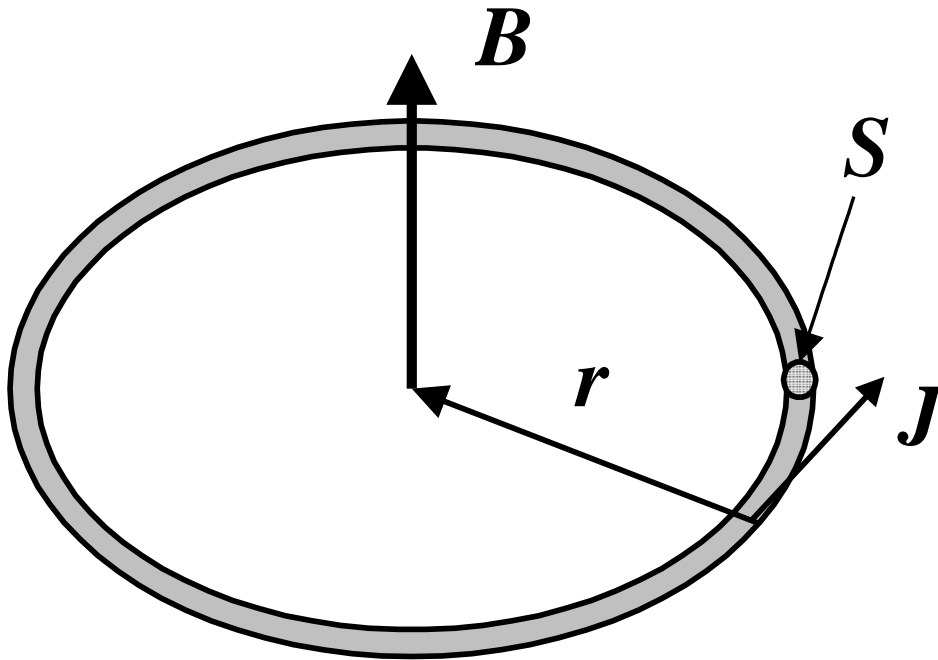


# Indutores

Indutores são dispositivos passivos que convertem corrente elétrica em campo magnético

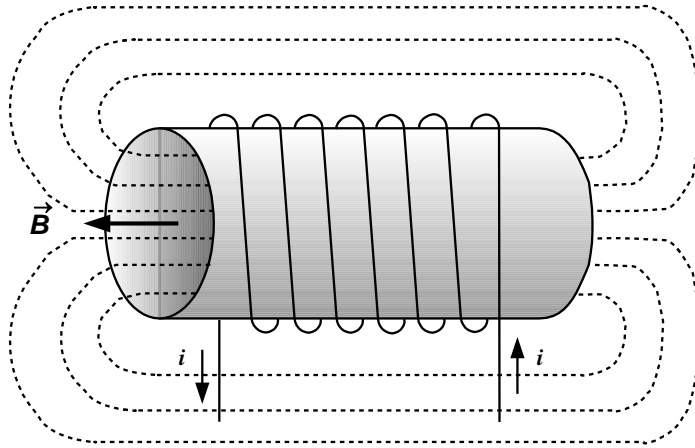


Lei de Ampere

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J}$$

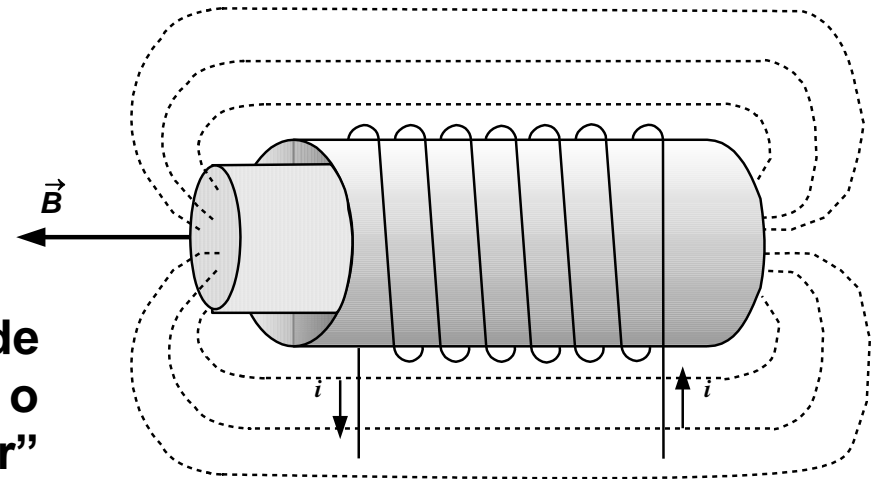
$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

# Indutores



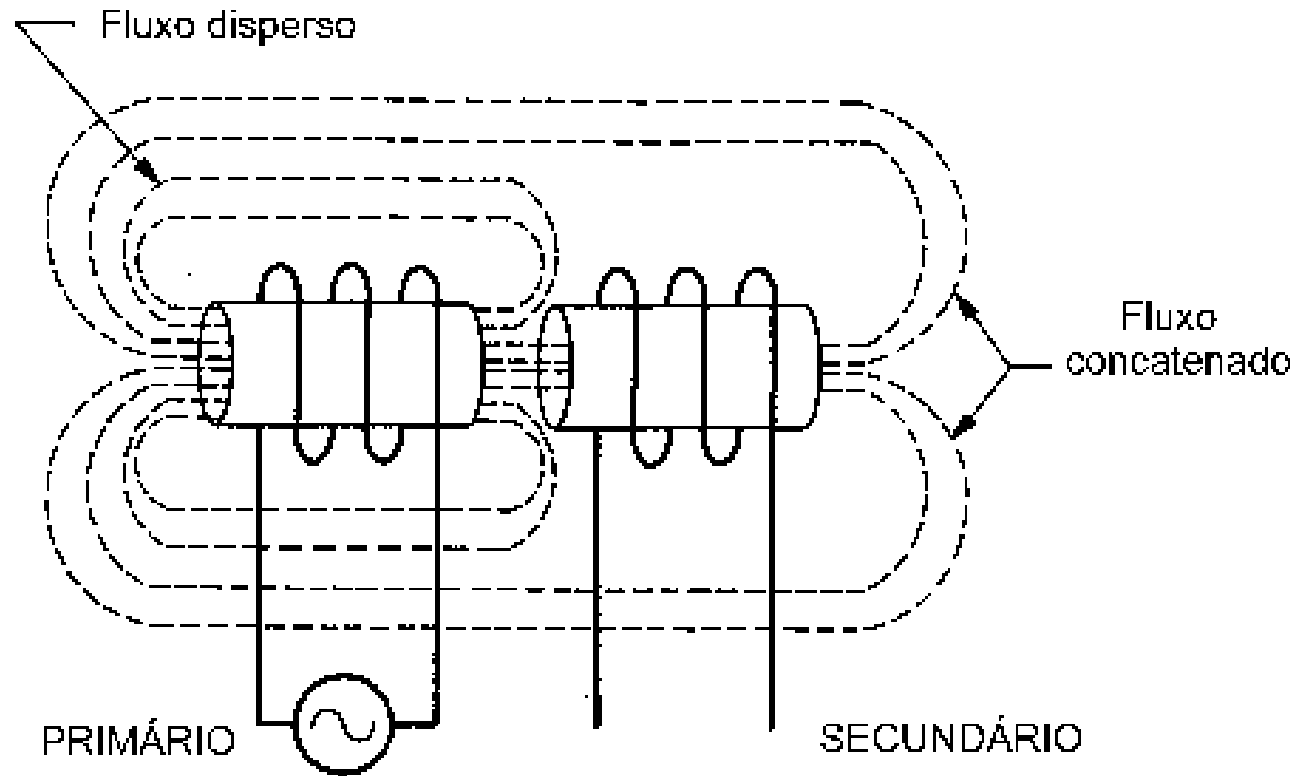
**Bobina magnética com núcleo de ar**

Linhas de fluxo magnético



**Bobina magnética com núcleo de material ferromagnético (ferro): o núcleo funciona como “amplificador” de fluxo magnético**

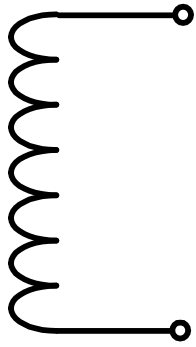
# Indutores acoplados



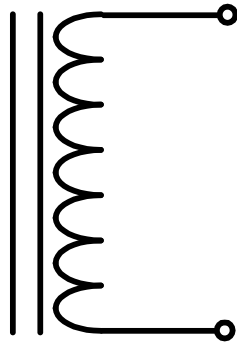
**Bobinas magnéticas apresentando fluxo magnético concatenado**

# Indutores

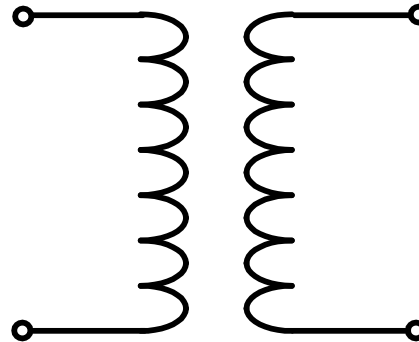
## Símbolos



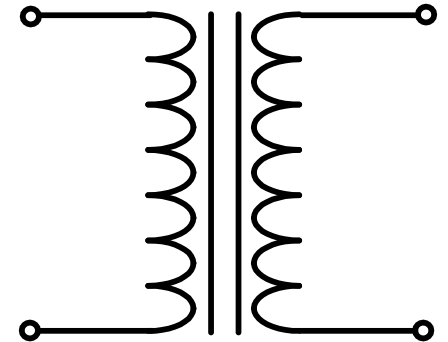
**Indutor com núcleo de ar**



**Indutor com núcleo de ferro**



**Indutores acoplados (transformador) com núcleo de ar**



**Indutores acoplados (transformador) com núcleo de ferro**

# Indutores

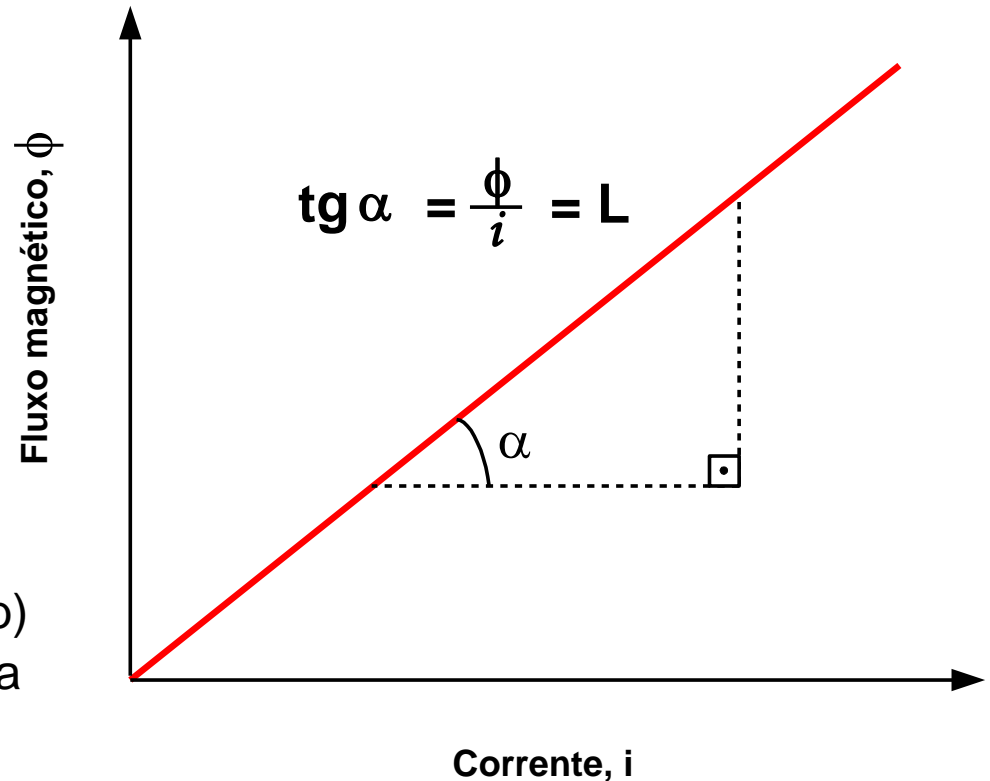
## Indutância de bobinas com núcleo de ar (meio linear)

$$L = \frac{\Phi}{i}$$

L: indutância (Henry = H)

$\Phi$ : fluxo magnético (Weber = Wb)  
produzido pela corrente  $i$  de uma bobina

