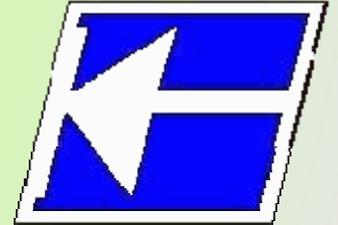


Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Conversores Estáticos



Conversores CC-CC Não-Isolados
Projeto de Indutores em Alta Freqüência

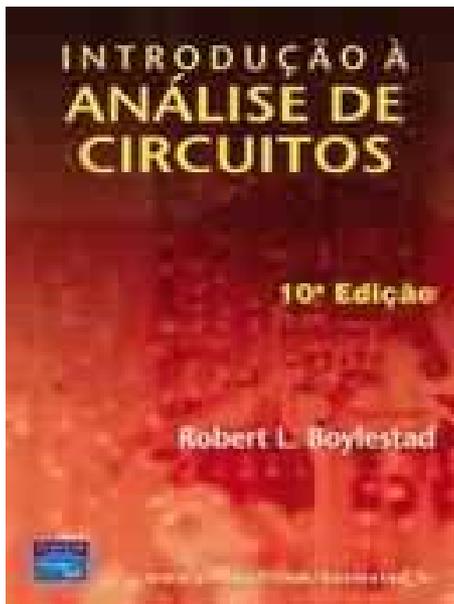
Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, maio de 2008.

Bibliografia para esta aula

Capítulo 9: Choppers DC

1. Projeto de indutores em alta freqüência.



www.cefetsc.edu.br/~petry

Nesta aula

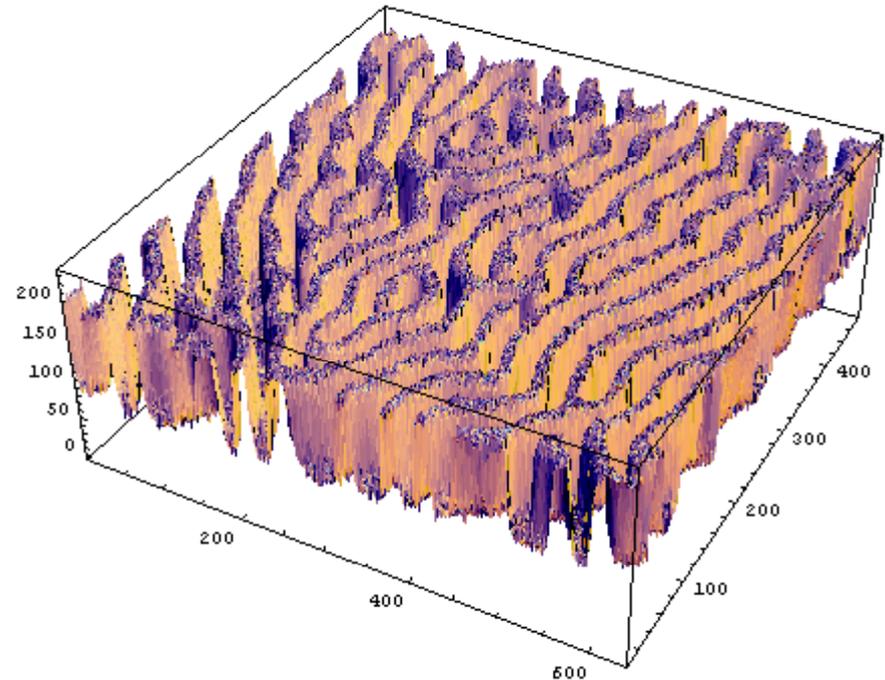
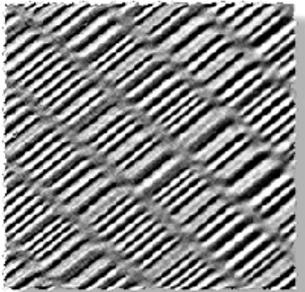
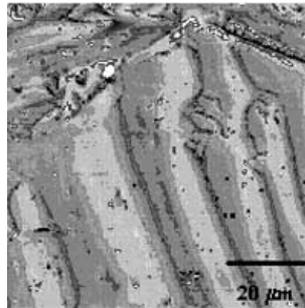
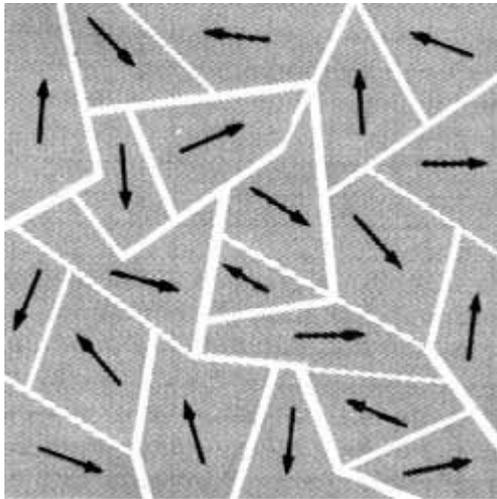
Conversores CC-CC – Projeto de indutores em alta frequência:

1. Revisão de eletromagnetismo;
2. Projeto de indutores com núcleo de ar;
3. Projeto de indutores com núcleo de ferrite.

Domínios magnéticos

Domínios magnéticos:

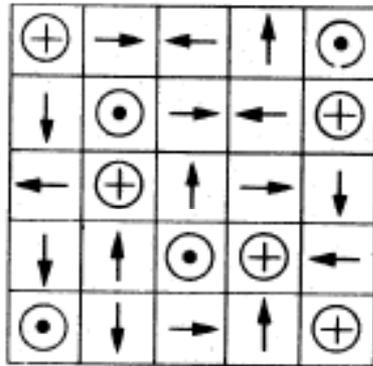
- Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
- Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
- Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.



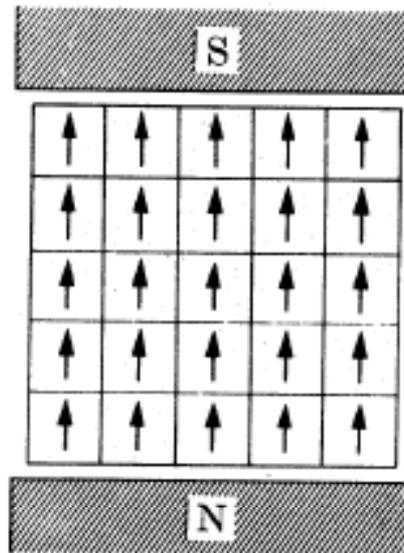
Domínios magnéticos

Alinhamento dos domínios:

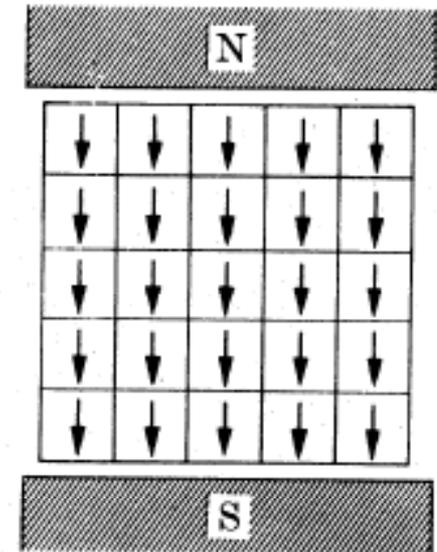
- Aplicando um campo magnético externo.



