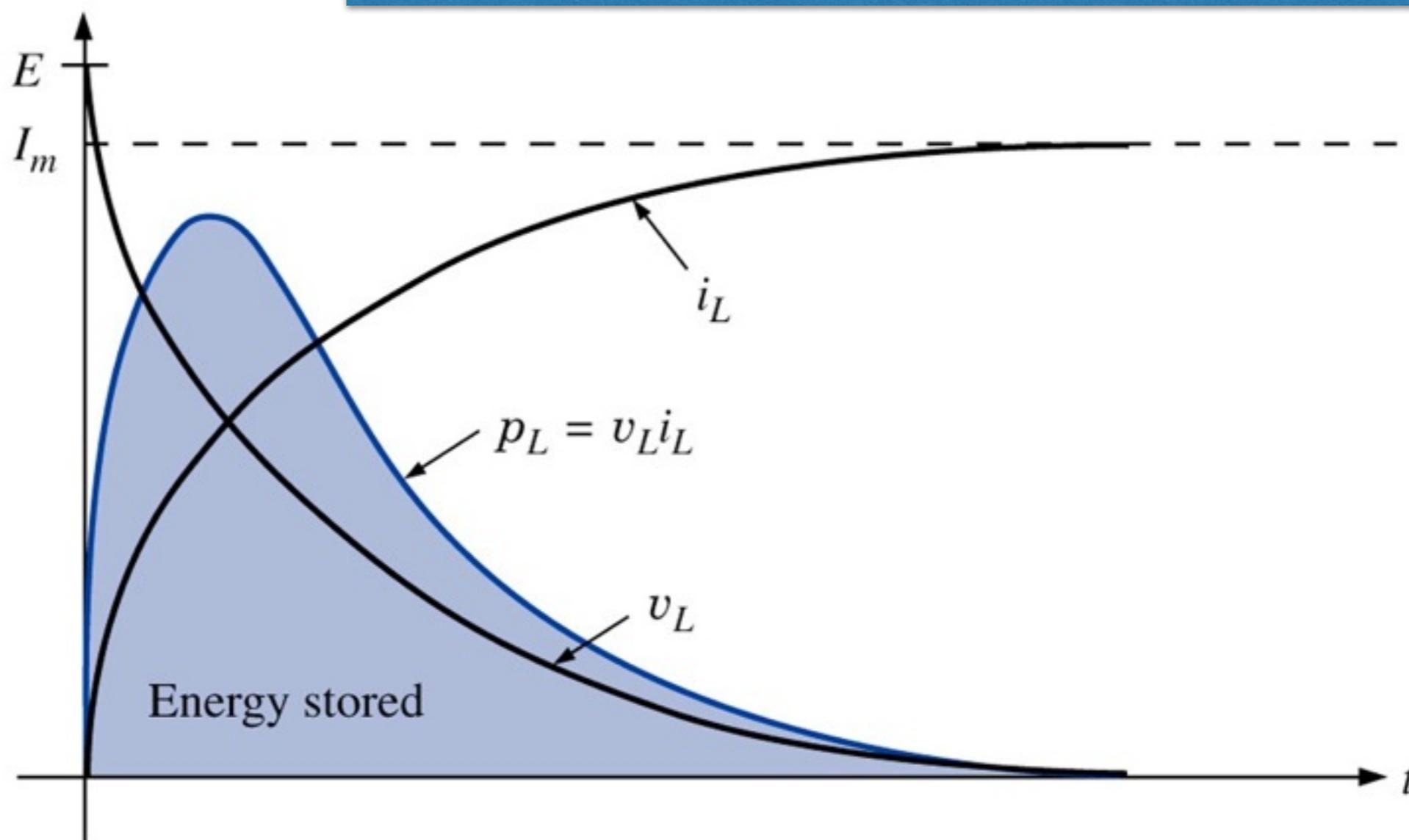
Transientes em Circuitos RL



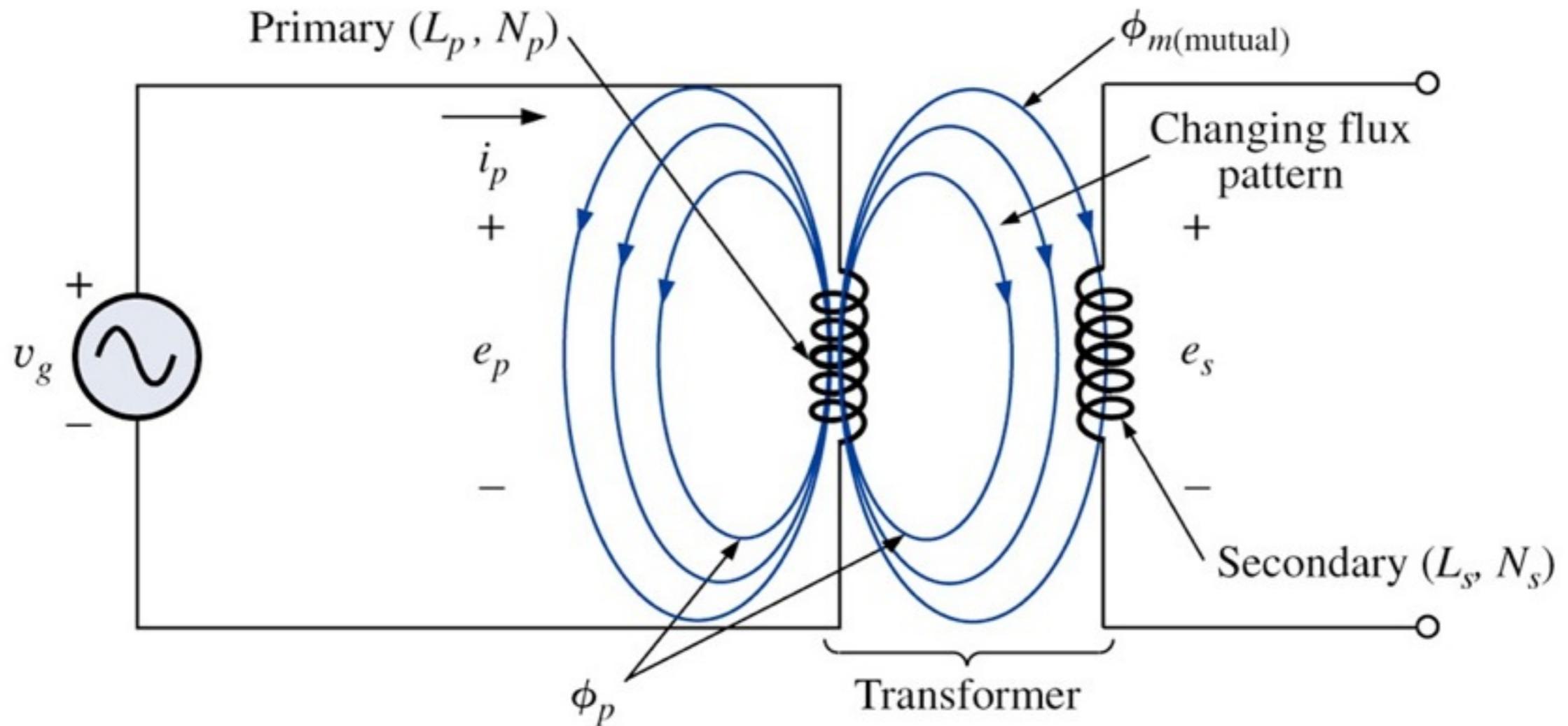
Transientes em Circuitos RL

$$W_{armazenada} = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

Curva de potência de um indutor durante o transitório de carga.