Material magnético linear

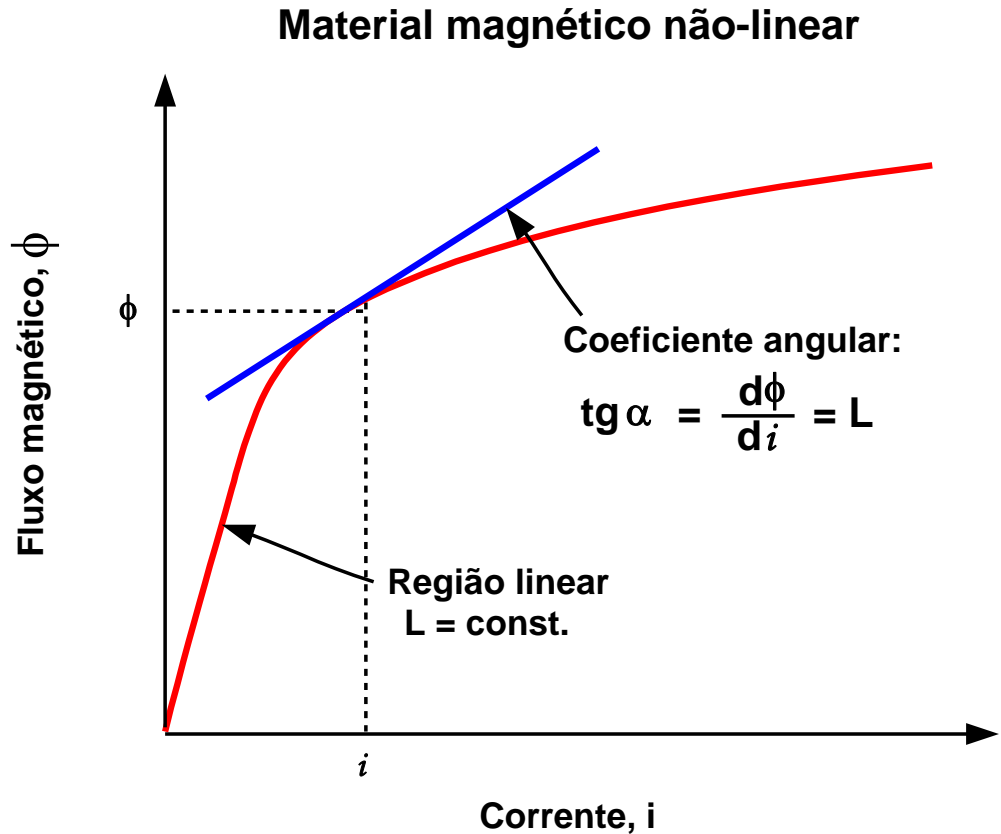


# Indutores

## Indutância de bobinas com núcleo de ferro

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

O fluxo magnético  $\phi$  depende da corrente de uma forma não-linear



# Indutores

Relação entre indutância e tensão induzida  
(Lei de Faraday)

$$L = \frac{d\phi}{di} = \frac{d\phi}{dt} \cdot \frac{dt}{di} = V \cdot \frac{dt}{di}$$

$$V = L \frac{di}{dt}$$

# Indutores

## Potência de um indutor

$$P = Vi = Li \frac{di}{dt}$$

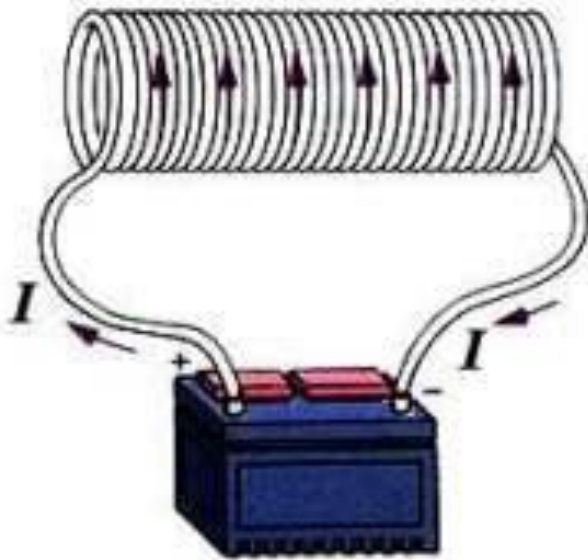
## Energia armazenada num indutor

$$E = \int_0^t Li \frac{di}{dt} dt = \int_0^i Li \cdot di = \frac{1}{2} Li^2$$

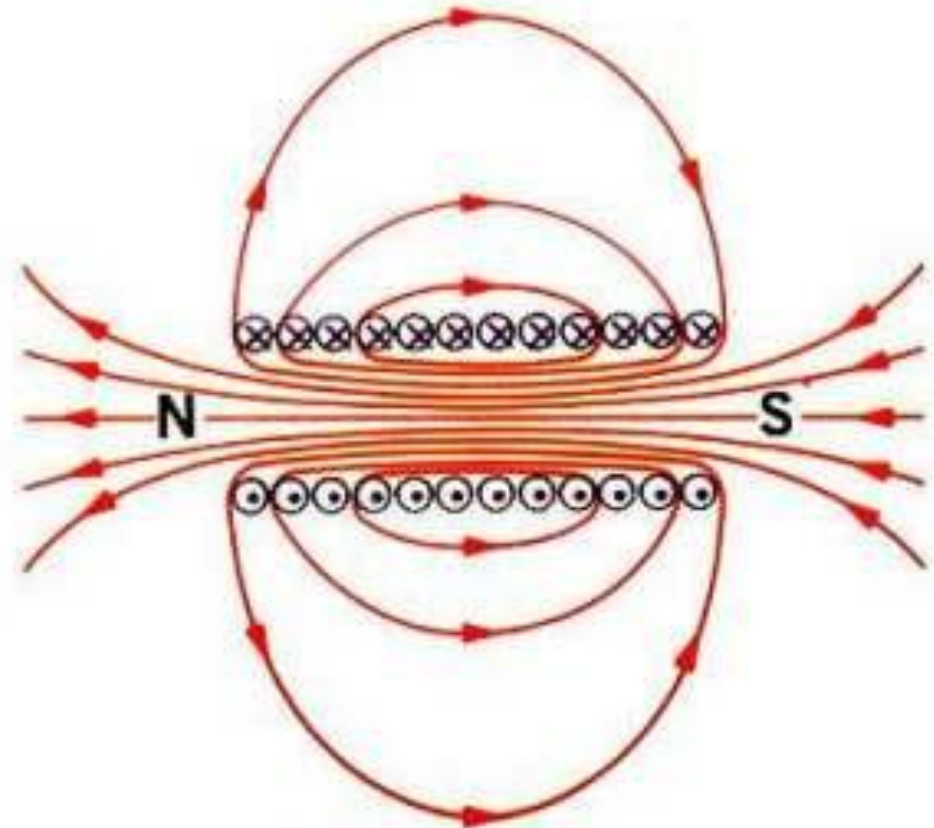


# Indutores: Solenóide

Eletroímã



Solenóide

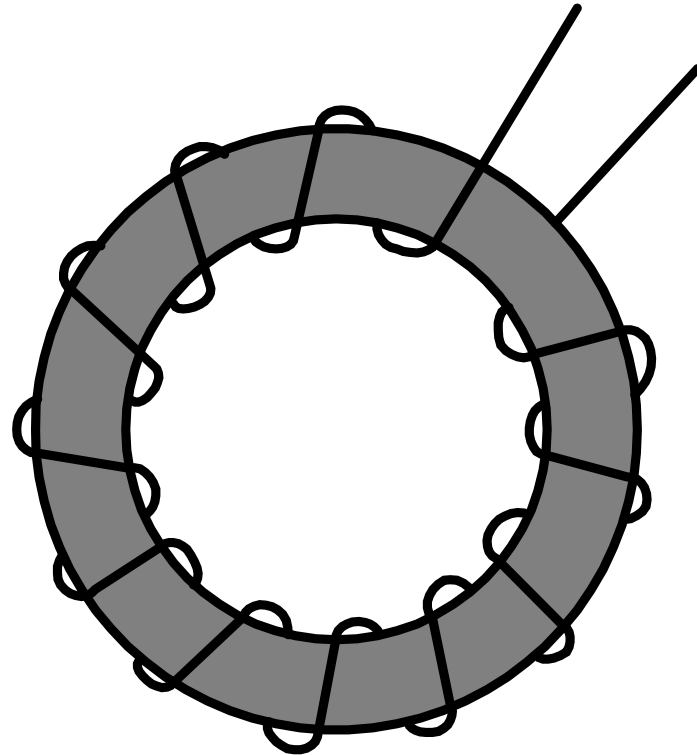


Linhas de fluxo magnético no solenóide

# Indutores: toróide

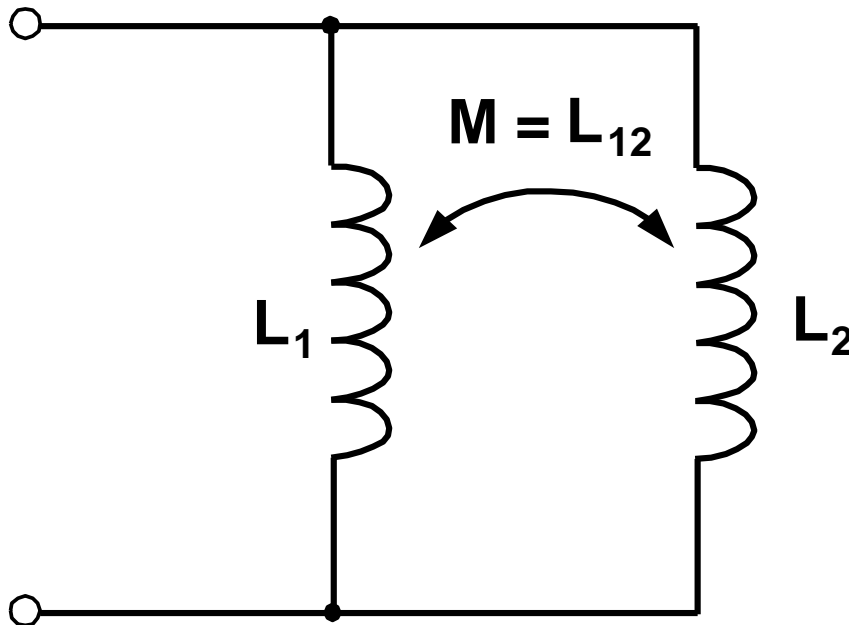
Indutância de um toróide:

$$L = \frac{\mu N^2 A_C}{\ell_C}$$



# Indutores

## Cálculo de indutância total de indutores acoplados



$$L = L_1 + L_2 \pm 2M$$

$L$ : indutância total

$L_1$ : indutância própria da bobina 1

$L_2$ : indutância própria da bobina 2

$M$ : indutância mutua

$$M = k\sqrt{L_1L_2}$$

$k$ : coeficiente de acoplamento ( $0 < k < 1$ )

# Indutores

## Aplicações dos indutores:

Filtros

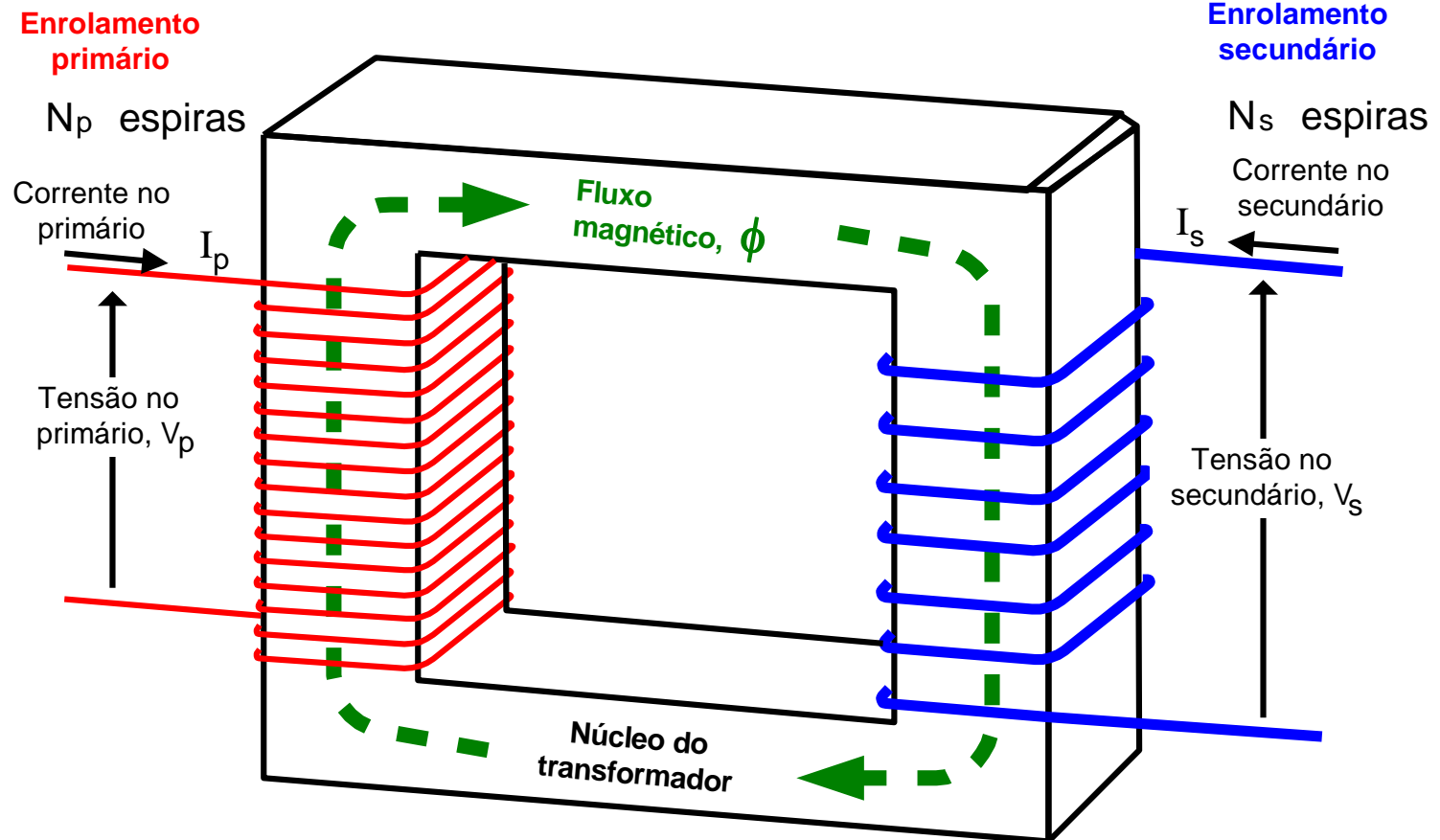
Reguladores de tensão

Casamento de impedância (máxima transferência de potência)

Limitadores de transientes

Limitadores de corrente

# Transformadores



Esquema de um transformador elétrico

# Transformadores

## Classificação

Os transformadores são adaptados a numeras aplicações técnicas e podem ser classificados de diversas formas:

- Pelo nível de potência (de alguns décimos de watt a vários megawatts),
- Por aplicação (fonte de potência, casamento de impedância, isolação de circuito),
- Por faixa de frequência (potência, audio, RF)
- Por classe de tensão (de alguns volts a cerca de 750 kilovolts)
- Por tipo de refrigeração (resfriado a ar, com óleo, por ventilador, resfriado com água, etc.)
- Por tipo de uso (retificador, forno a arco, amplifier de potência, etc.).

# Transformadores

- Pela razão do número de espiras:

## **Elevador de tensão**

O secundário tem mais espiras que o primário.

## **Abaixador de tensão**

O secundário tem menos espiras que o primário.

## **Isolador**

Transforma a tensão de entrada na mesma tensão de saída. As duas bobinas tem aproximadamente o mesmo número de espiras, embora quase sempre exista uma pequena diferença para compensar as perdas (de outra forma, a tensão de saída seria menor do que a tensão de entrada).

## **Variável**

Os enrolamentos primário e secundário tem um número ajustável de espiras que podem ser seleccionadas sem reconectar o transformador.