Desmagnetizado



Magnetizado



Magnetizado ao contrário

Permeabilidade magnética

$$\mu = \frac{B}{H}$$



Permeabilidade absoluta

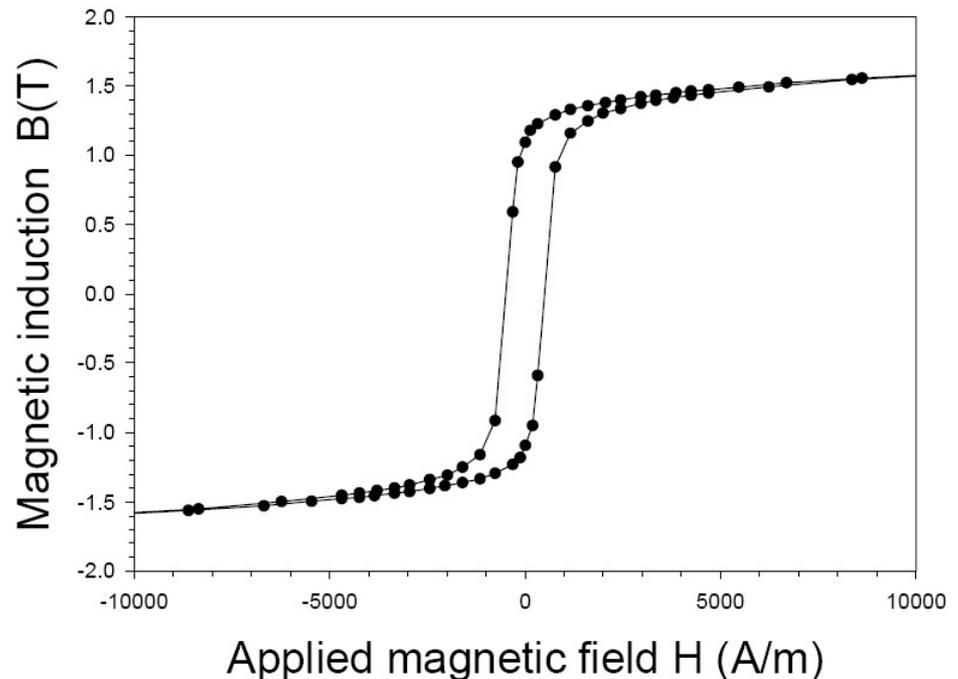
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$



Permeabilidade relativa

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A/m}$$

Permeabilidade do vácuo

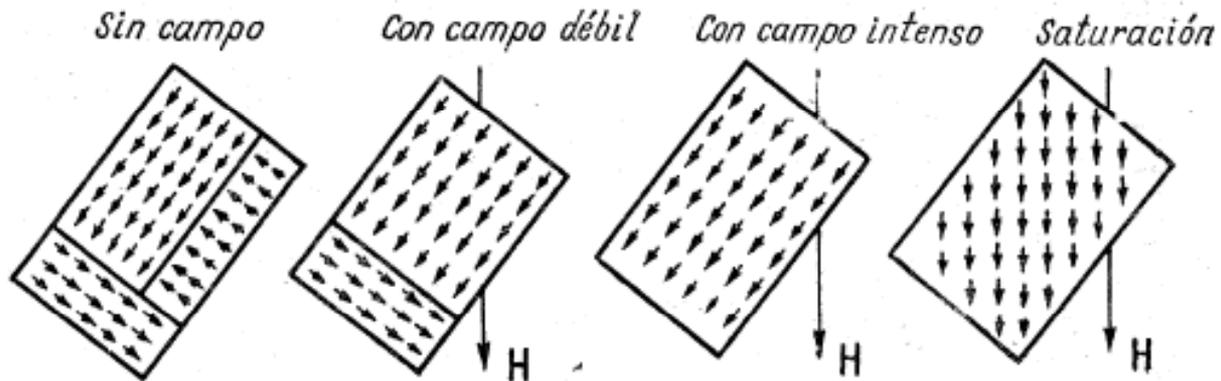
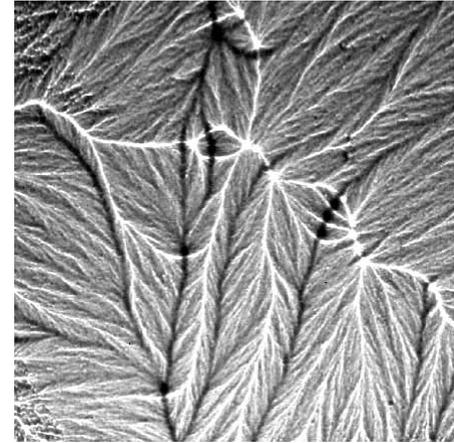
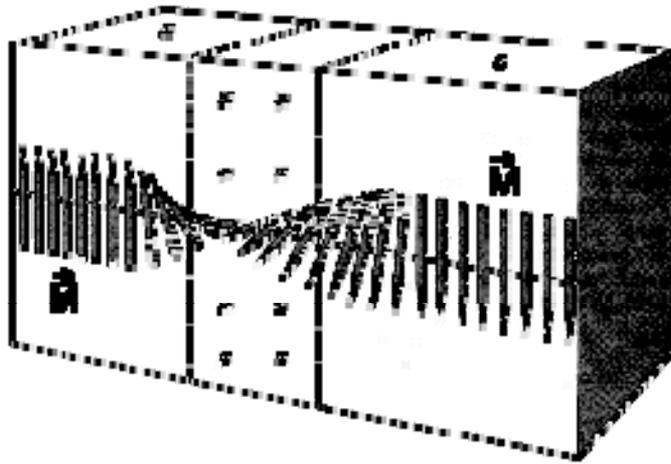


Permeabilidade magnética

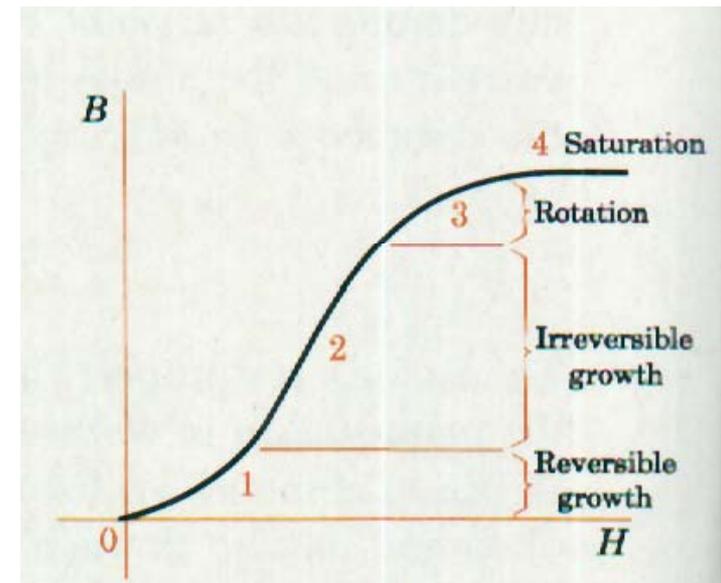
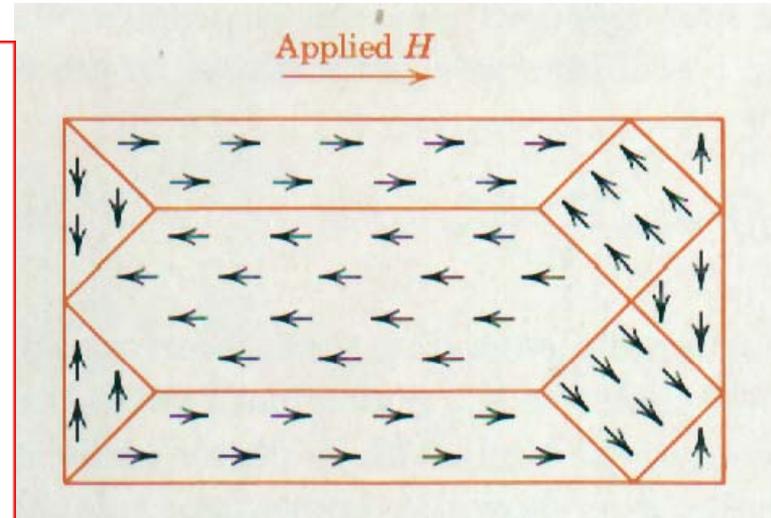
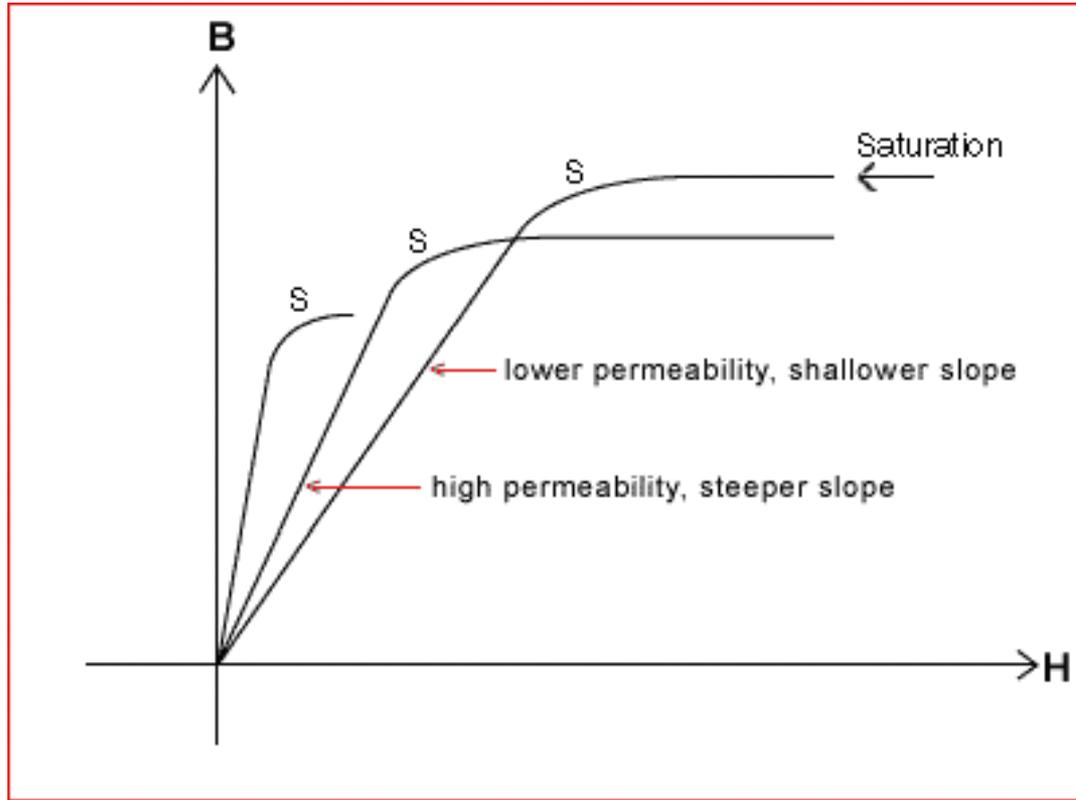
Permeabilidade Relativa, μ_R	Tipo de Material
$\gg 1$	Ferromagnéticos
$\cong 1$	Paramagnéticos
< 1	Diamagnéticos