Indutância Mútua - Fluxo Mútuo



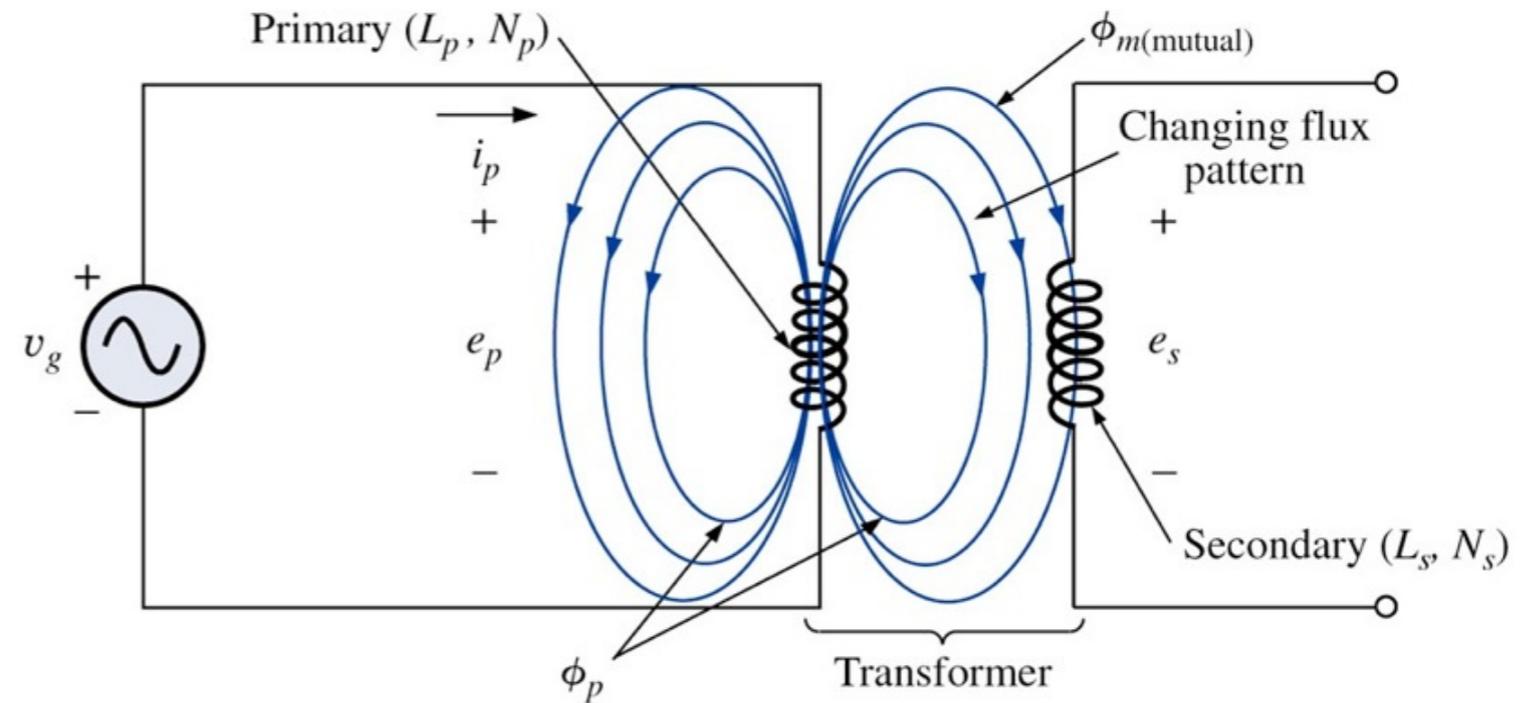
O enrolamento no qual a fonte é aplicada é denominado primário, e o enrolamento no qual a carga é conectada é chamado de secundário.

Indutância Mútua - Fluxo Mútuo

No primário:

$$e_p = N_p \frac{d\phi_p}{dt}$$

$$e_p = L_p \frac{di_p}{dt}$$



No secundário:

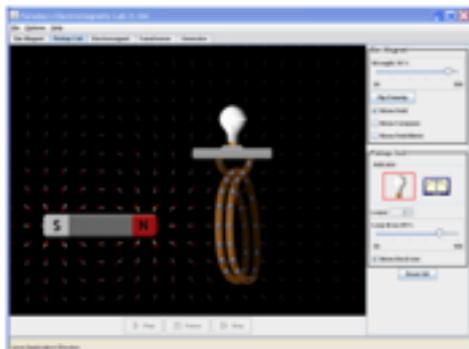
$$e_s = N_s \frac{d\phi_s}{dt}$$

$$e_s = L_s \frac{di_s}{dt}$$

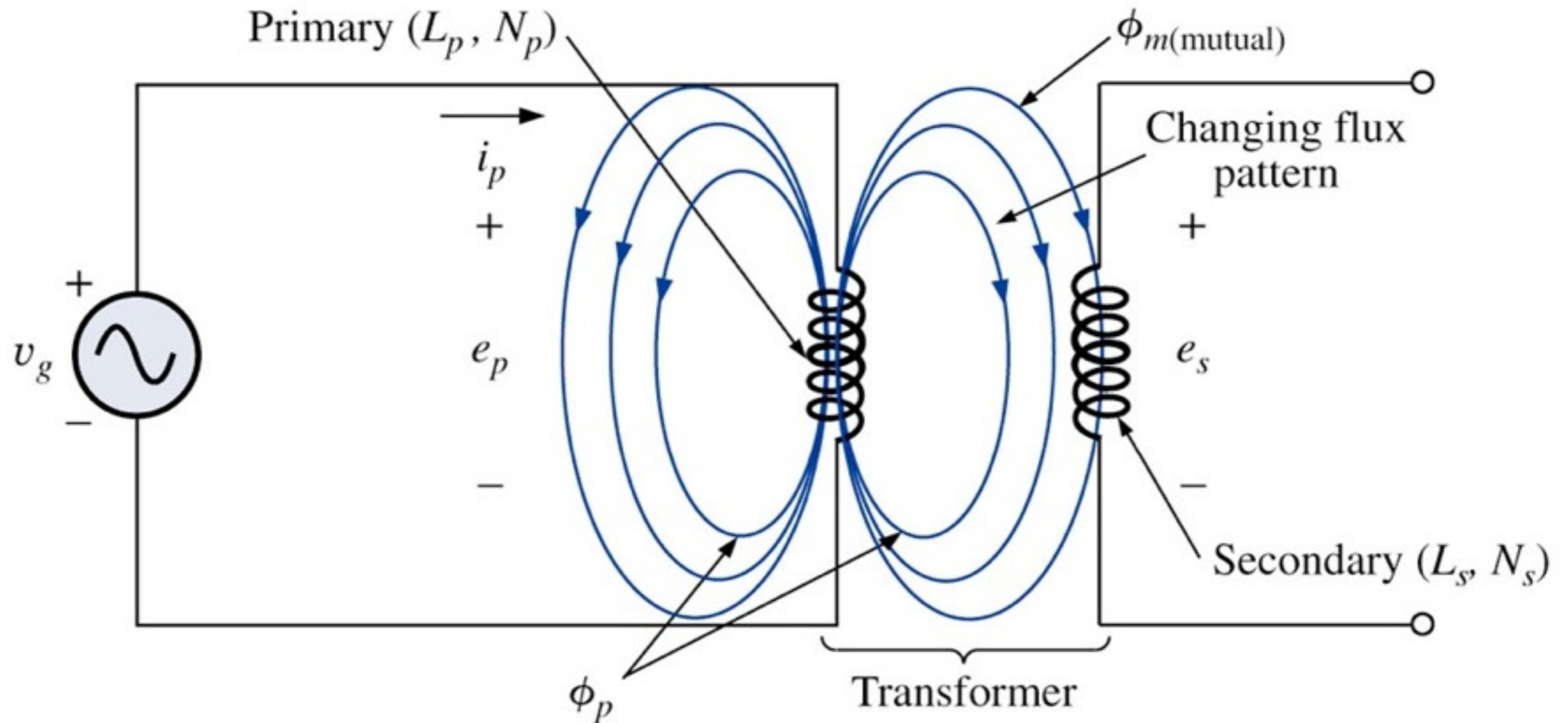
O fluxo se mantém:

$$\phi_m = \phi_s$$

$$e_s = N_s \frac{d\phi_p}{dt}$$



Acoplamento Magnético



$$k = \frac{\phi_m}{\phi_p}$$

O maior valor possível para k (coeficiente de acoplamento) é 1.

Transformador com Núcleo de Ferro

Entrada em corrente senoidal:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot I_p \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$\phi_m = \Phi_m \cdot \text{sen}(\omega t)$$

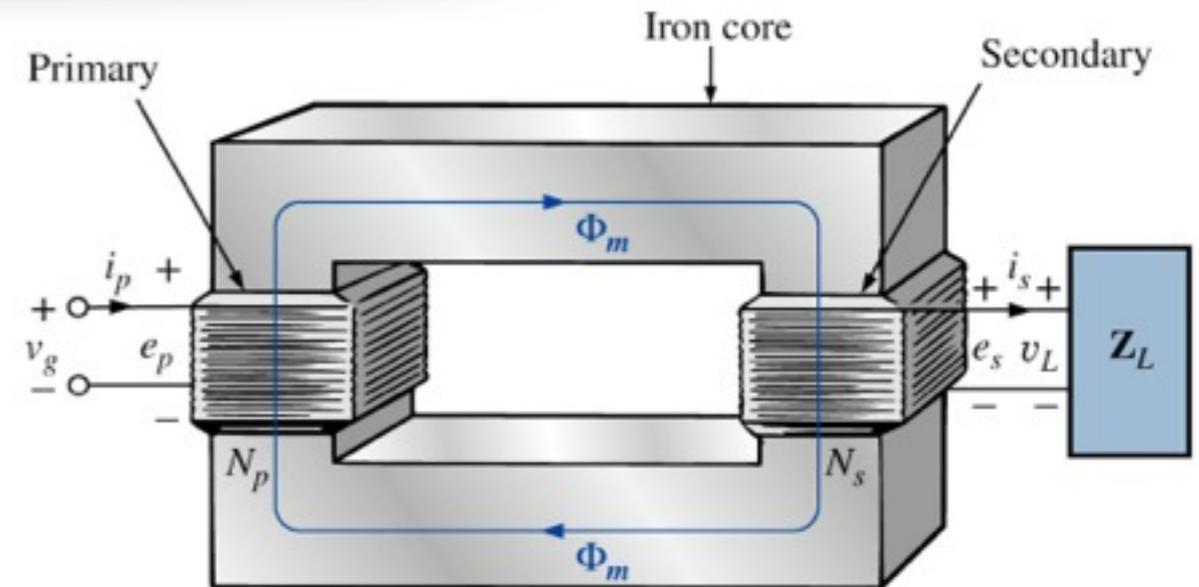
Tensão induzida no primário:

$$e_p = N_p \frac{d\phi_p}{dt} = N_p \frac{d\phi_m}{dt}$$

$$e_p = N_p \frac{d(\Phi_m \cdot \text{sen}(\omega t))}{dt}$$

$$e_p = \omega \cdot N_p \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega t)$$

$$e_p = \omega \cdot N_p \cdot \Phi_m \cdot \text{sen}(\omega t + 90^\circ)$$



Valor eficaz da tensão no primário:

$$E_p = \frac{\omega \cdot N_p \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}}$$

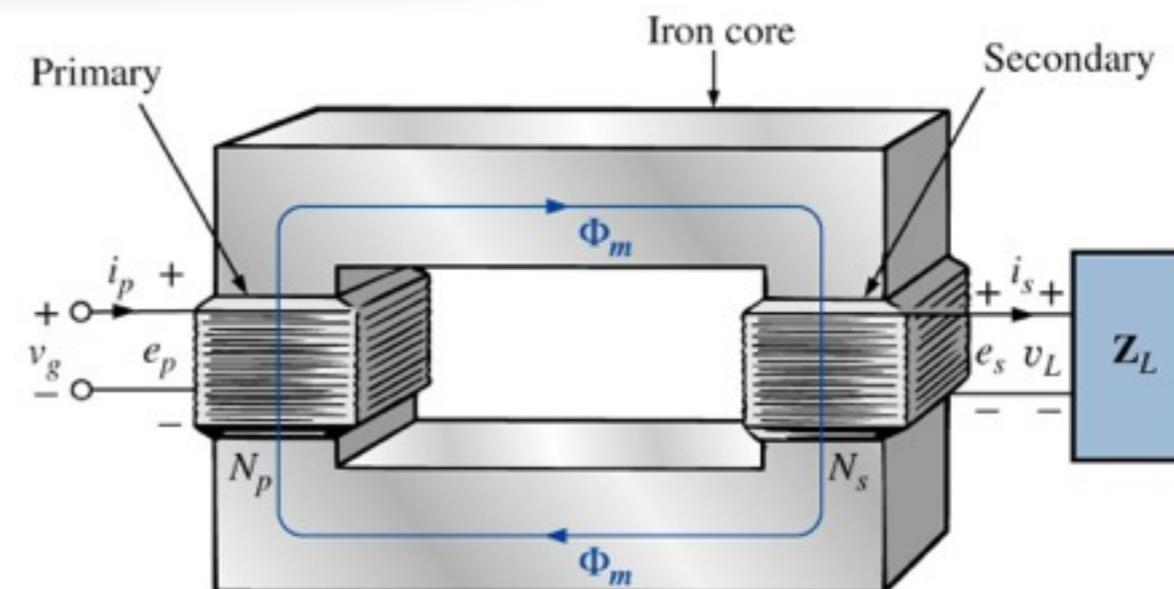
$$E_p = 4,44 \cdot f \cdot N_p \cdot \Phi_m$$