# Transformadores

## Perdas no transformador

Um transformador ideal não possui perdas e assim seria 100% eficiente. Na prática, energia é dissipada devida tanto à resistência do enrolamento (conhecido como *perda no cobre*), e a efeitos magnéticos atribuíveis principalmente ao núcleo (conhecido como *perdas no ferro*). Os transformadores são altamente eficientes e os grandes transformadores de potência (> 50 MVA) podem alcançar uma eficiência tão alta quanto 99,75%. Pequenos transformadores tais como o “tijolo de potência” plugável usados em circuitos eletrônicos de consumo podem ter eficiência inferior a 85%.

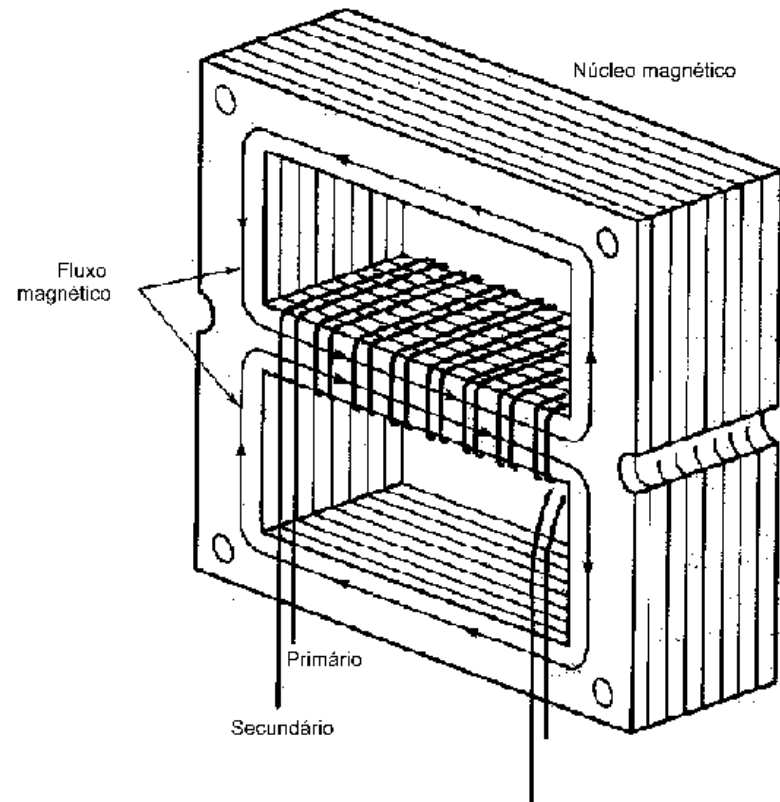


# Transformadores

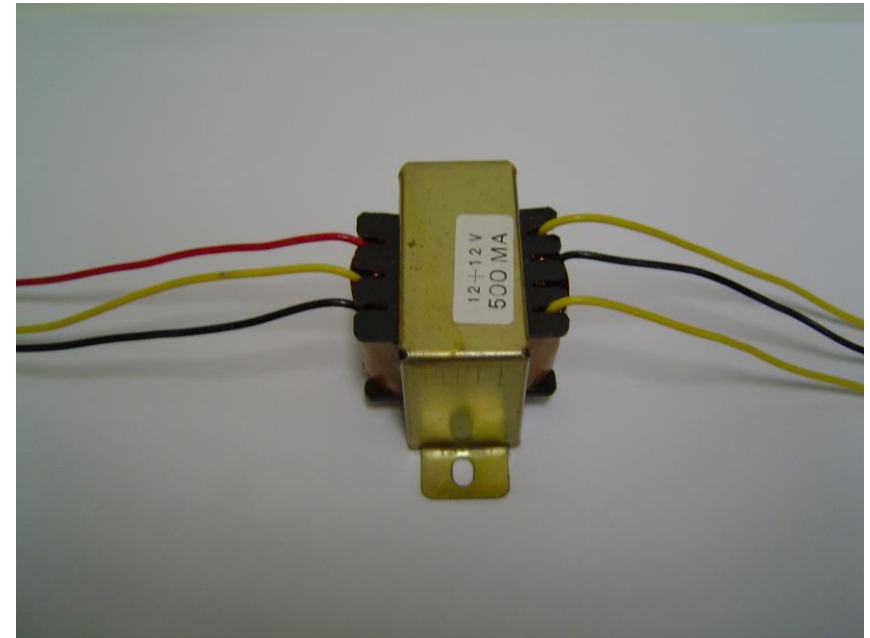
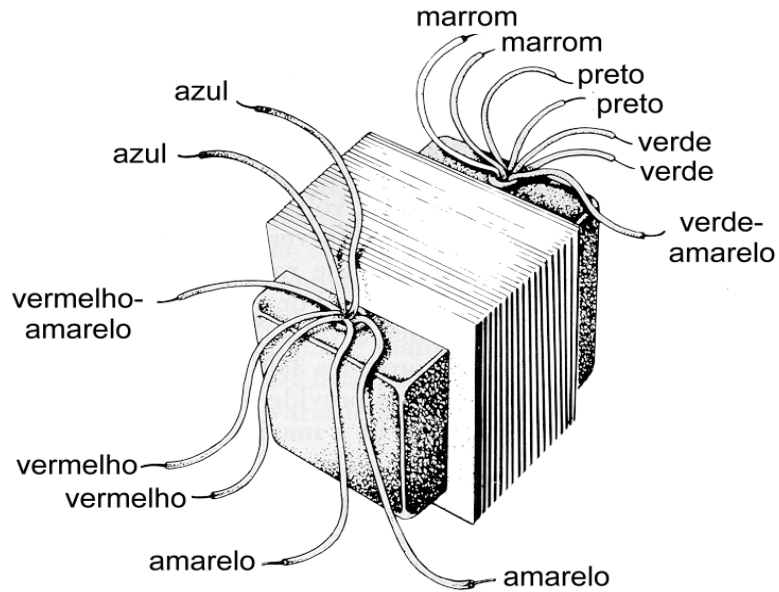
## Tipos de perdas:

- Resistência do enrolamento
- Correntes parasitas
- Perdas por espraiamento de campo
- Perdas por histerese
- Perdas mecânicas
- Magnetostricção
- Sistema de refrigeração

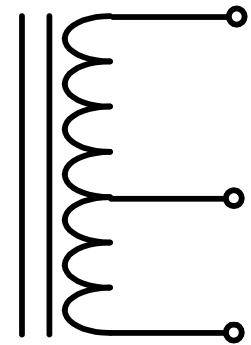
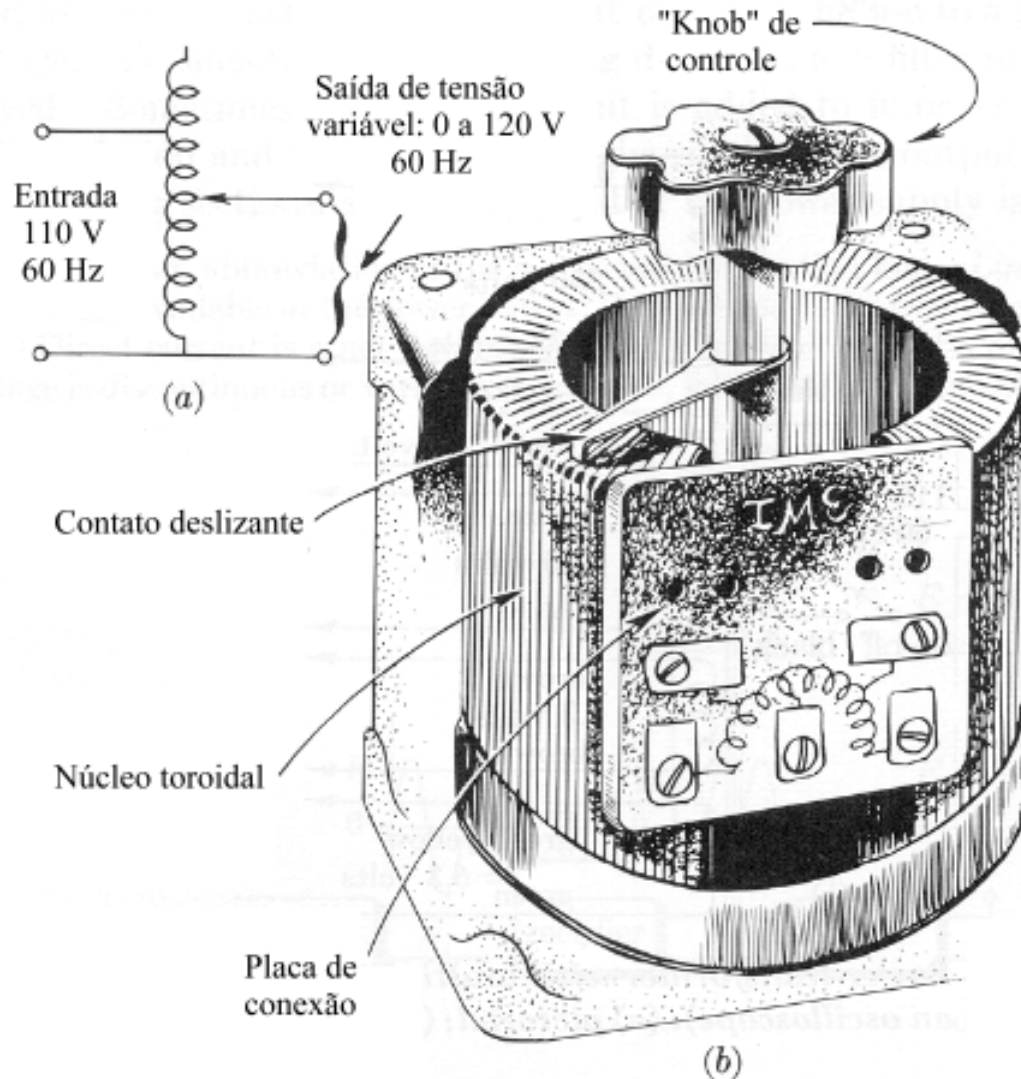
# Transformador eletrônico