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

Curvas de magnetização



Curvas de magnetização



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

Efeito de proximidade e efeito pelicular

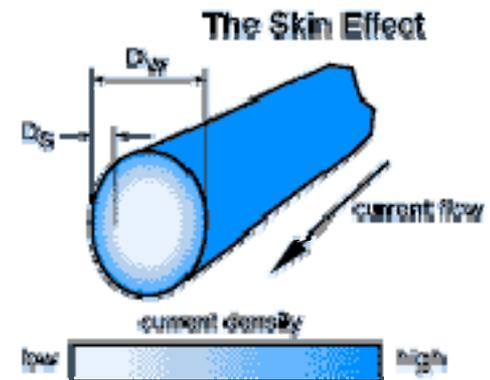
Efeito de proximidade:

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

Efeito pelicular (efeito skin):

-Restringe a secção do condutor para freqüências elevadas.
-Em altas freqüências, 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.

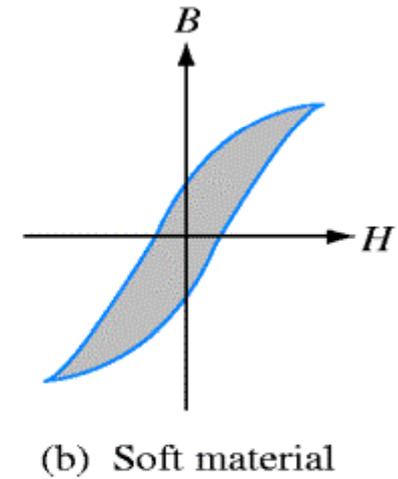
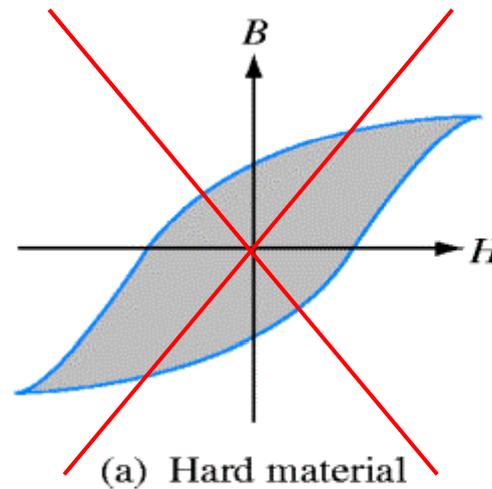
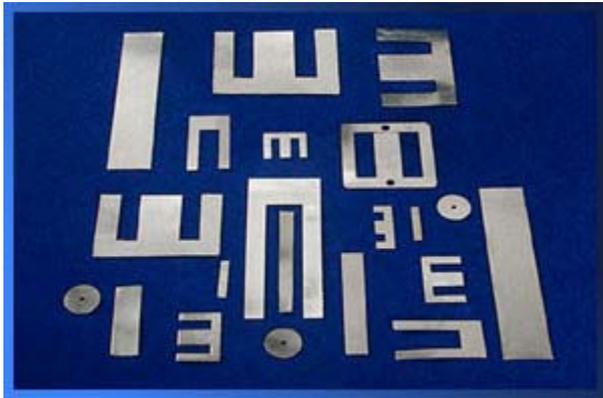
Classificação quanto a susceptibilidade e permeabilidade:

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

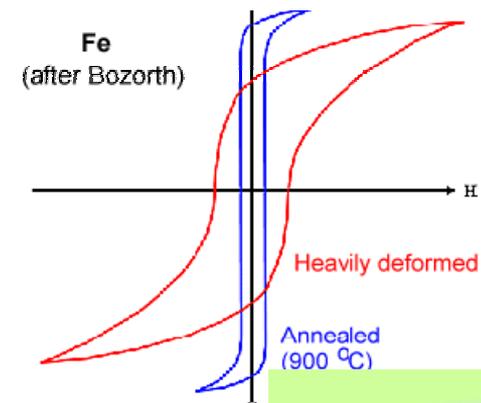
Materiais magnéticos moles

Característica geral:

- Não apresentam magnetismo remanente.



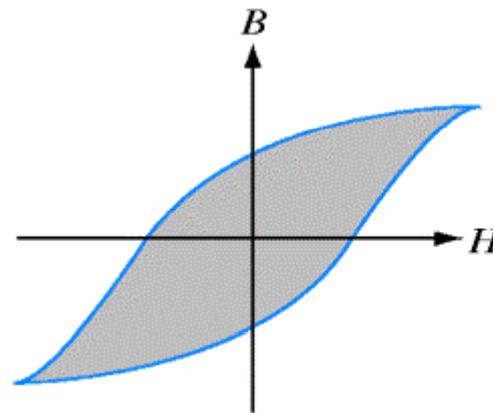
Recozimento →



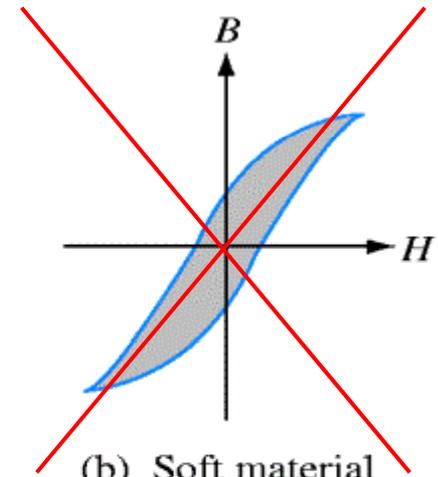
Materiais magnéticos duros

Característica geral:

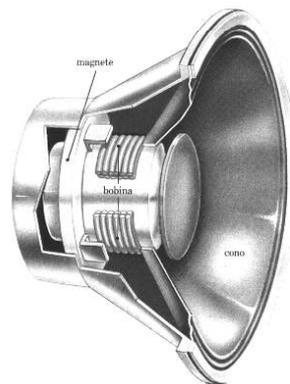
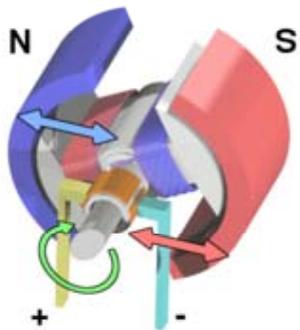
- Apresentam elevado magnetismo remanente.