Transformador com Núcleo de Ferro

Valor eficaz da tensão no secundário:

$$E_s = \frac{\omega \cdot N_s \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}}$$

$$E_s = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi_m$$



Em termos de valores instantâneos:

Relação entre primário e secundário:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{4,44 \cdot f \cdot N_p \cdot \Phi_m}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi_m}$$

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p (d\phi_m / dt)}{N_s (d\phi_m / dt)}$$

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Transformador com Núcleo de Ferro

Relação de transformação:

$$a = \frac{N_p}{N_s}$$

Se $a < 1$:

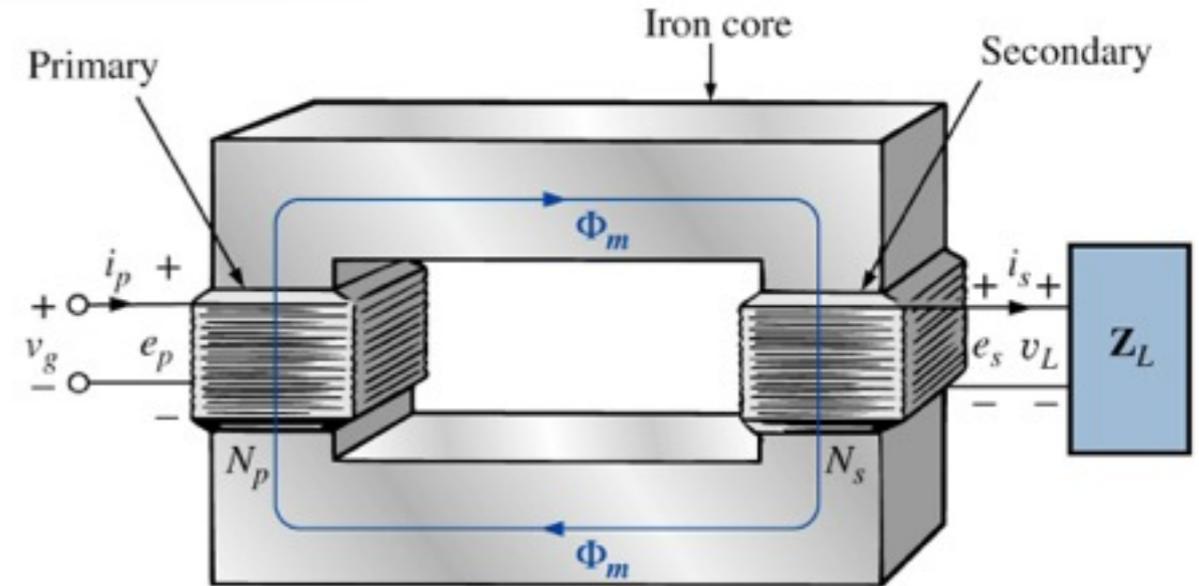
$$a < 1 \rightarrow N_s > N_p$$

Transformador elevador de tensão

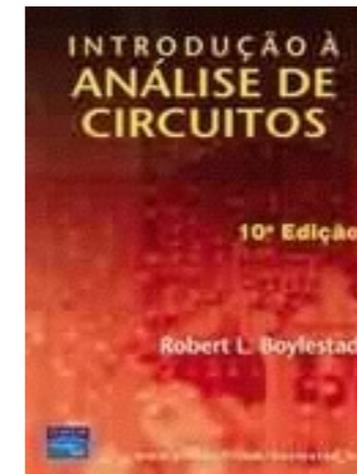
Se $a > 1$:

$$a > 1 \rightarrow N_p > N_s$$

Transformador abaixador de tensão



Exemplo 21.2, pag. 639:



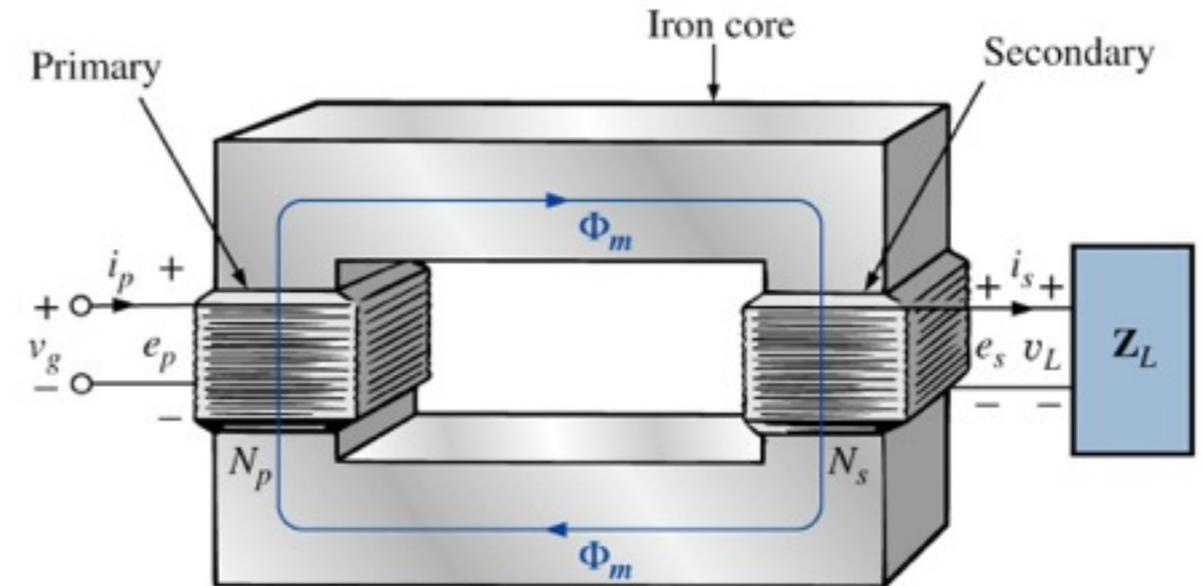
Transformador com Núcleo de Ferro

Corrente no primário:

$$i_p = i_p' + i_{\phi_m} \quad i_{\phi_m} \rightarrow \Phi_m$$

$$i_p' \gg i_{\phi_m}$$

$$i_p \cong i_p'$$



Em regime:

$$N_p \cdot i_p' = N_s \cdot i_s$$

$$N_p \cdot i_p = N_s \cdot i_s$$

$$\frac{i_p}{i_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

Em termos de valores eficazes:

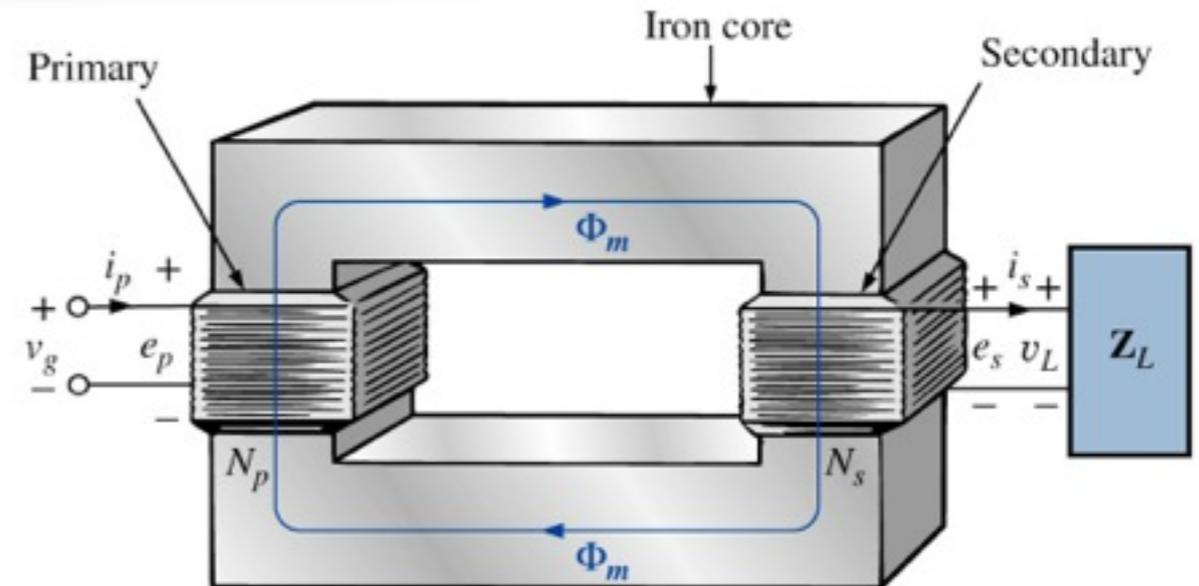
$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$$

Transformador com Núcleo de Ferro

Relação das tensões:

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

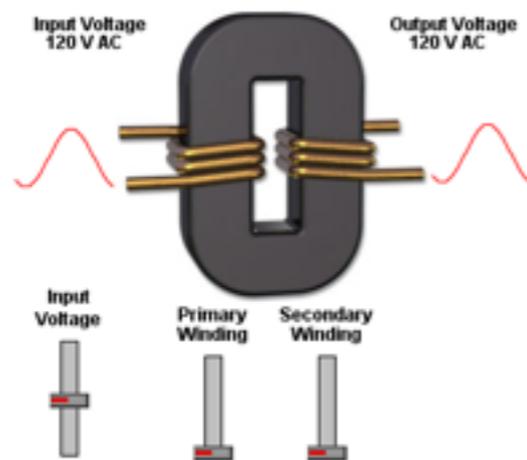
A razão entre as tensões do primário e do secundário é diretamente proporcional à relação entre o número de espiras.



Relação das correntes:

$$\frac{i_p}{i_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

A razão entre as correntes no primário e no secundário de um transformador é inversamente proporcional à relação de espiras.



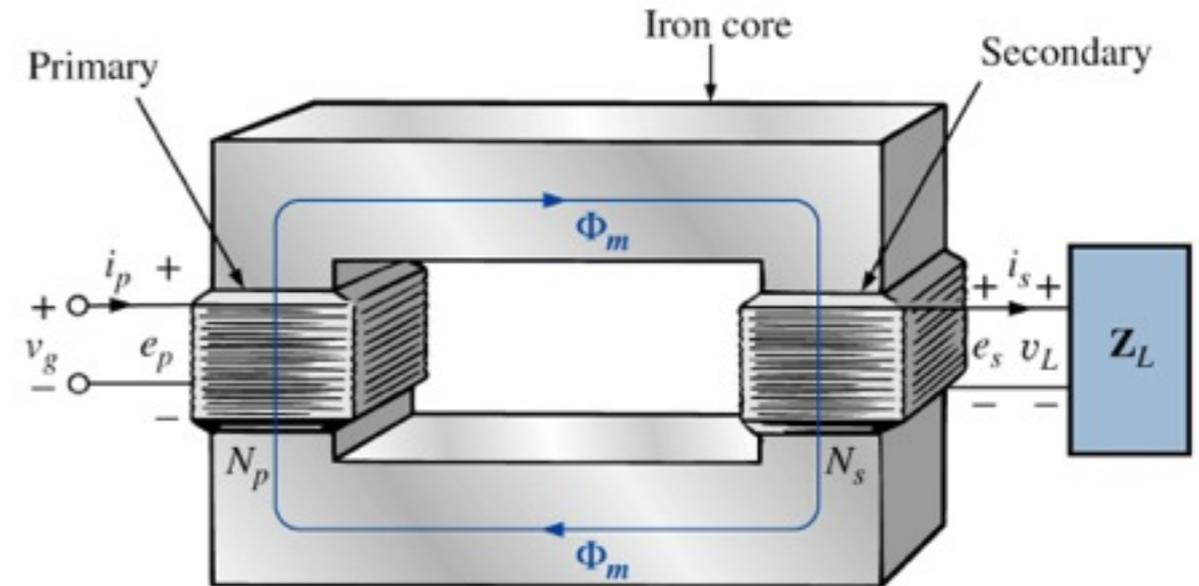
Transformador com Núcleo de Ferro

Impedância refletida:

$$\frac{\vec{V}_p}{\vec{V}_s} = \frac{N_p}{N_s} = a$$

$$\frac{\vec{I}_p}{\vec{I}_s} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{1}{a}$$

$$\frac{\vec{V}_p / \vec{I}_p}{\vec{V}_s / \vec{I}_s} = \frac{a}{1/a} \longrightarrow \frac{\vec{V}_p / \vec{I}_p}{\vec{V}_s / \vec{I}_s} = a^2$$