# Transformador eletrônico com múltiplas tomadas



# Autotransformador (variac ou varivolt)

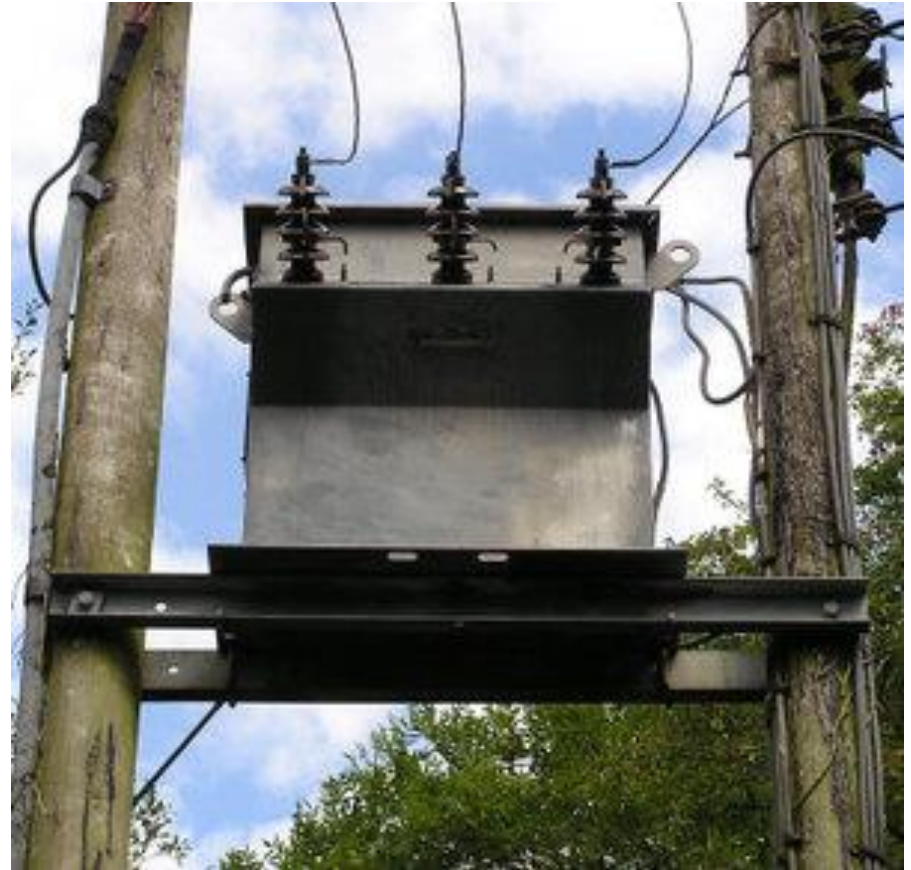


Símbolo

# Transformadores de potência



**Transformador de distribuição  
monofásico**



**Transformador de distribuição  
trifásico**

# Transformadores de corriente (sensores de corriente)



**Transformador de corriente trifásico**

# **Materiais magnéticos**

## **Tipos de materiais magnéticos:**

**Macios: fácil magnetização/desmagnetização**

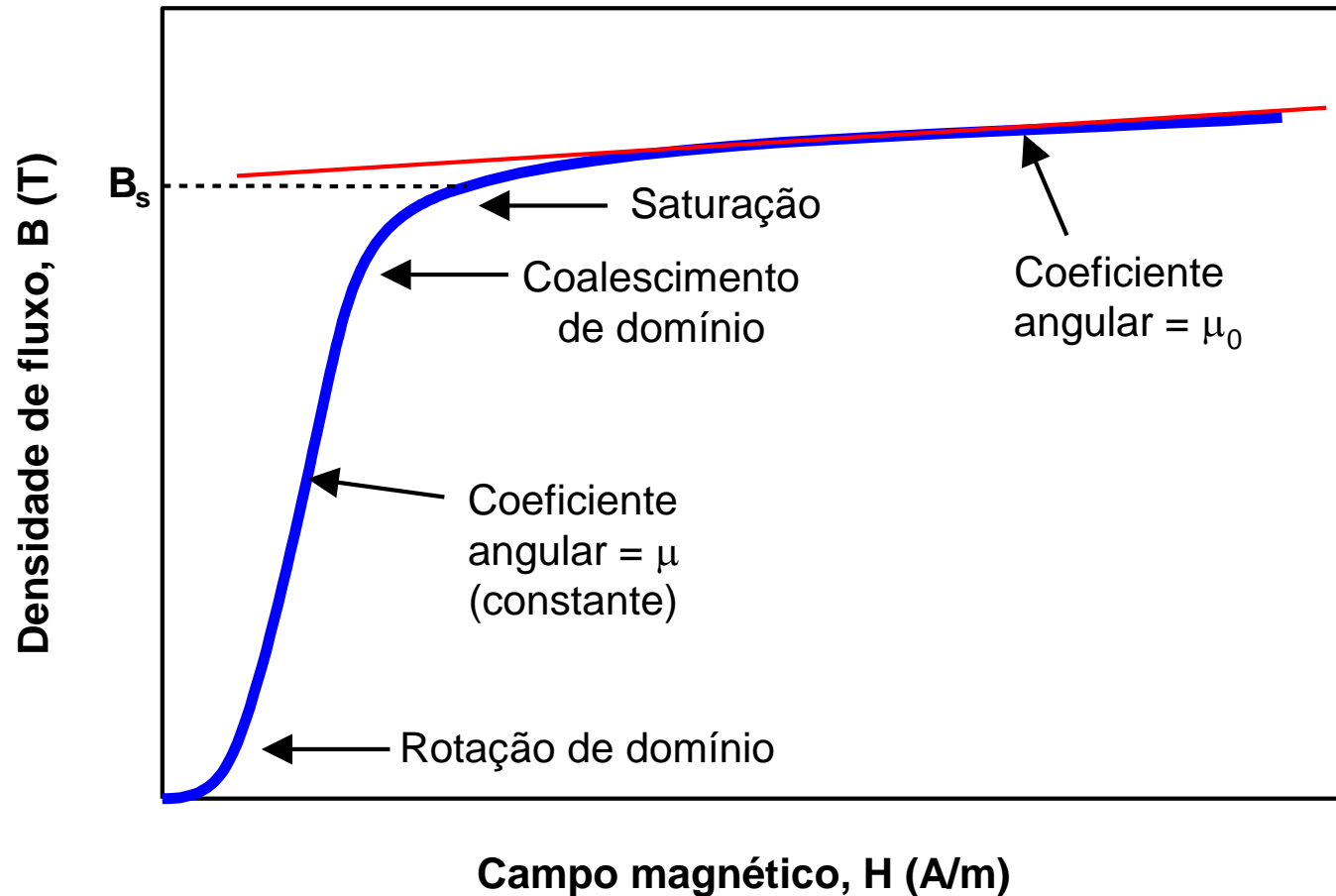
**Baixas perdas em frequências comerciais (50/60 Hz)**

**Duros (ímãs permanentes): difícil magnetização/desmagnetização**

**Retém a magnetização por longos tempos, quando mantidos a uma temperatura abaixo da temperatura de Curie**

# Materiais magnéticos

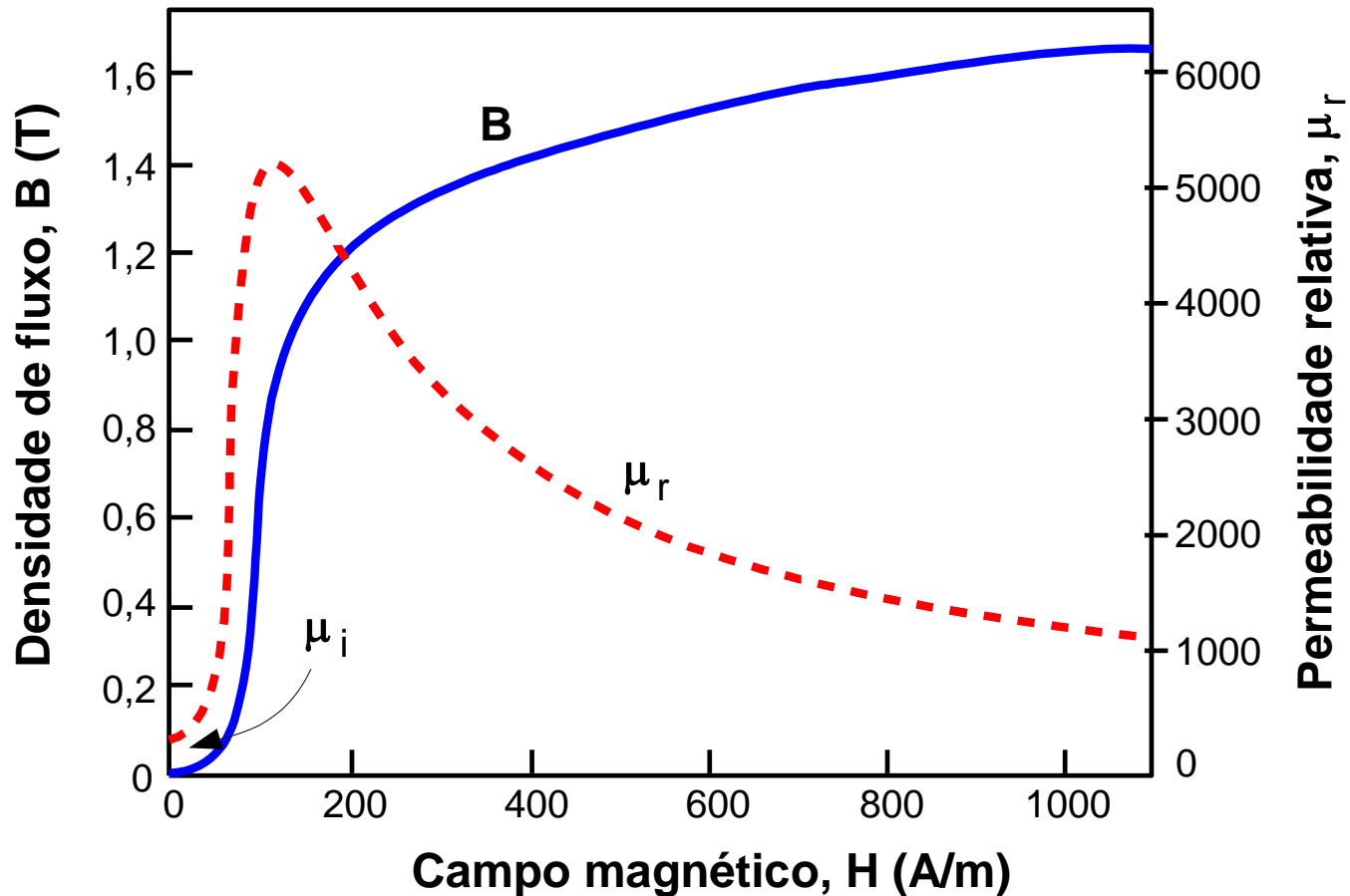
## Curva BH





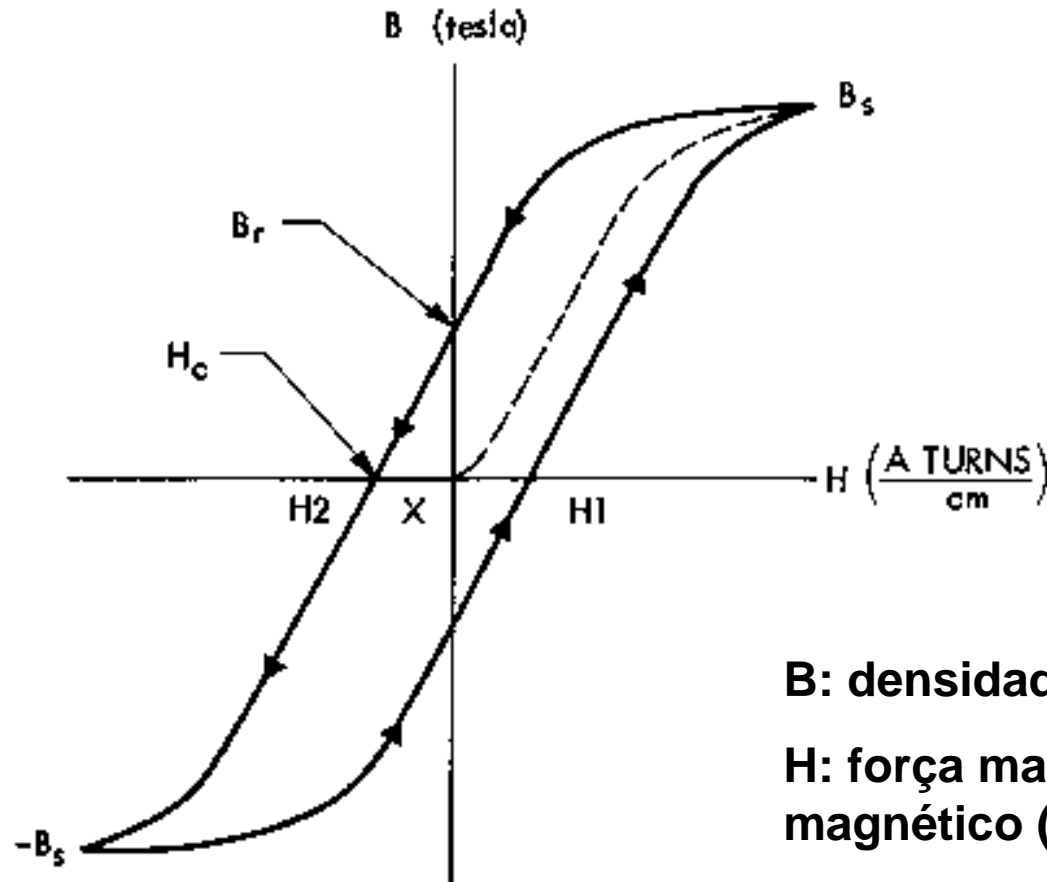
# Materiais magnéticos

Curva BH e de permeabilidade magnética para o aço carbono



# Materiais magnéticos

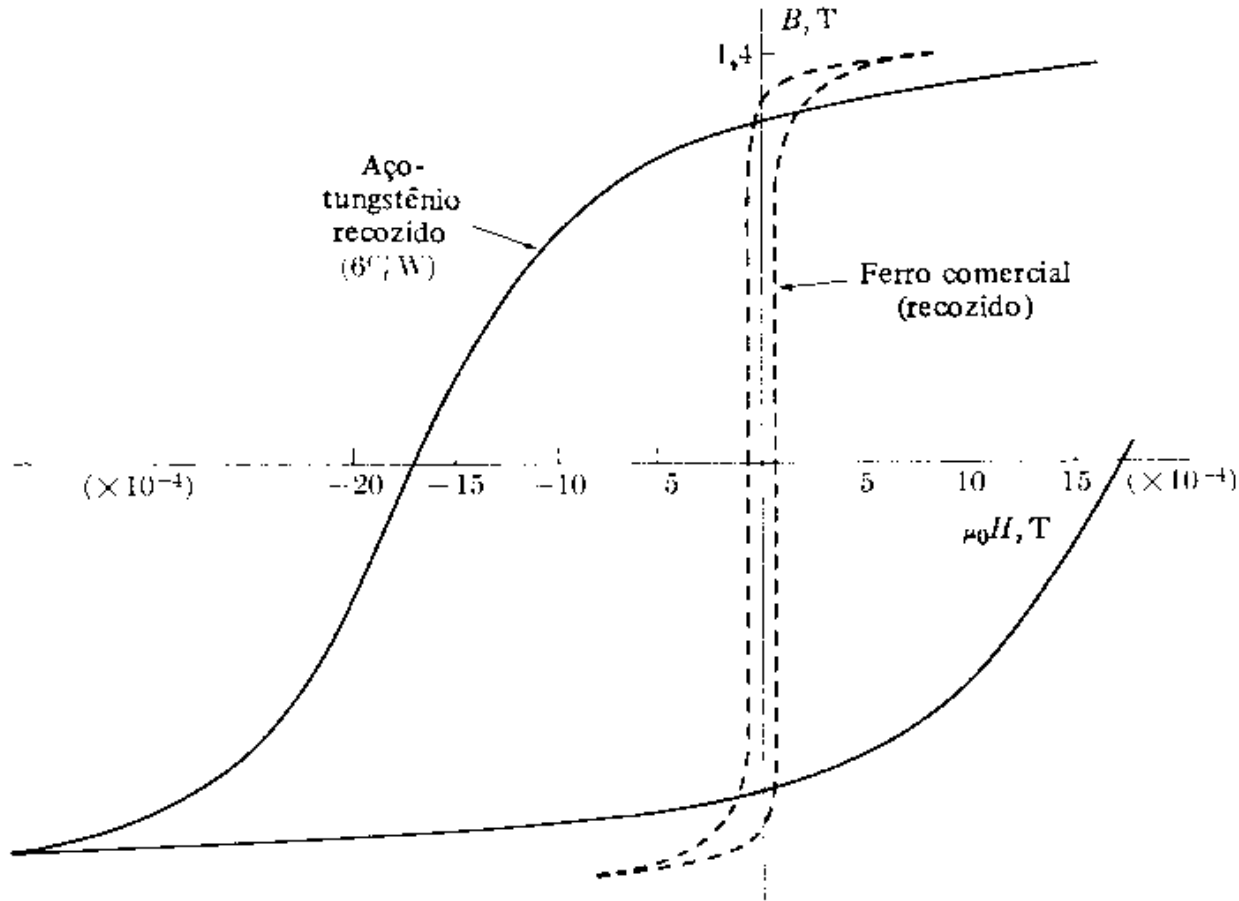
## Curva de histerese magnética esquemática