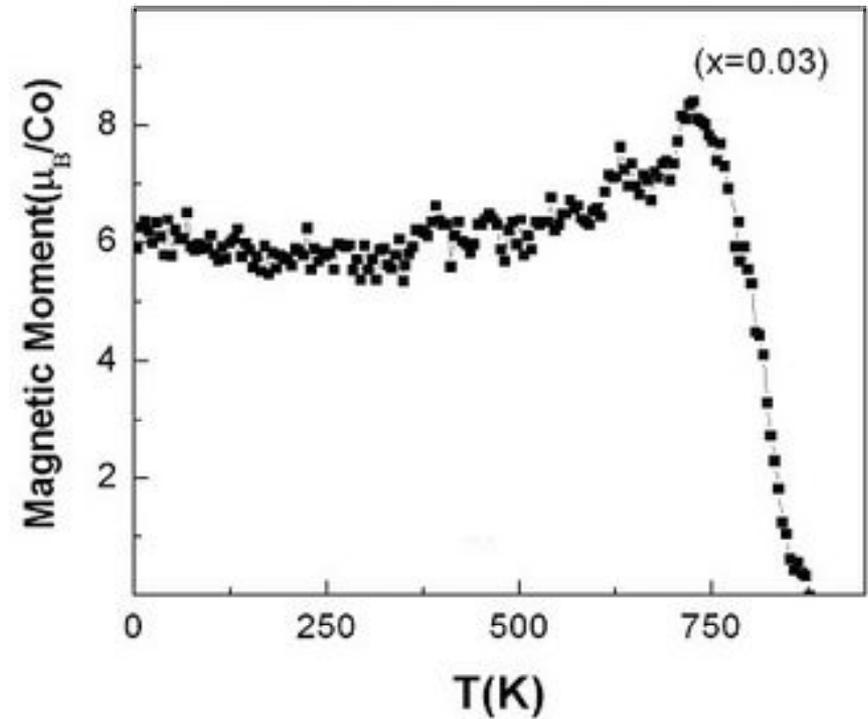
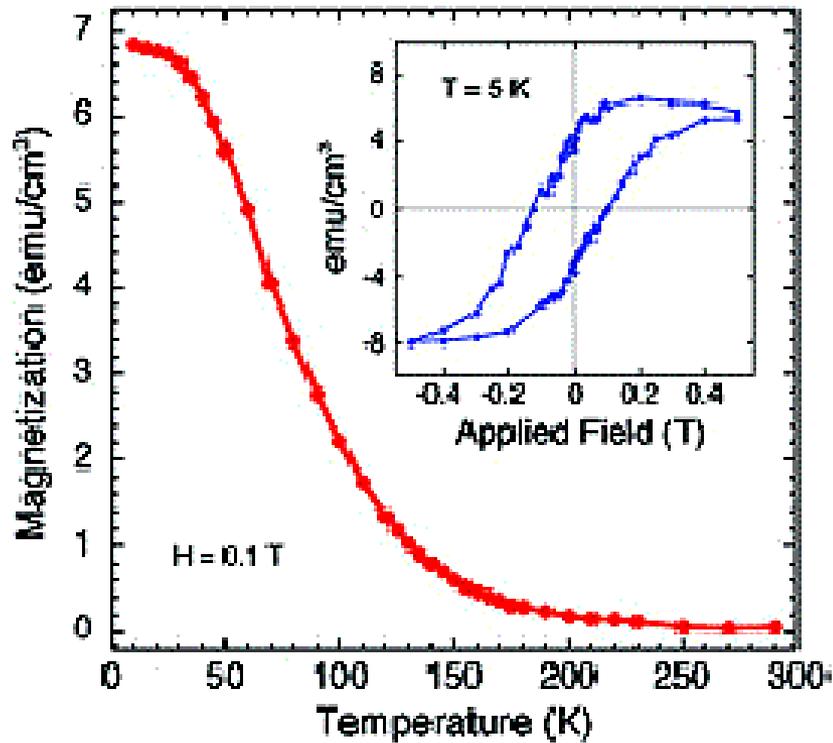
(a) Hard material



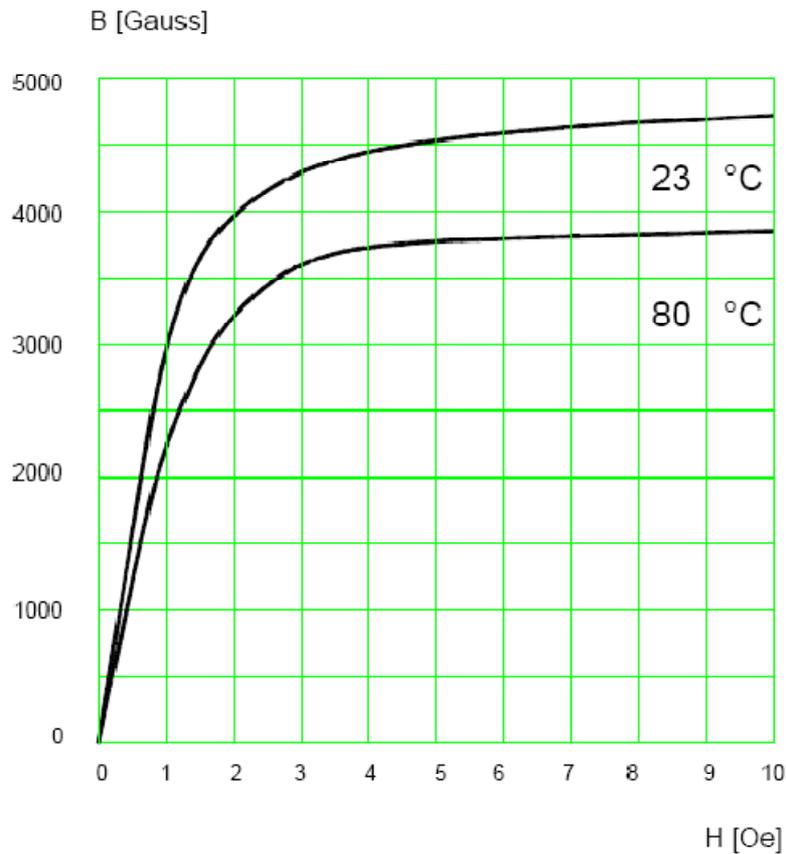
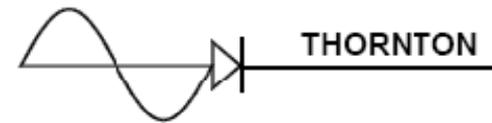
(b) Soft material