$$\vec{Z}_p = \frac{\vec{V}_p}{\vec{I}_p} \quad \vec{Z}_s = \frac{\vec{V}_s}{\vec{I}_s}$$

$$\vec{Z}_p = a^2 \vec{Z}_s$$

Transformador com Núcleo de Ferro

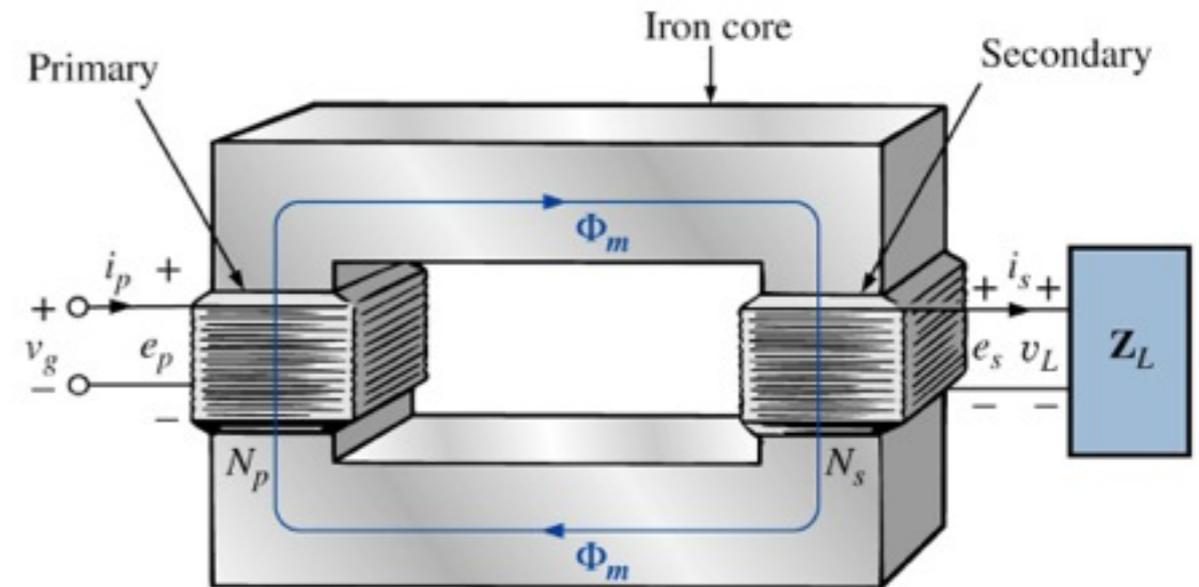
Potência (transformador ideal):

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} = a = \frac{I_s}{I_p}$$

$$E_p \cdot I_p = E_s \cdot I_s$$

$$P_p = P_s$$

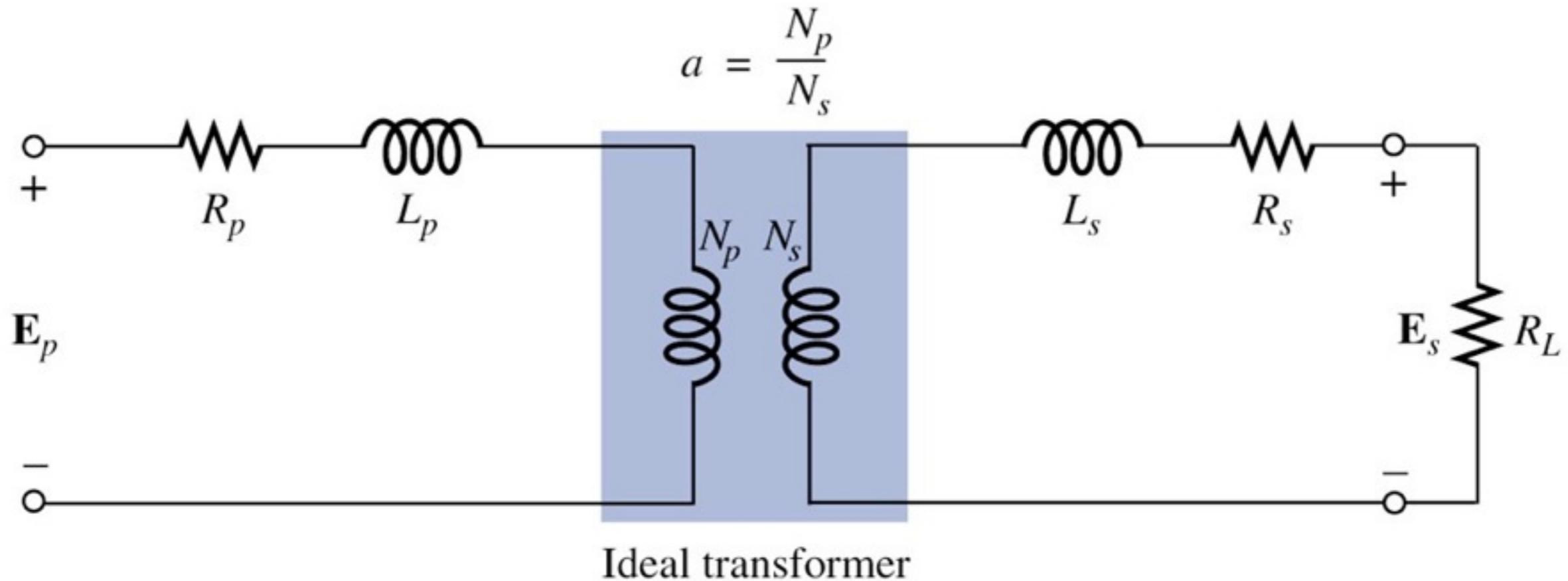
$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{saída}}$$



Para um transformador ideal, a potência de entrada é igual a potência da saída, ou seja, o transformador não possui perdas.