**B:** densidade de fluxo (teslas = T)

**H:** força magnetizante ou campo magnético (A/m)

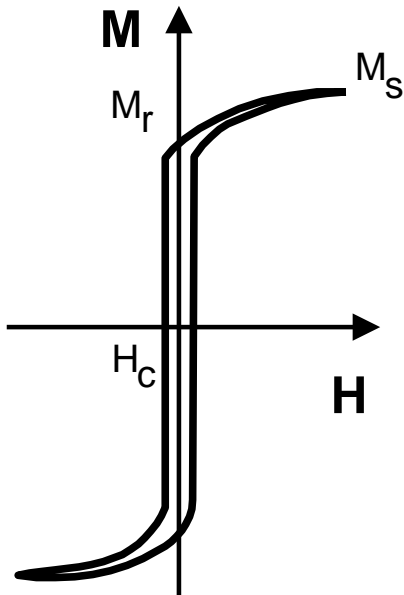
# Materiais magnéticos



Comparação entre as curvas de histerese para dois materiais magnéticos

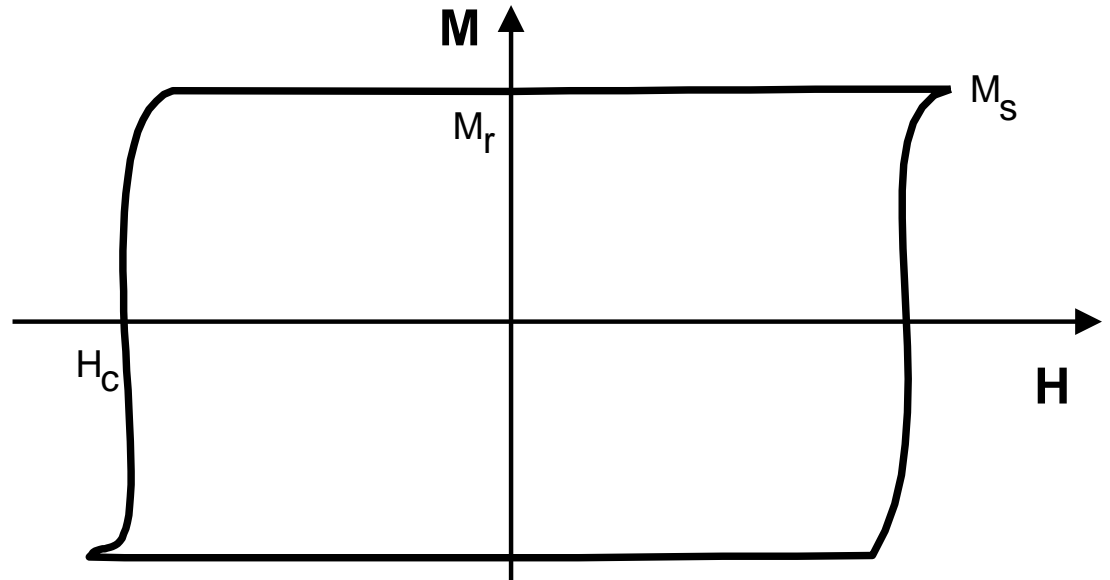
# Materiais magnéticos

## Curvas de Magnetização



**Material macio**

$$0,1 < H_c < 100 \text{ A/m}$$



**Material duro**

$$10 < H_c < 3000 \text{ kA/m}$$

# Materiais magnéticos

## Propriedades

Susceptibilidade magnética

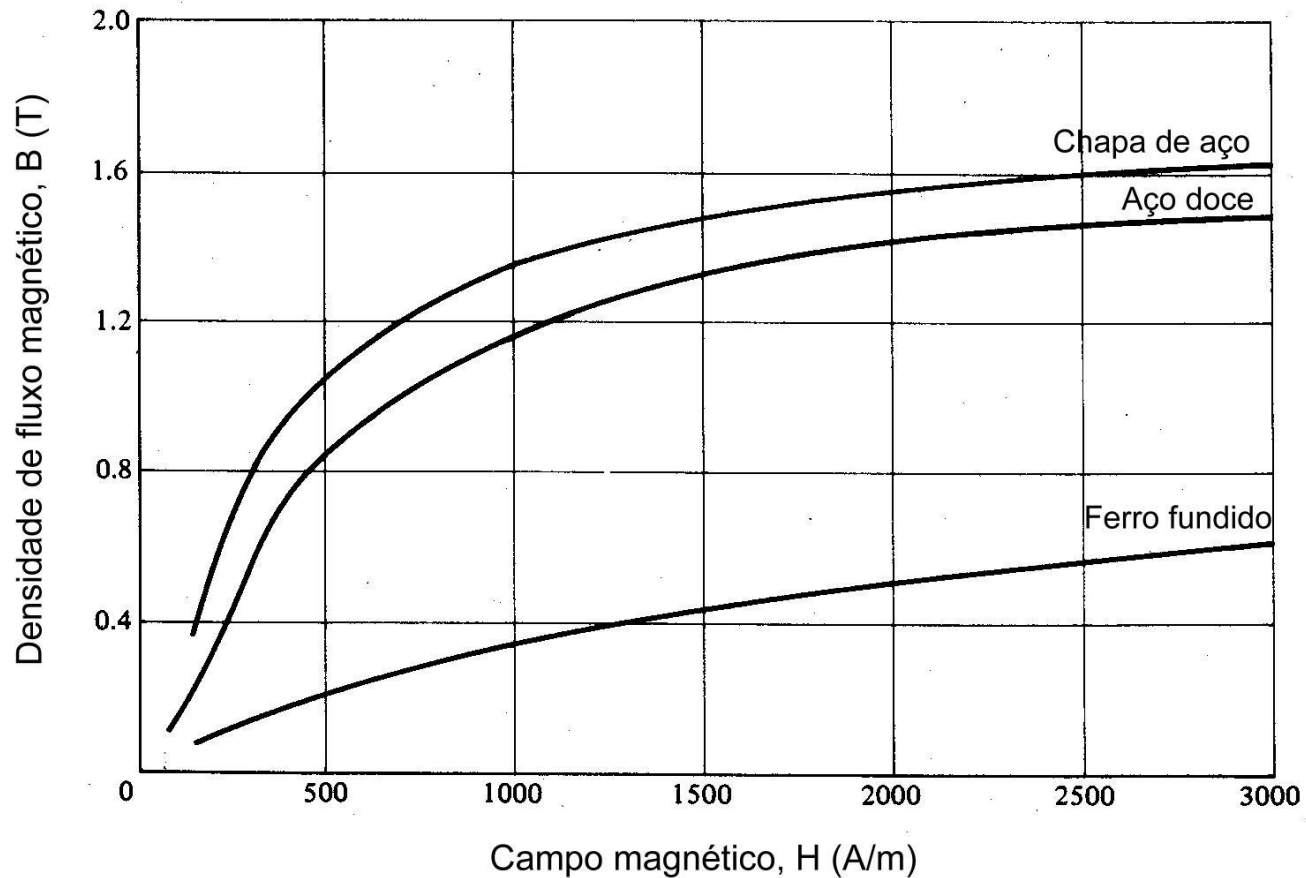
$$\chi = \frac{M}{H}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}$$

Permeabilidade magnética

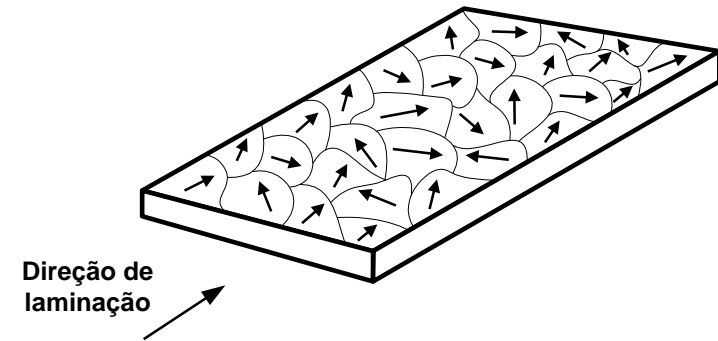
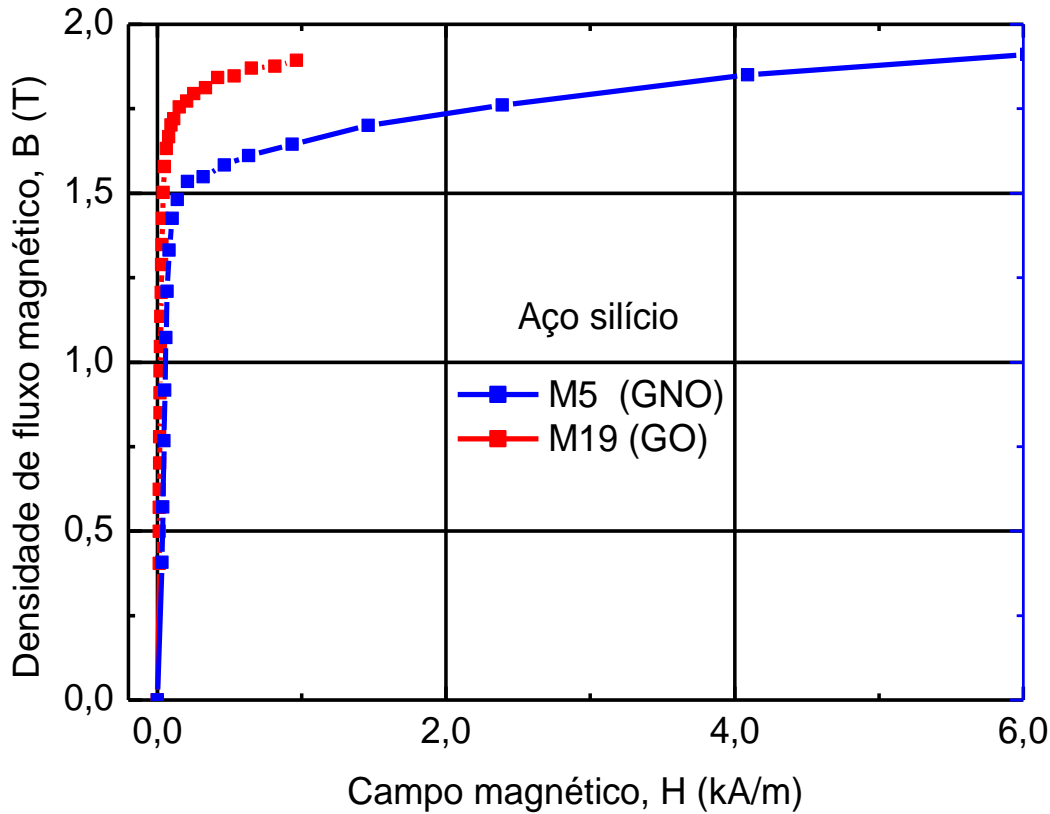
$$\mu = \mu_0 (1 + \chi)$$

# Materiais magnéticos

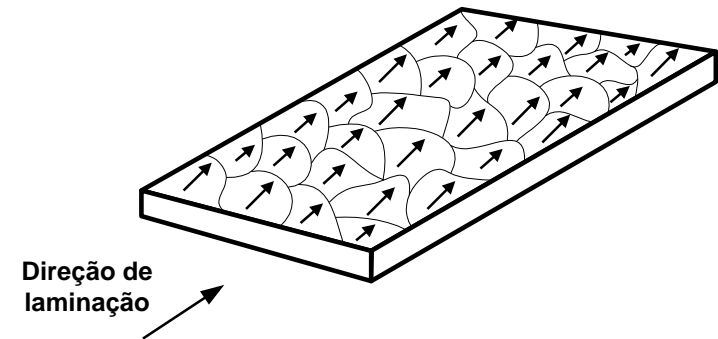


Curva BH para diferentes tipos de aço

# Materiais magnéticos



**GNO: grão não-orientado**



**GO: grão orientado**

**Curva BH para diferentes tipos de aço silício**

# Materiais magnéticos

## Materiais magnéticos duros

### Características

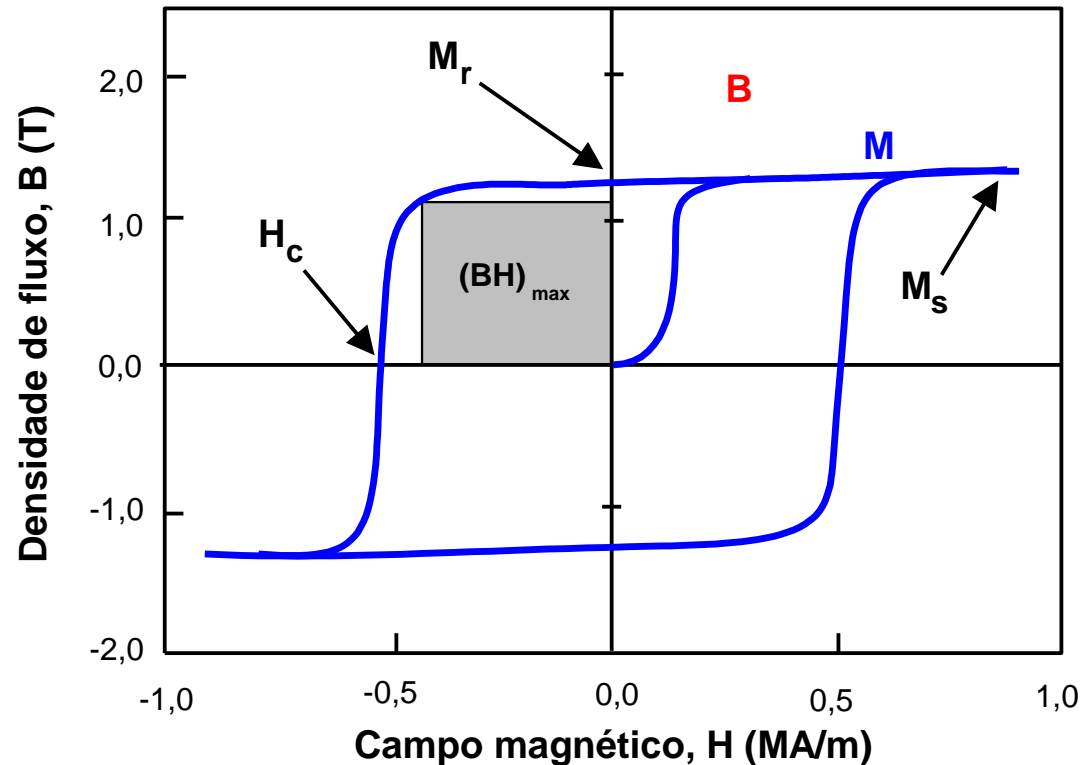
Alto  $M_r$ , elevado  $H_c$

Elevado produto  $(BH)_{max}$

$\text{SmCo}_5$  (1969),

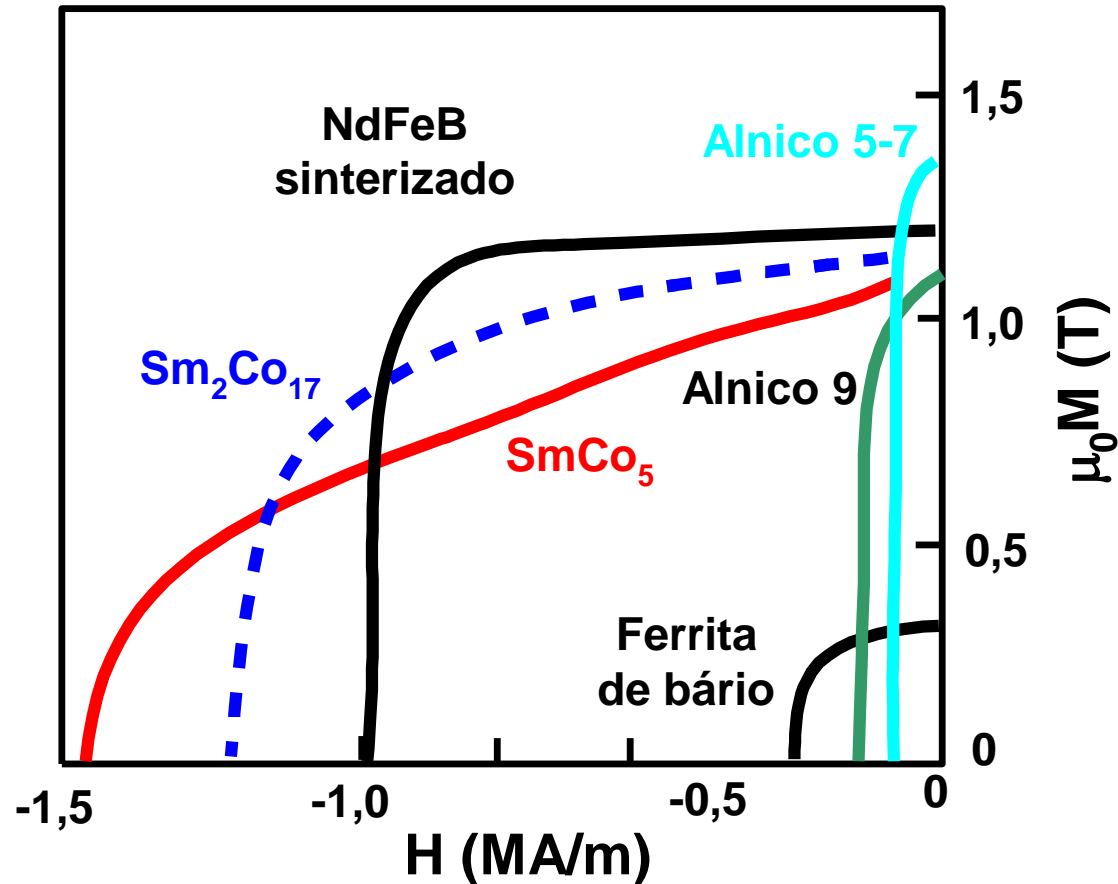
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ,