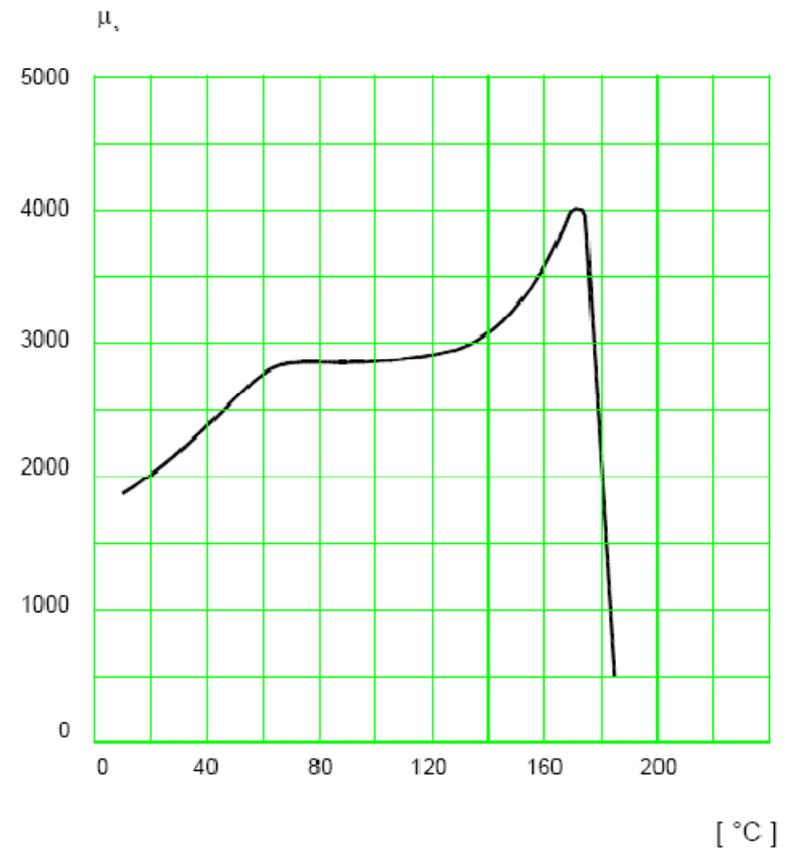
Fluxo magnético versus temperatura



Permeabilidade versus temperatura



Típico $B \times H$



$\mu \times$ Temperatura

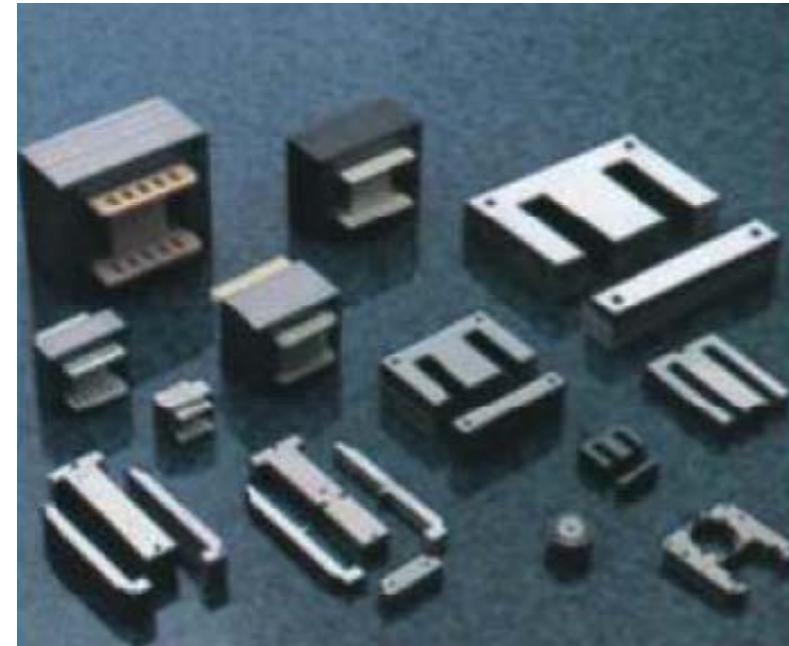
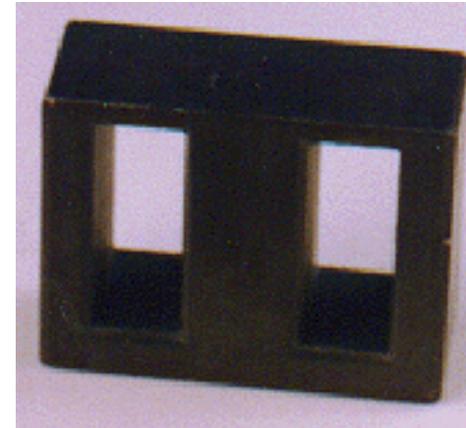
Núcleos magnéticos

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.



Materiais empregados em núcleos magnéticos

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

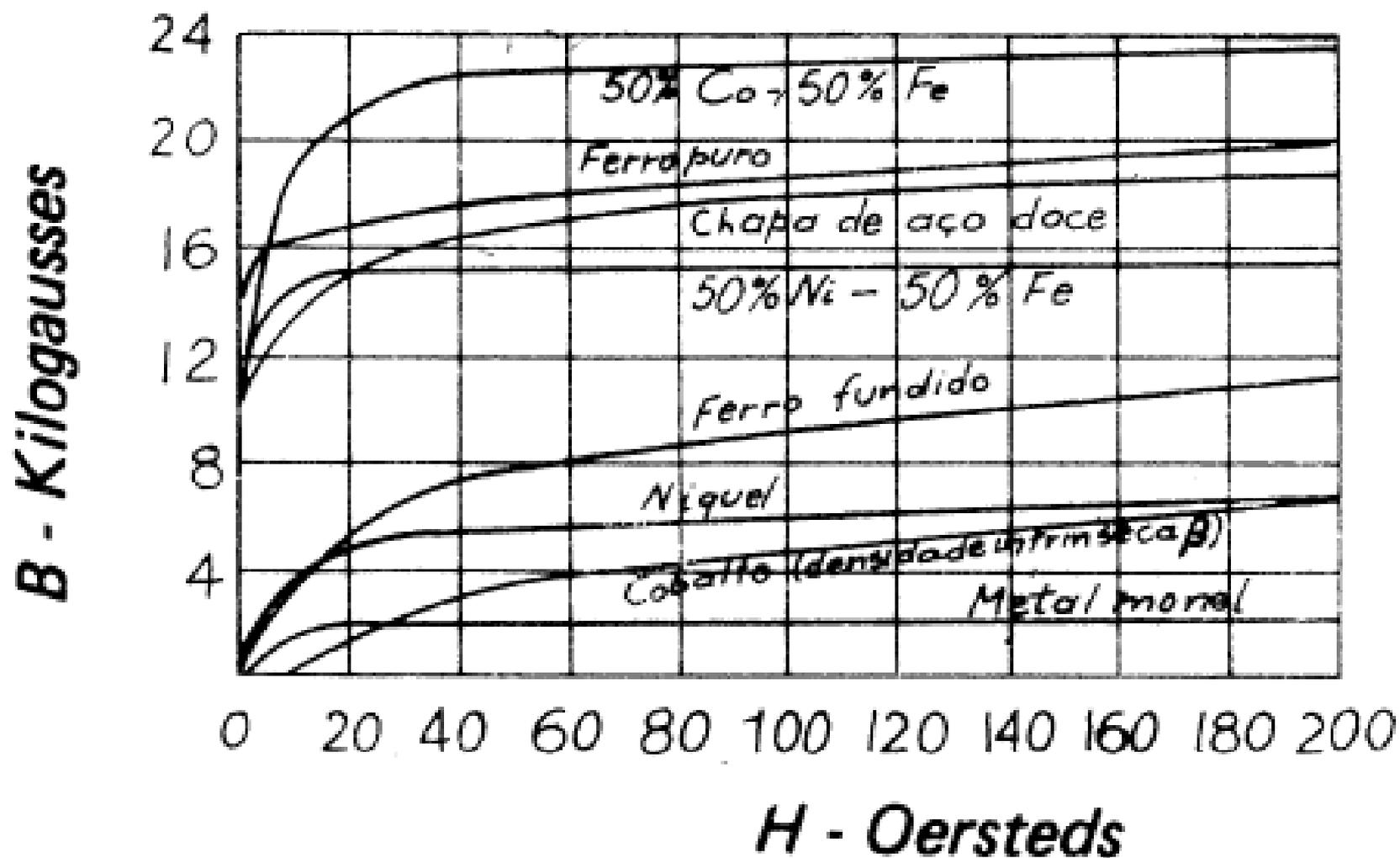
Ligas de ferro-silício: até 6,5% de silício, mas se torna quebradiço. Máquinas estáticas usam mais Si do que máquinas girantes.

Ímãs 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.