Transformador com Núcleo de Ferro

Circuito equivalente reduzido do transformador de núcleo de ferro real:

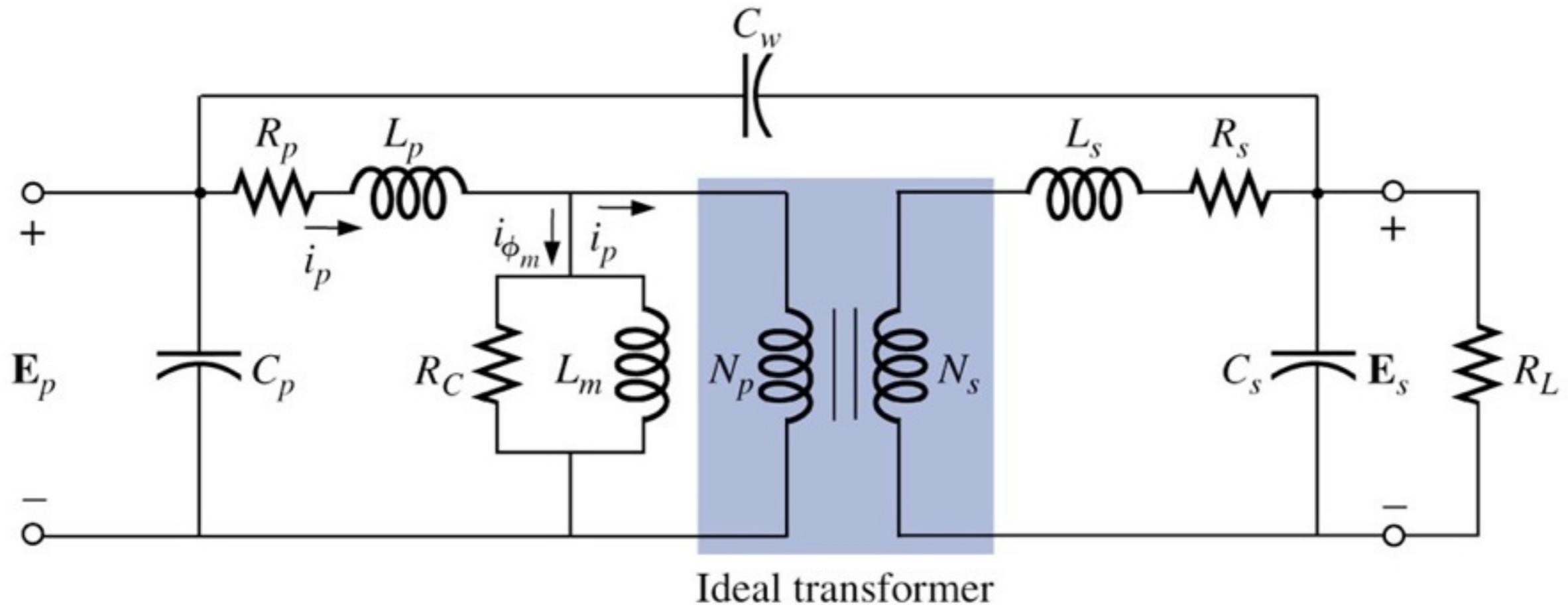


$$R_{\text{equivalente}} = R_e = R_p + a^2 R_s$$

$$X_{\text{equivalente}} = X_e = X_p + a^2 X_s$$

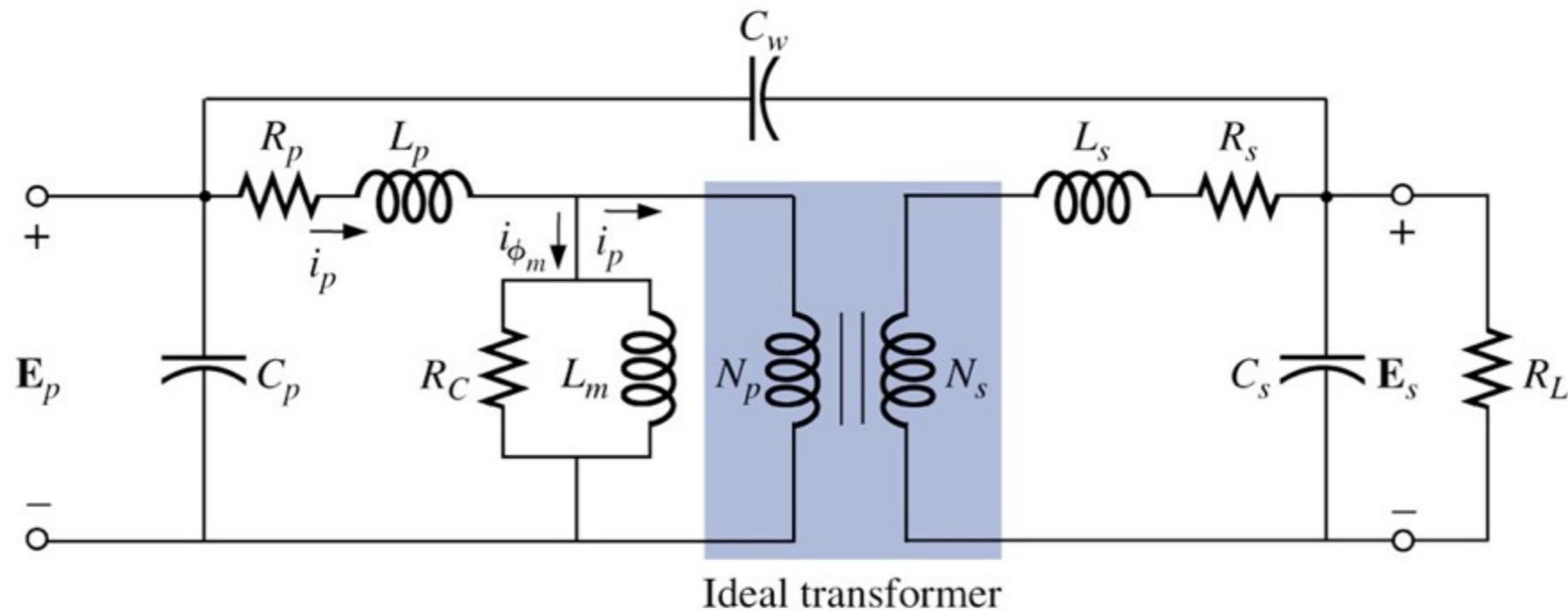
Transformador com Núcleo de Ferro

Circuito equivalente completo de um transformador de núcleo de ferro real:

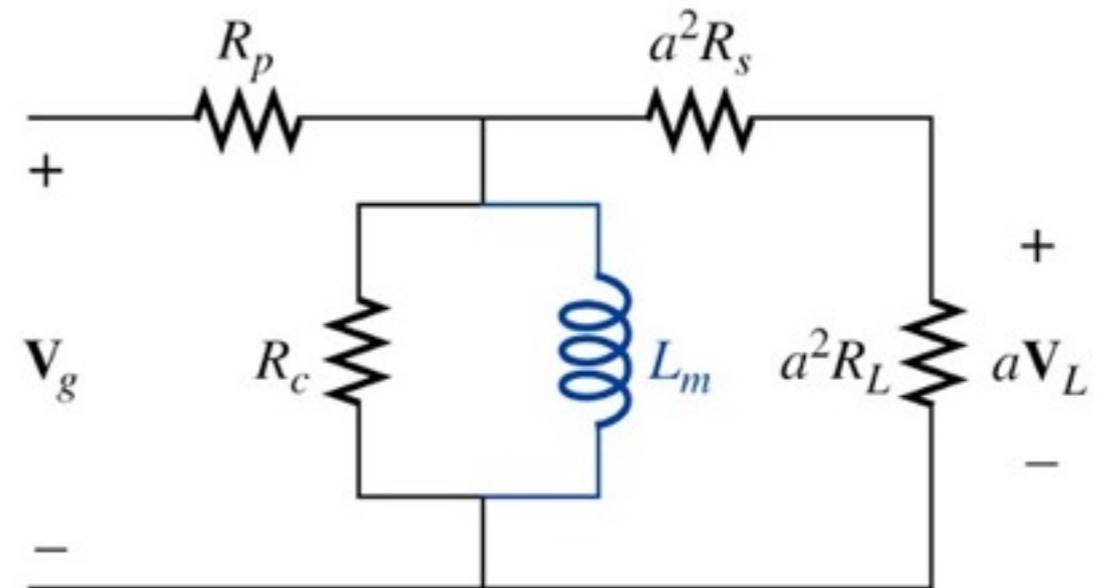


Transformador com Núcleo de Ferro

Efeito da frequência:

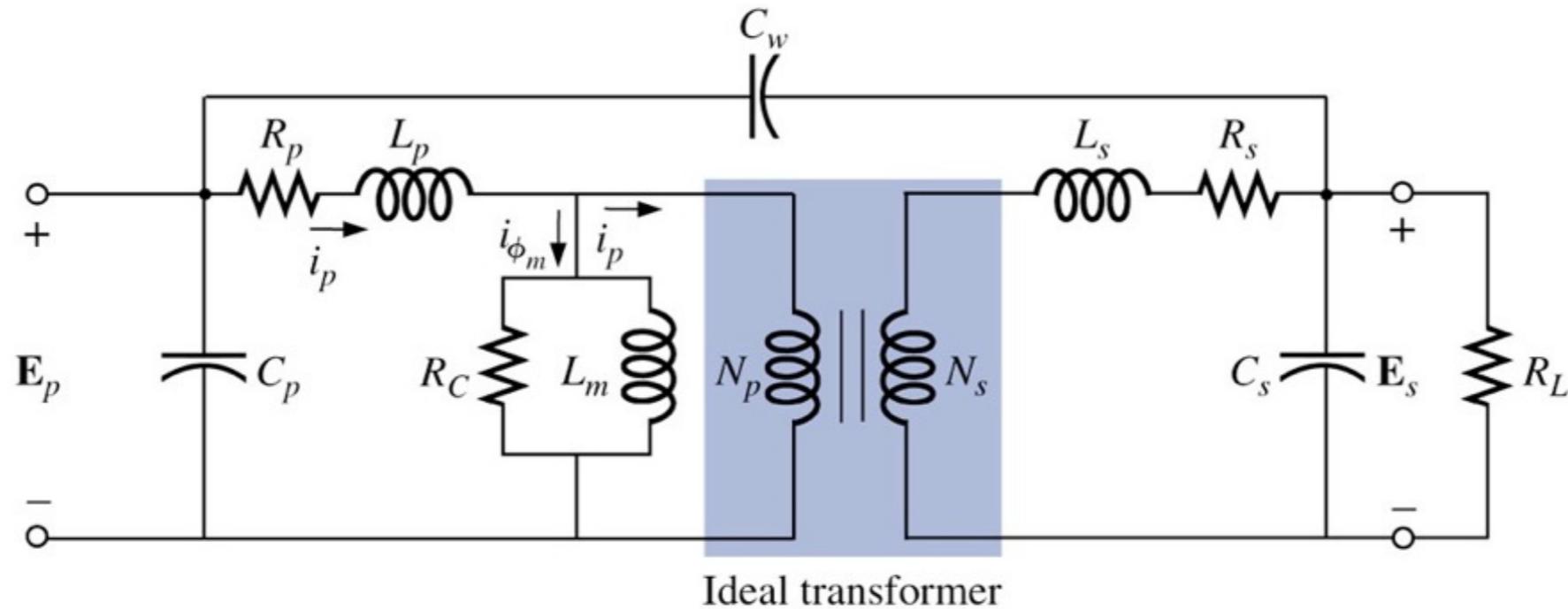


Circuito equivalente para baixas
frequências

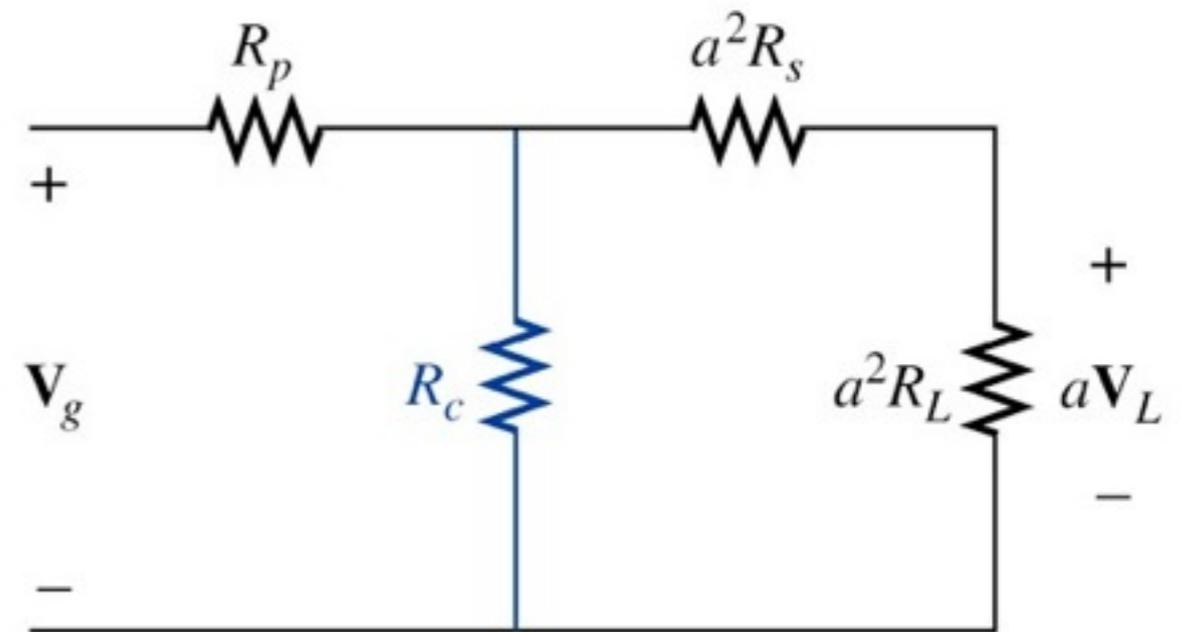


Transformador com Núcleo de Ferro

Efeito da frequência:



Circuito equivalente para médias
frequências



Magnéticos:

- Projeto de indutores;
- Projeto de transformadores..

Continua...