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  (1983)



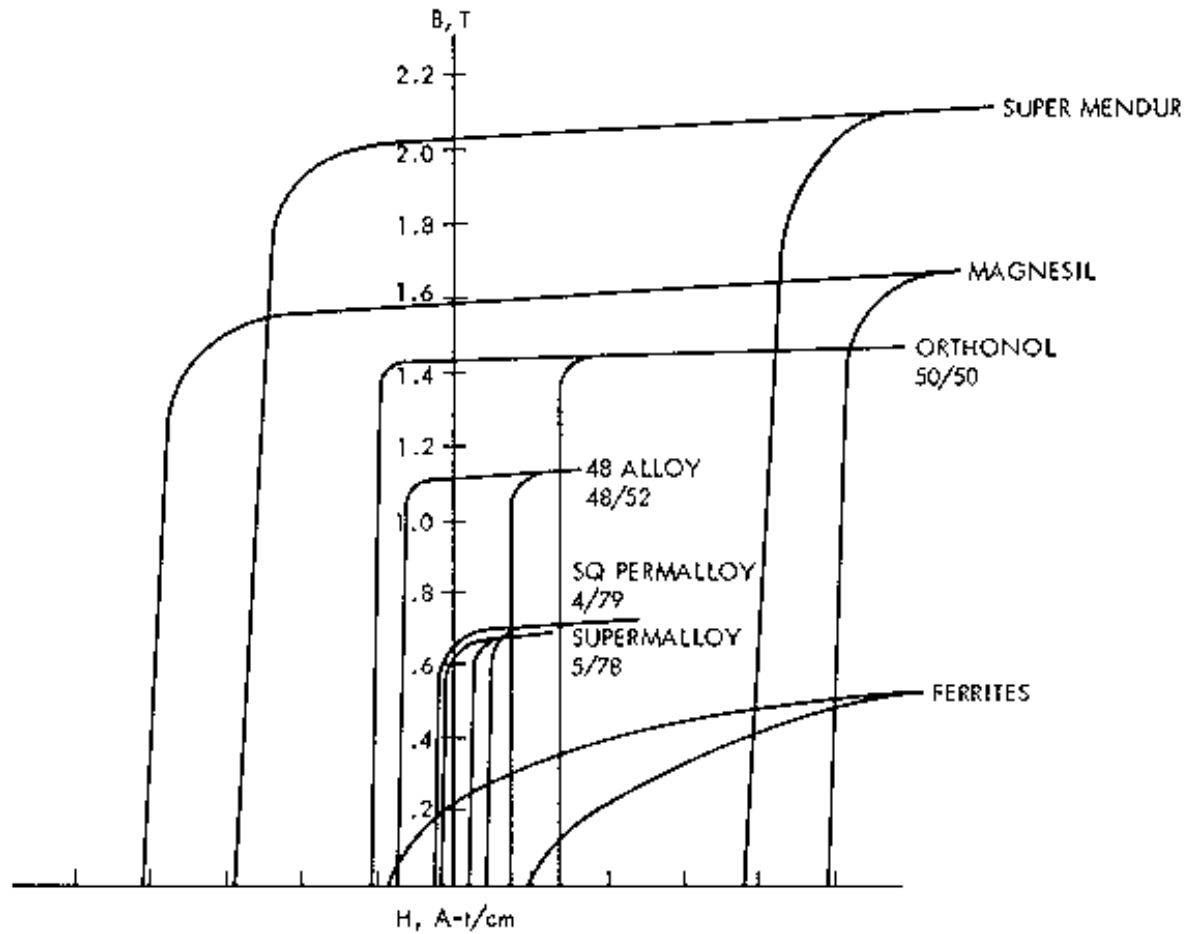


# Materiais magnéticos



Curvas de magnetização de materiais magnéticos duros

# Materiais magnéticos



Curvas de magnetização de materiais magnéticos duros

# Materiais magnéticos

## Propriedades magnéticas dos materiais magnéticos macios

Material	$\mu_i$	$\mu_{\max}$	$H_c$ (kA/m)	$B_r$ (T)	$B_s$ (T)
Ferro comercial	250	9000	80	0,77	2,15
Aço puro	10.000	200.000	4	-	2,15
Aço 4% Si	1.500	7.000	20	0,5	1,95
Aço 3% Si	7.500	55.000	8	0,95	2,0
Mumetal (5 Cu, 2 Cr, 77 Ni)	20.000	100.000	4	0,23	0,65
Permalloy 78 (78,5% Ni)	8.000	100.000	4	0,6	1,08

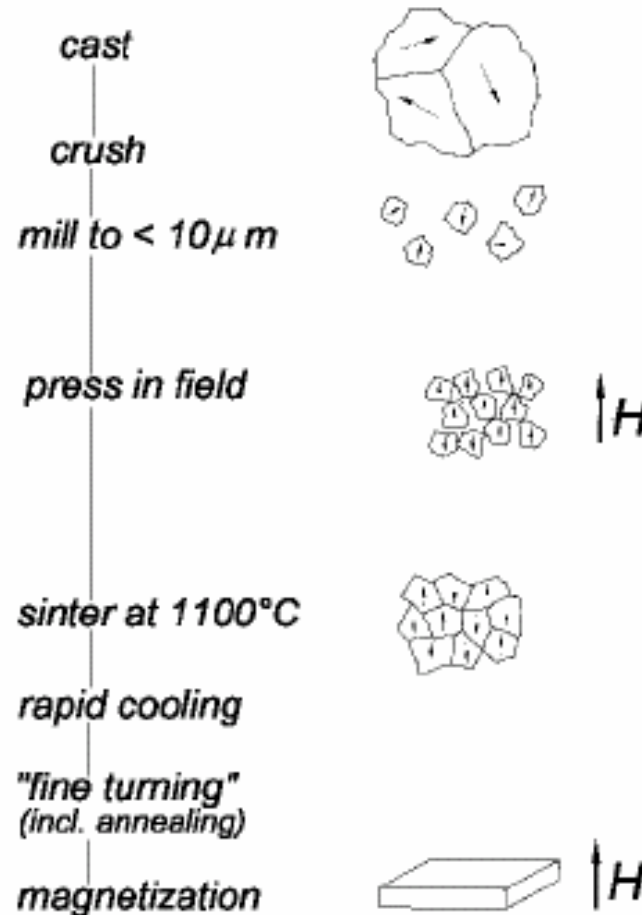
# Materiais magnéticos

## Propriedades magnéticas dos materiais magnéticos duros

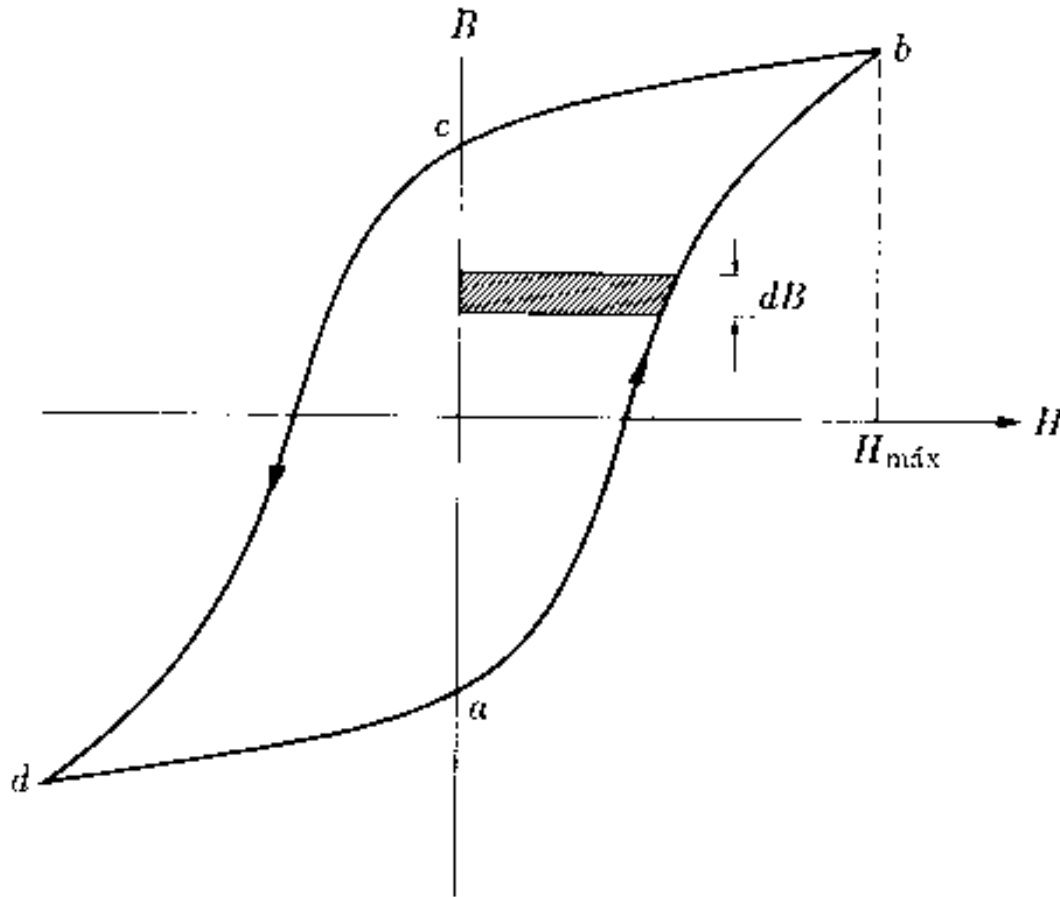
Material	$H_c$ (kA/m)	$B_r$ (T)	$(BH)_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )
Alnico V (14 Ni, 24 Co, 8 Al, 3 Cu)	44	1,2	1,6
Ferro pó (100% Fe)	61	0,57	1,28
Ferrita de bário	120	0,2	8,0
SmCo <sub>5</sub>	560	0,84	130
NdFeB	920	1,28	340