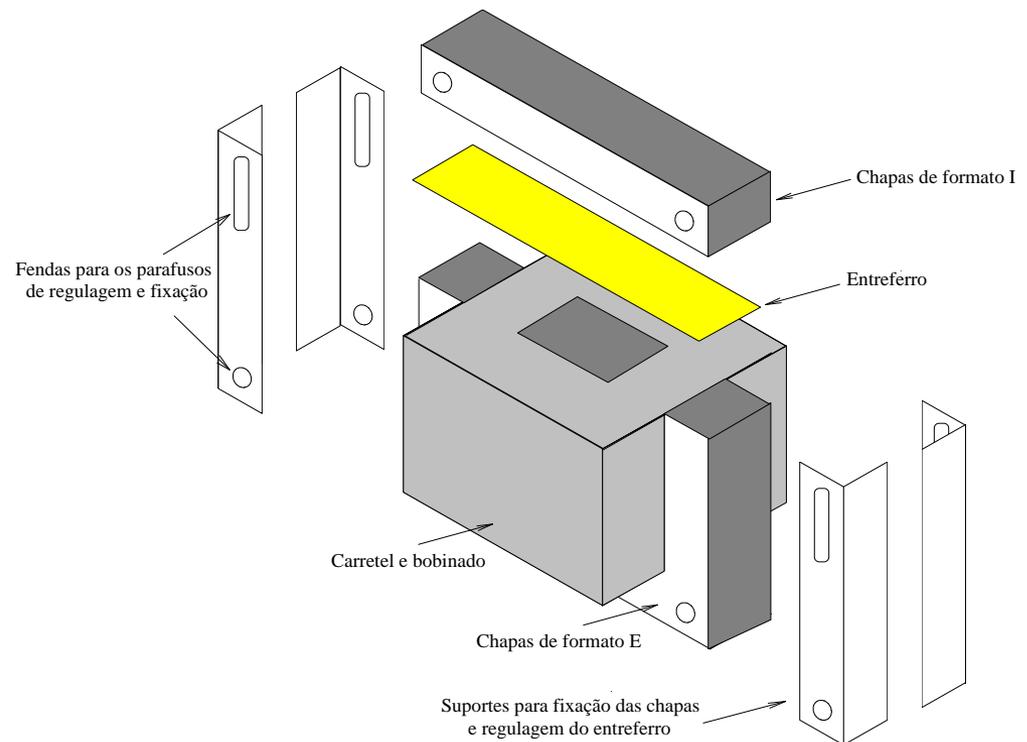
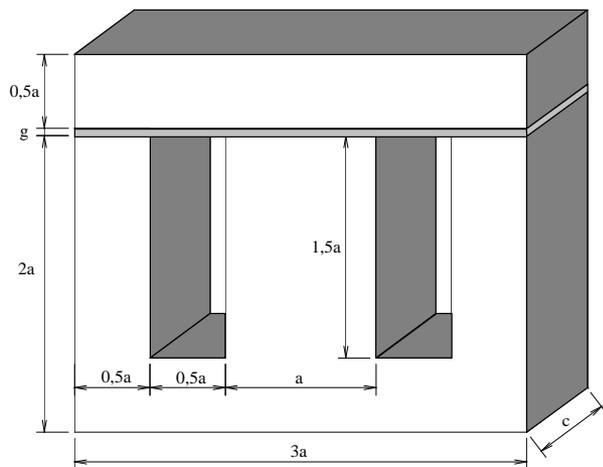
Materiais empregados em núcleos magnéticos



Núcleos magnéticos laminados

Perdas magnéticas em lâminas de Fe-Si:

- Chapas de cristais não orientados – 2,7% de silício
 - @ 400 Hz; 1,3 T = 7,5 W/kg;
- Chapas de cristais orientados – 3,1% de silício
 - @ 400 Hz; 1,3 T = 2 W/kg.



Núcleos magnéticos laminados



Aço Silício GO

Características magnéticas típicas

AÇOS SILICIOSOS DE GRÃO ORIENTADO

O aço silicioso GO foi desenvolvido para alcançar baixas perdas e elevada permeabilidade magnética, requeridas para maior eficiência dos equipamentos e economia de energia elétrica. Aplicado basicamente na fabricação dos núcleos de transformadores, também é utilizado em reatores de potência, hidrogeradores e turbogeradores. A principal característica deste produto é apresentar excelentes propriedades magnéticas na direção de laminação.

Designação Acesita	Espessura Thickness (mm)	Perda magnética Core Loss (W/Kg)				Indução magnética mínima (T)			
		1,5T		1,7T		B800	B2500	B5000	B10000
		50Hz	60Hz	50Hz	60Hz				
E004	0,27	0,78	1,02	1,13	1,47	1,85	1,92	1,96	1,97
E005	0,30	0,83	1,09	1,18	1,55	1,85	1,93	1,97	1,98



<http://www.acesita.com.br>

Núcleos magnéticos laminados



ACESITA
ACESITA S.A. ASSOCIADA À ARCELOR

Aço Silício GNO

Características Magnéticas Típicas



AÇOS SILICIOSOS DE GRÃO NÃO ORIENTADO

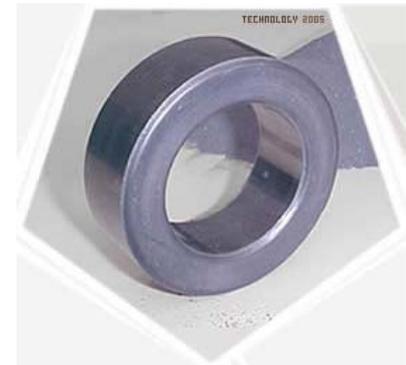
O aço silicioso GNO totalmente processado apresenta suas propriedades magnéticas plenamente desenvolvidas.

O produto possui excelente valor de permeabilidade, baixas perdas magnéticas e pode ser fornecido com revestimento isolante.

É matéria prima utilizada na fabricação dos núcleos de geradores e motores elétricos, reatores para sistemas de iluminação, medidores de energia, compressores herméticos para geladeiras e freezers, além de outros equipamentos elétricos.

Espessura Thickness (mm)	Designação Acesita Acesita Grade	Perda magnética Core Loss (W/Kg)				Indução Magnética Magnetic Induction (T)		
		1,0T		1,5T		B2500	B5000	B10000
		50Hz	60Hz	50Hz	60Hz			
0,64	E230	1,80	2,34	4,10	5,30	1,59	1,67	1,79
	E185	1,76	2,29	4,00	5,23		1,68	
	E170	1,71	2,23	3,95	5,14	1,60	1,69	1,80
	E157	1,59	2,09	3,51	4,63			
0,50	E233*	1,40	1,79	3,09	3,98	1,66	1,75	1,86
	E230	1,55	1,98	3,57	4,57	1,60	1,69	1,80
	E185	1,45	1,85	3,35	4,29			
	E170	1,35	1,72	3,07	3,91	1,59	1,68	1,79
	E157	1,29	1,65	2,96	3,80			
	E145	1,27	1,62	2,93	3,73	1,58	1,67	1,78
	E137	1,24	1,58	2,85	3,65			
	E125	1,07	1,37	2,70	3,43			
	E115	1,04	1,34	2,59	3,32			
	0,35	E110	1,01	1,30	2,51	3,23	1,54	1,63
E105		0,94	1,25	2,42	3,11			
E170		1,15	1,44	2,93	3,81	1,62	1,71	1,83
E157		1,14	1,43	2,87	3,58			
E145		1,08	1,35	2,82	3,52	1,59	1,70	1,81
E137		1,02	1,28	2,66	3,34			
E125	0,94	1,18	2,50	3,13	1,68			