# Materials magnéticos

## Fluxograma de produção de imã de FeNdB sinterizado

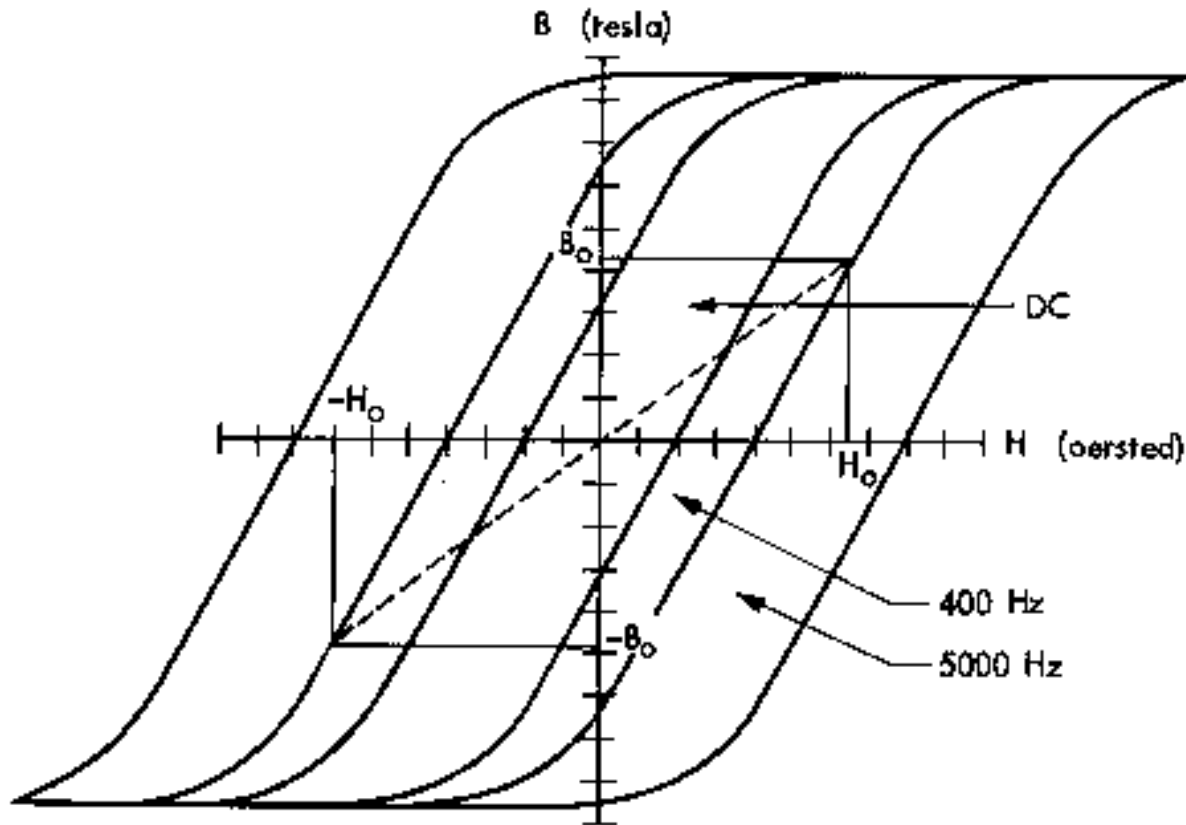


# Materiais magnéticos



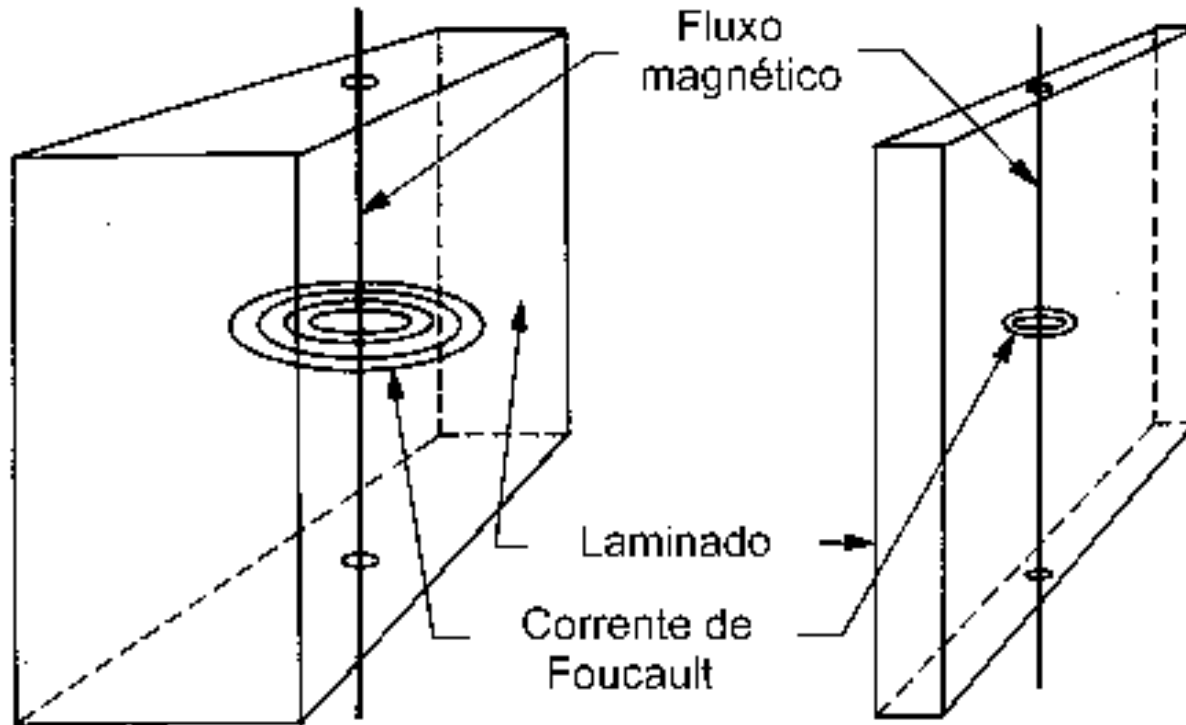
Trabalho realizado por unidade de volume por ciclo de histerese de um material ferromagnético

# Materiais magnéticos



Influência da frequência sobre a curva de histerese

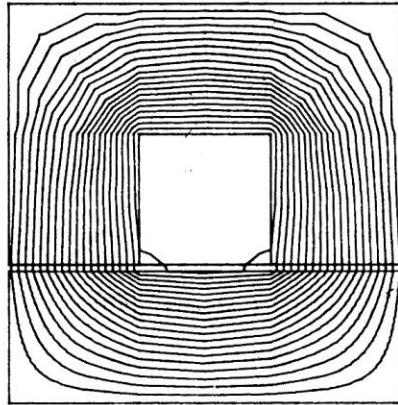
# Materiais magnéticos



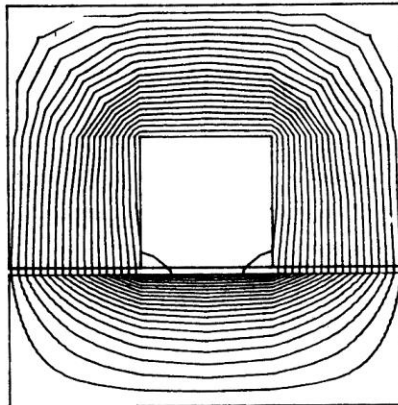
Correntes induzidas pela variação temporal do campo magnético



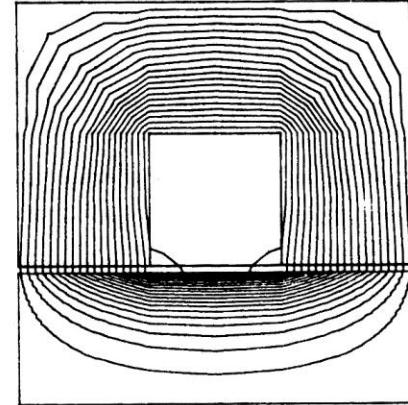
# Efeito Pelicular



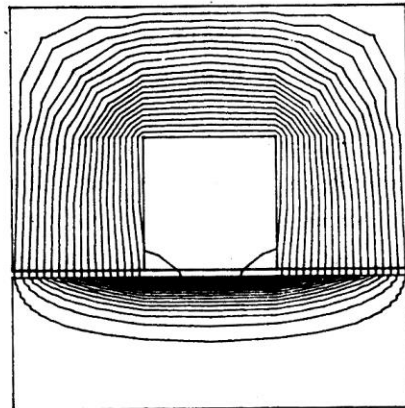
$f = 0$  Hz



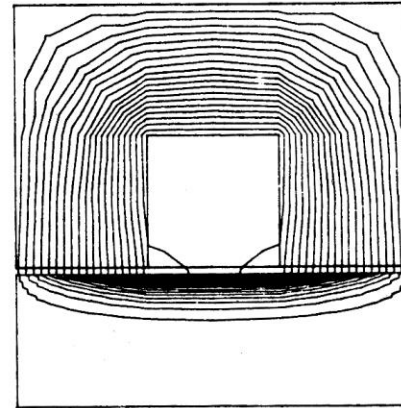
$f = 50$  Hz



$f = 100$  Hz



$f = 250$  Hz

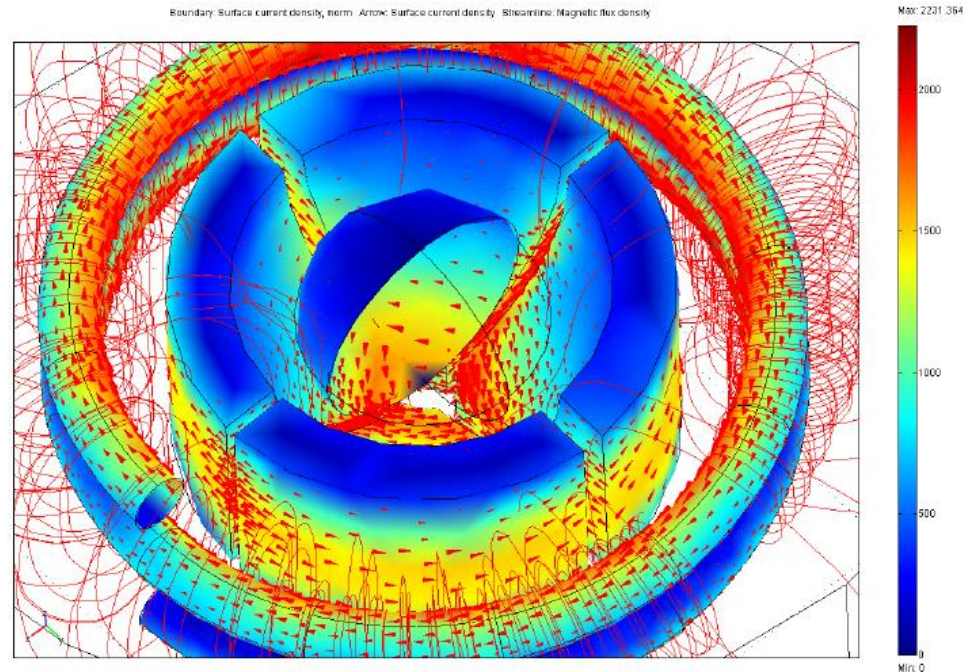


$f = 500$  Hz

# Aquecimento por indução

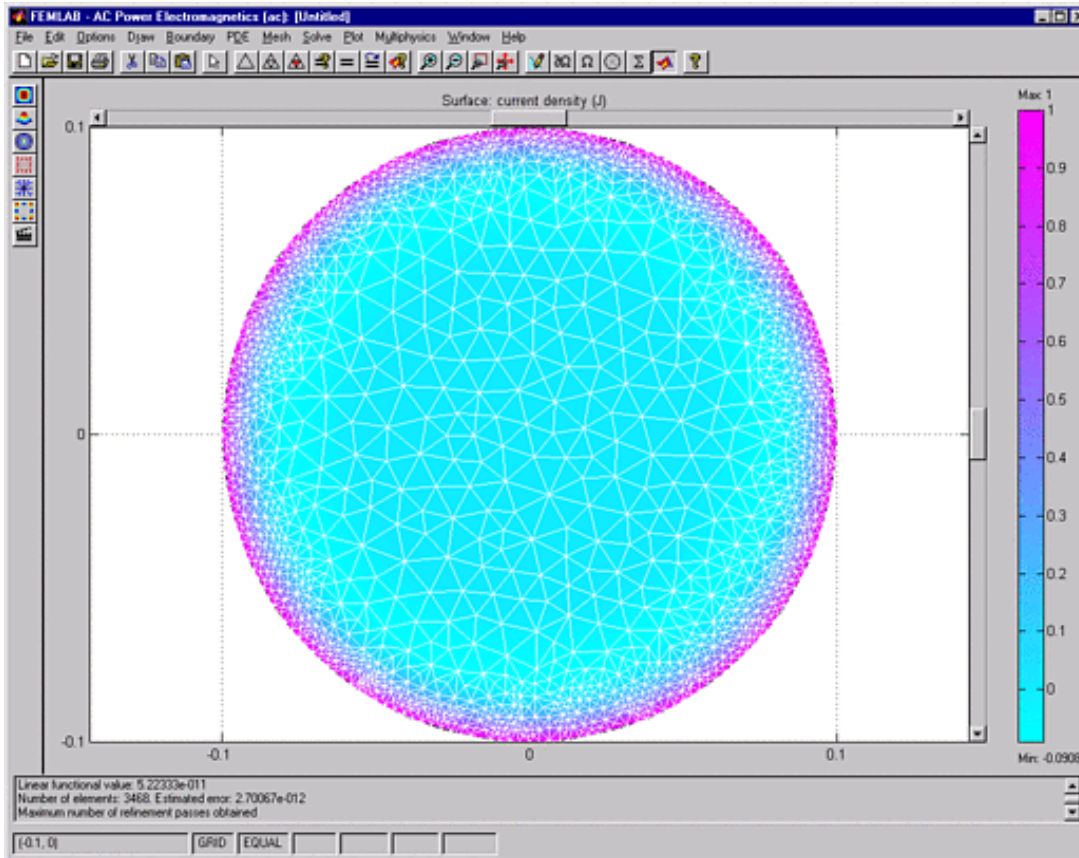


Forno de indução com cadinho frio



Densidade de fluxo magnético e densidade de corrente superficial

# Aquecimento por indução



Lei de indução

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Lei de Ohm

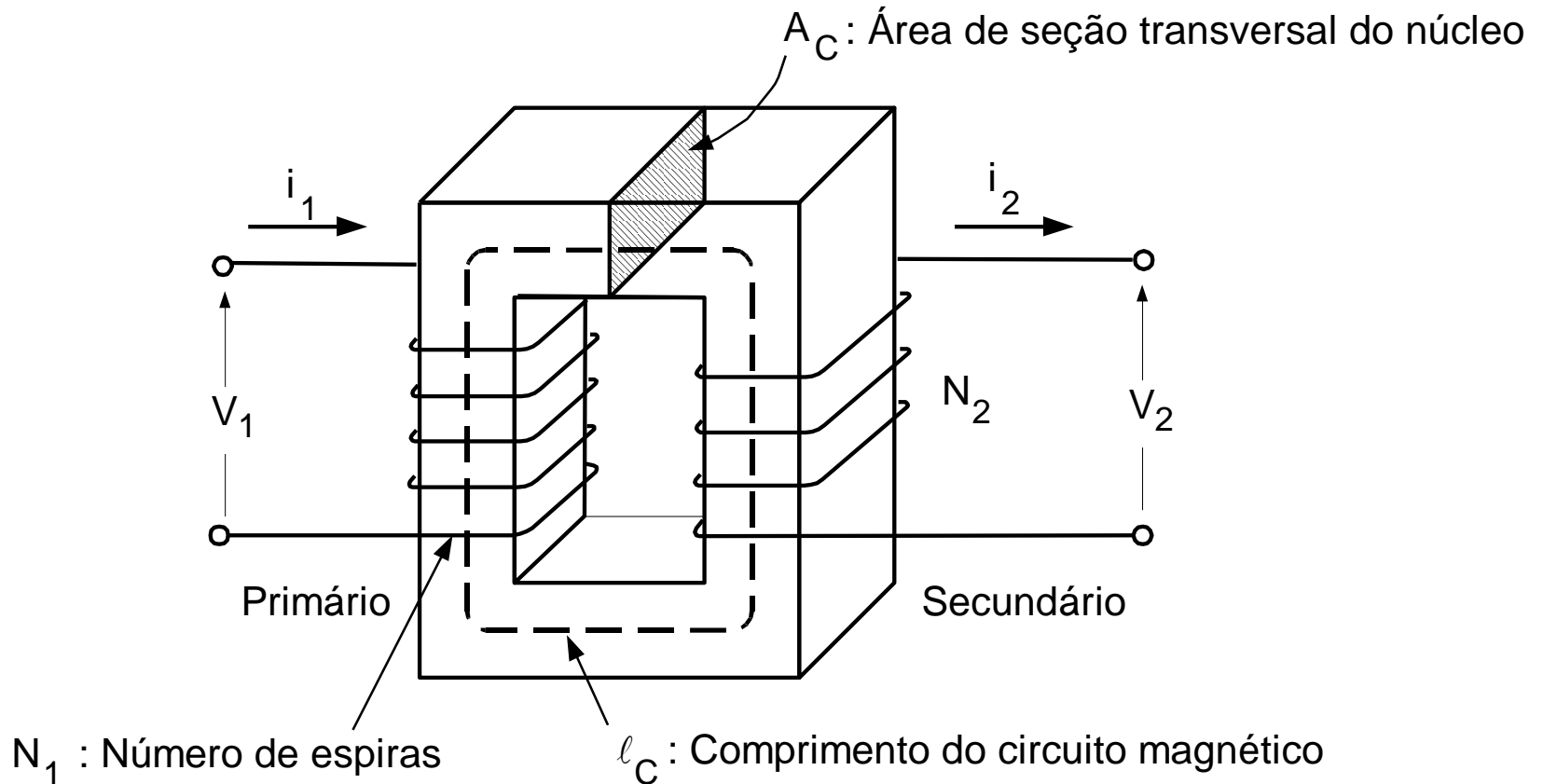
$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

Efeito pelicular

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

Perfil de temperatura em uma barra cilíndrica submetida a campo magnético de rádio-freqüência ( $f = 10$  kHz).