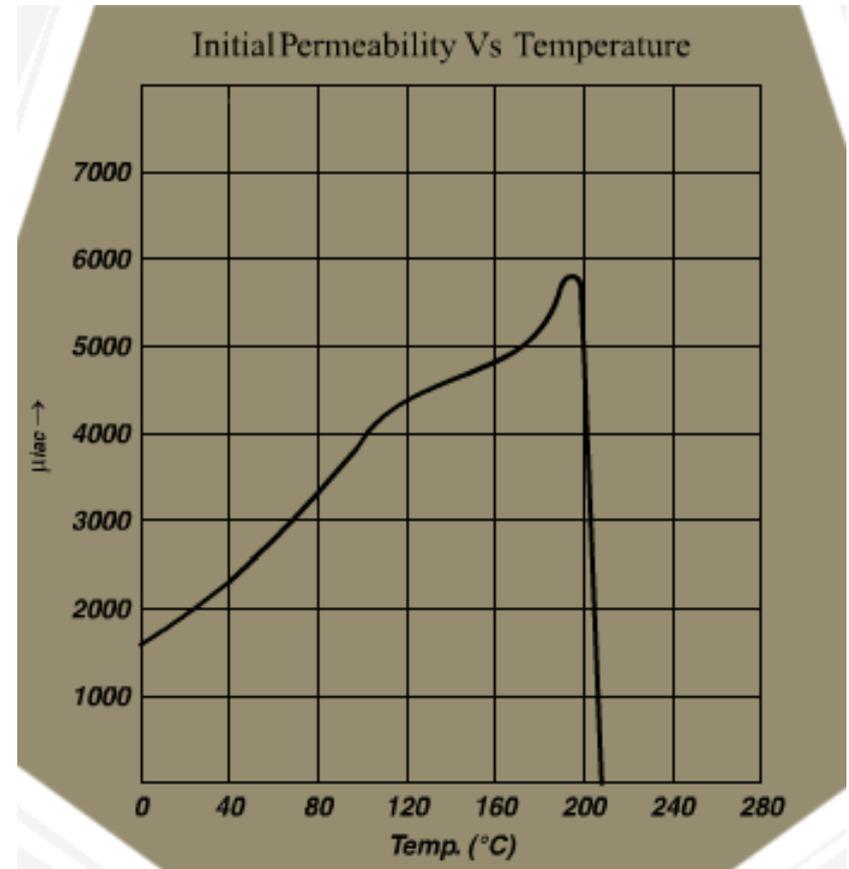
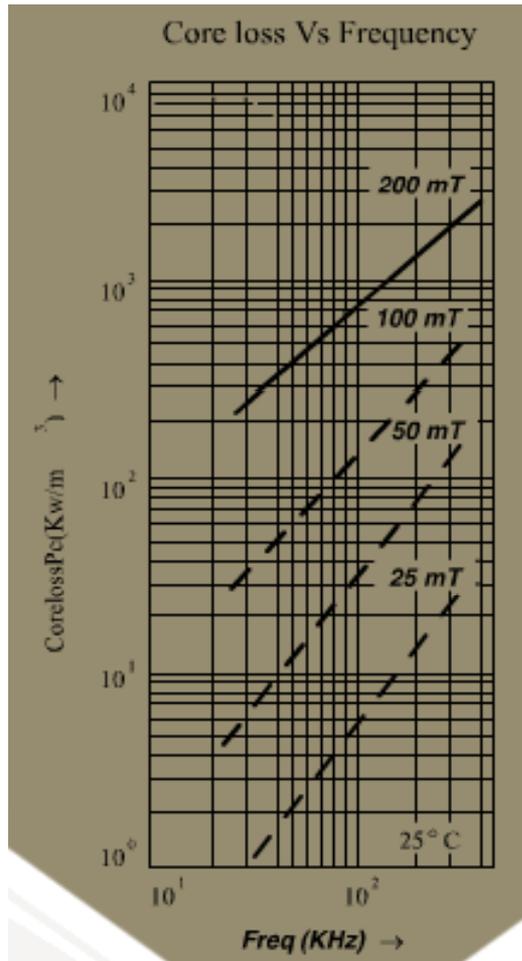
Núcleos magnéticos compactos



Núcleos magnéticos compactos



Ferrite



Núcleos magnéticos compactos

Iron Powder

Material	Permeability	Density	Material Application	Application Exemple
330	30	6.2	High frequency chokes	High frequency differential EMI chokes
350	50	6.7	Medium frequency chokes	No Breaks Differential EMI chokes
370	70	7.0	Low frequency chokes	Light Dimmer chokes

Iron Powder	AL ^{+5/-15%} [nH/N ²]	OD [mm]	ID [mm]	Ht [mm]
MMT330T2707	27.0	26.9	14.5	6.5
MMT350T2707	44.5	26.9	14.5	6.5
MMT370T2707	62.5	26.9	14.5	6.5
MMT330T2711	37.0	26.9	14.5	11.1
MMT350T2711	62.0	26.9	14.5	11.1
MMT370T2711	87.0	26.9	14.5	11.1
MMT370T2715	114.0	26.9	14.5	14.6
MMT330T4718	67.5	46.7	24.1	18.0

Ferrite



part number	AL ^{±20%} [nH/N ²]	OD [mm]	ID [mm]	Ht [mm]
MMT190T2510	6000	25.0	15.0	10.0
MMT138T4514	2800	45.0	28.0	14.0
MMT138T5020	4200	50.0	30.0	20.0
MMT138T5618	4200	56.0	32.0	18.0
MMT138T6325	5300	63.0	38.0	25.0
MMT190T6325	15100	63.0	38.0	25.0

A diferent size? Please [Contact](#)

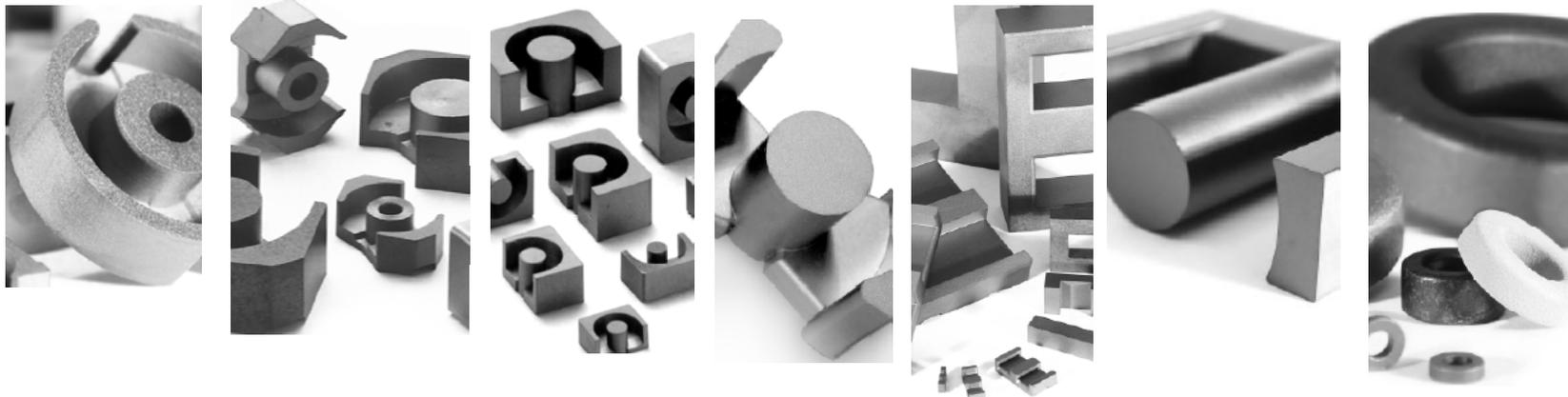


Núcleos magnéticos compactos

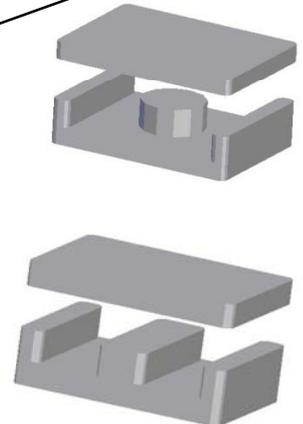
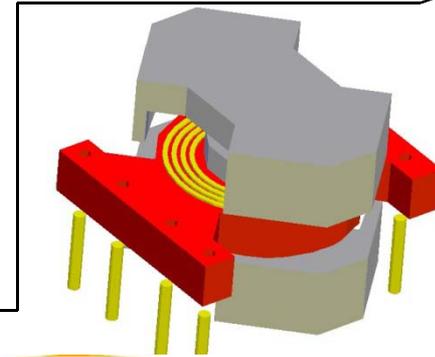
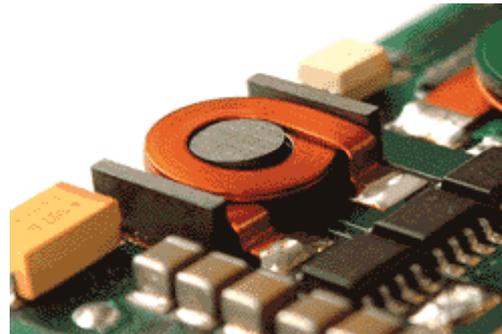
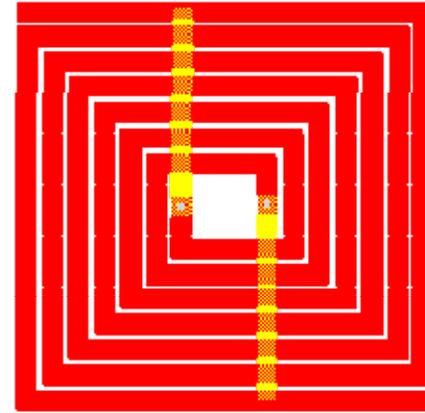
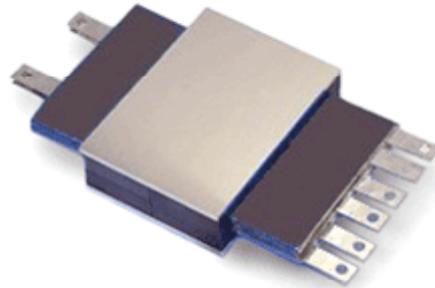