# Circuitos magnéticos

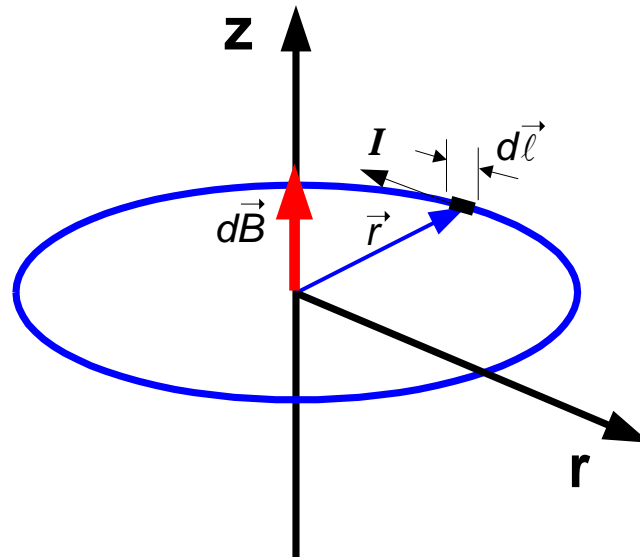


**Circuito de um transformador elétrico**

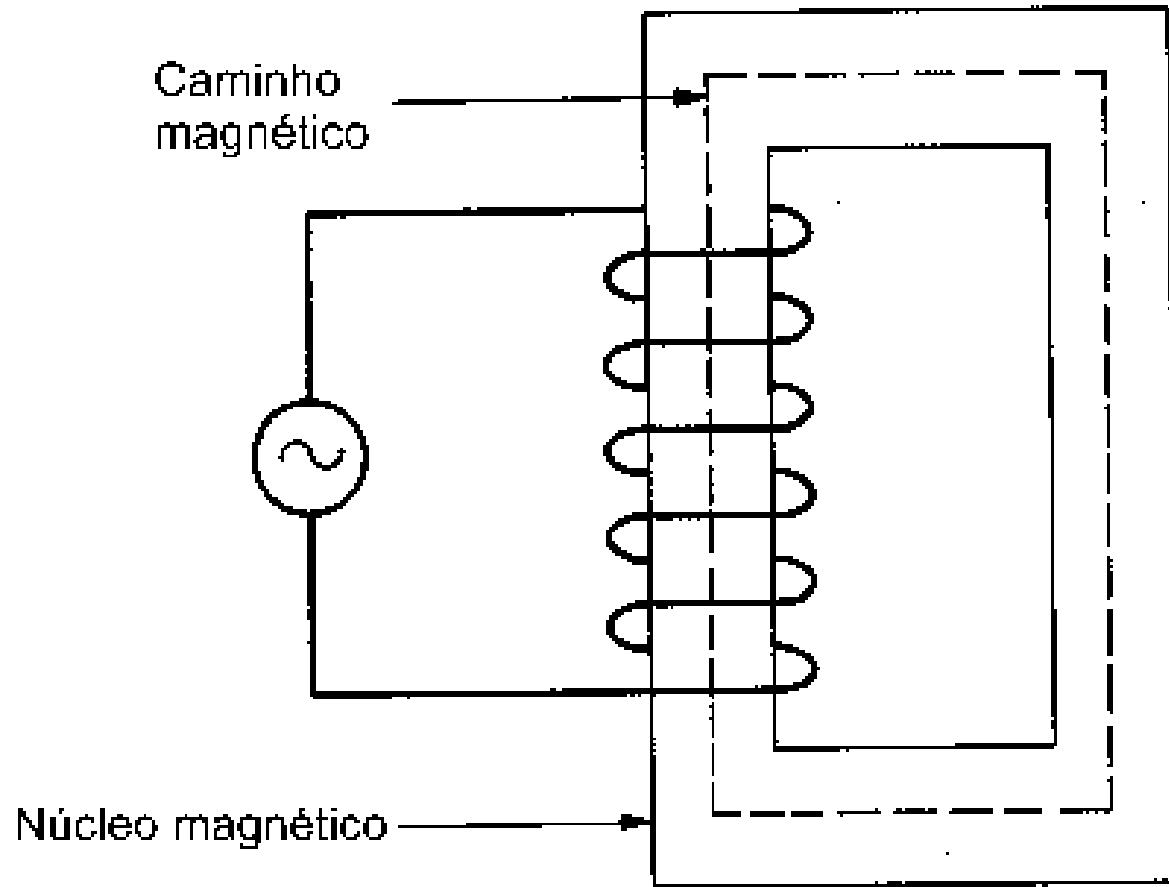
# Circuitos magnéticos

Lei circuital de Ampere

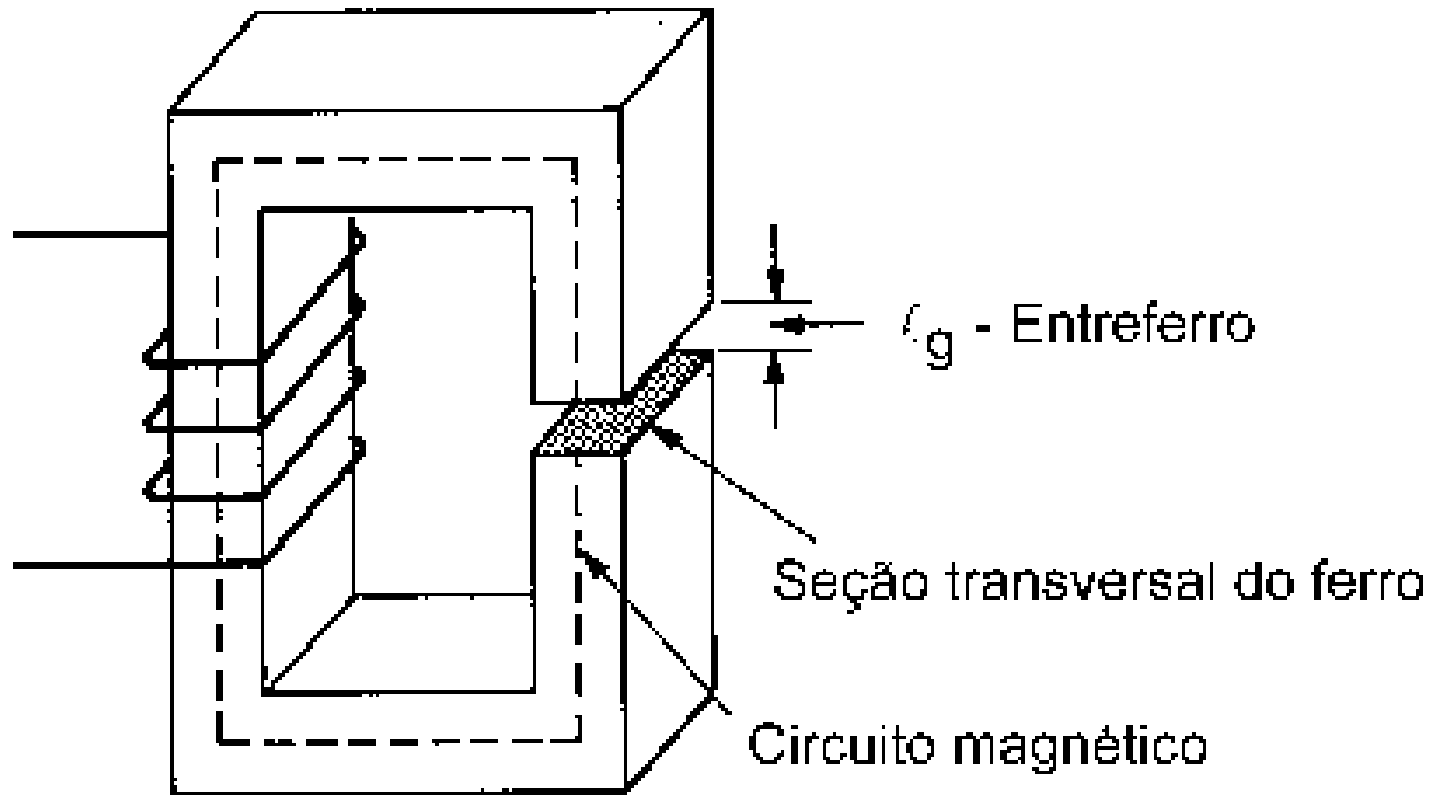
$$\oint_{\ell_C} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = i$$



# Circuitos magnéticos

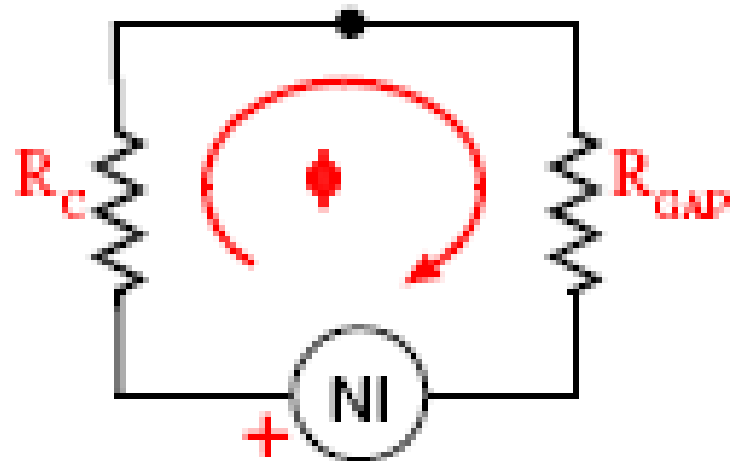
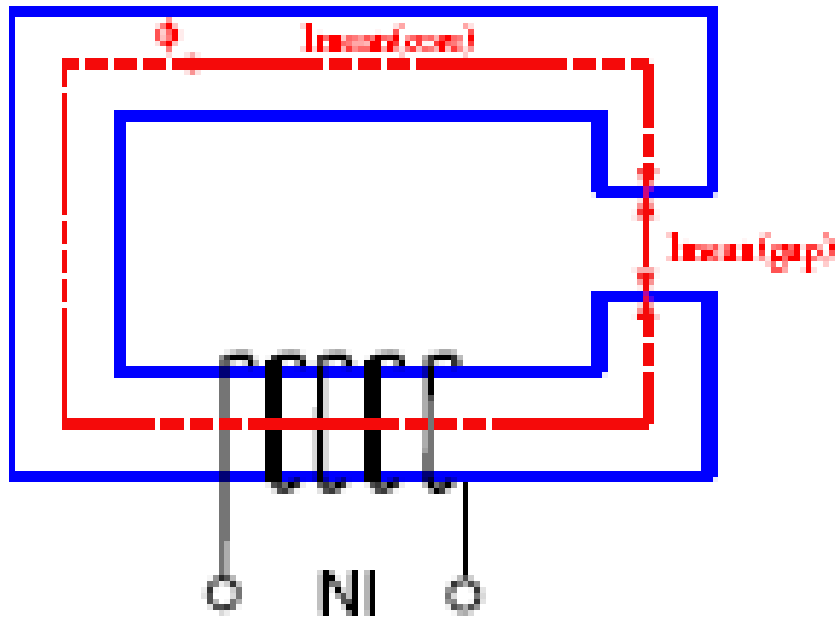


# Circuitos magnéticos



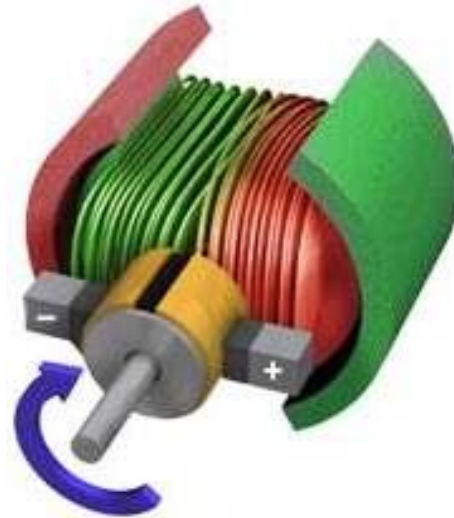
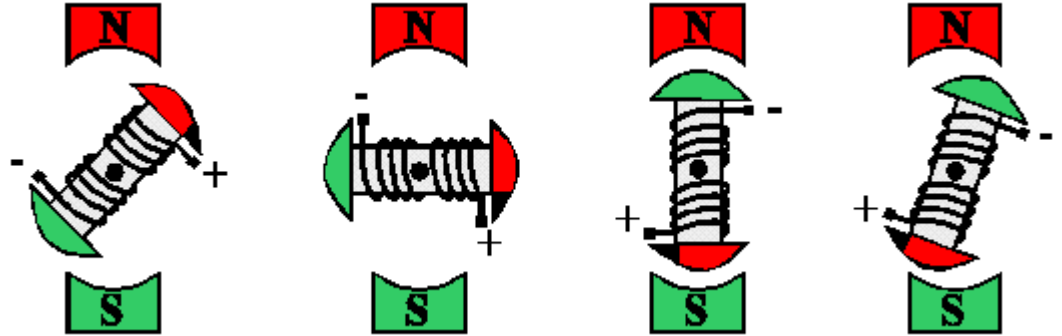
# Circuitos magnéticos

## Circuito eléctrico equivalente





# Motor elétrico



# Motor elétrico de corrente contínua