TABLE 1: FERRITE CORE COMPARATIVE GEOMETRY CONSIDERATIONS

	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

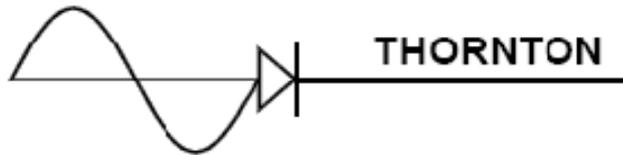


Núcleos magnéticos compactos



Núcleos planares

Núcleos magnéticos compactos

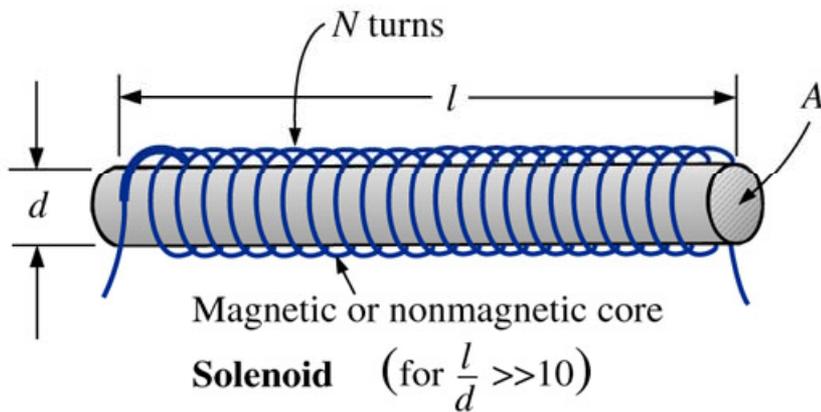


CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS THORNTON			
Material	IP 6	IP 12R	IP12E
Permeabilidade Inicial μ_i	2000 \pm 25%	2100 \pm 25%	2300 \pm 25%
Fator de Dissipação (Rel.) $f = 10$ [KHz]	-----	-----	-----
$\tan \delta / \mu_i \cdot 10^{-6}$ $f = 100$ [KHz]	-----	-----	-----
Temperatura de Curie [°C]	≥ 165	≥ 210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

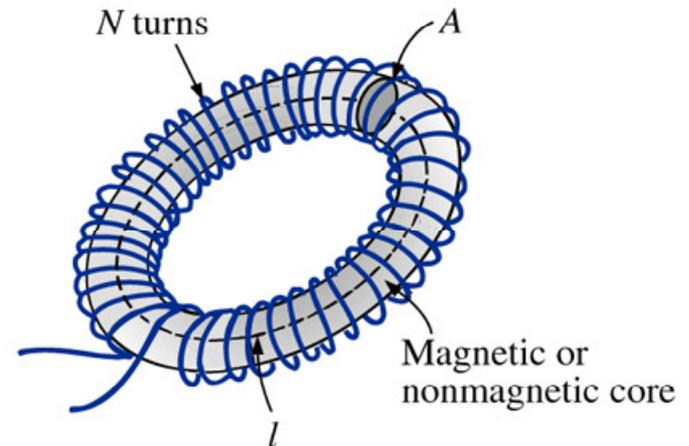
Auto-Indutância

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).

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



(a)

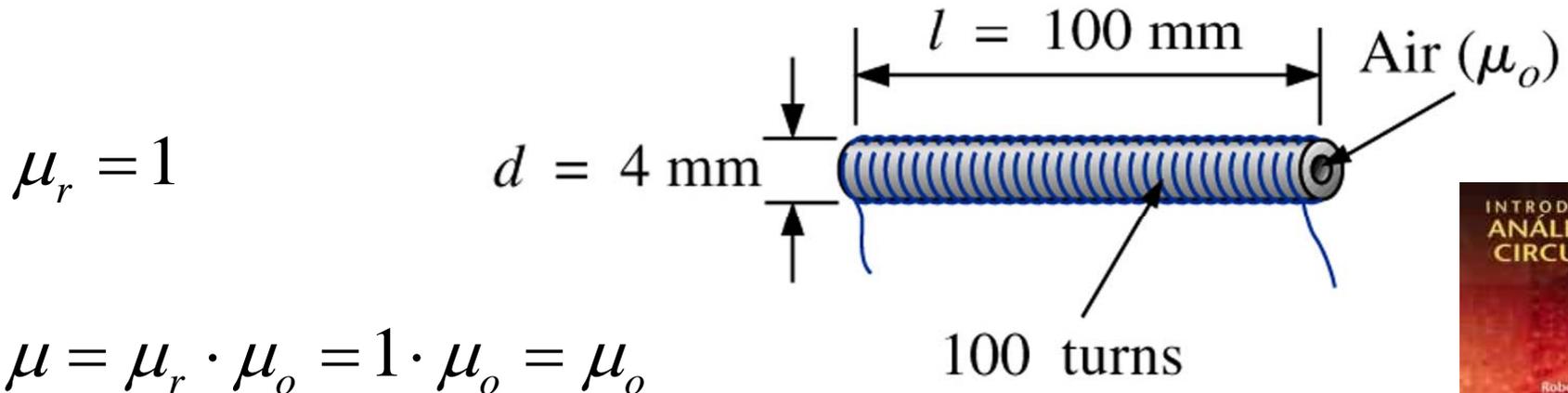


Toroid

(b)

Auto-Indutância

Exemplo 12.1: Determine a indutância da bobina de núcleo de ar da figura abaixo:



$$\mu_r = 1$$

$$d = 4 \text{ mm}$$

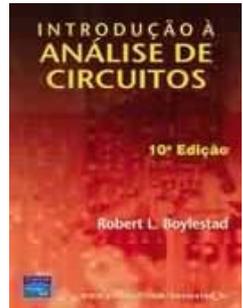
$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 = 1 \cdot \mu_0 = \mu_0$$

100 turns

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2}{4}$$

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

$$A = 12,57 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad L = \frac{100^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 12,57 \cdot 10^{-6}}{0,1} = 1,58 \mu\text{H}$$



Projeto de indutores

O projeto de um indutor depende:

- Da frequência de operação;
- Da corrente no mesmo;
- Do regime de trabalho;
- Do material utilizado para o núcleo;
- Entre outros....

Projeto de indutores com núcleo de ar

Bobinas longas:

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{\ell} \longrightarrow \boxed{N = \sqrt{\frac{L \cdot \ell}{\mu \cdot A}}}$$

N - número de espiras da bobina indutora

L - Indutância da bobina indutora, [Henry, H];

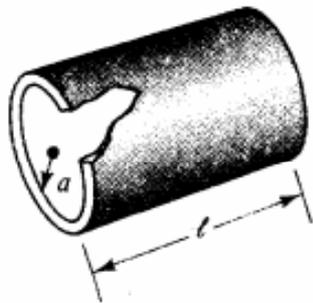
A - área das espiras da bobina (área do núcleo), [metro quadrado, m²];

ℓ - comprimento longitudinal da bobina, [metro, m];

μ - permeabilidade magnética do meio no núcleo da bobina [Henry por metro, H/m];

Projeto de indutores com núcleo de ar

Bobina de camada única com núcleo de ar:



$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (9 \cdot a + 10 \cdot \ell)}{39,5 \cdot a^2}}$$

N - número de espiras da bobina indutora;

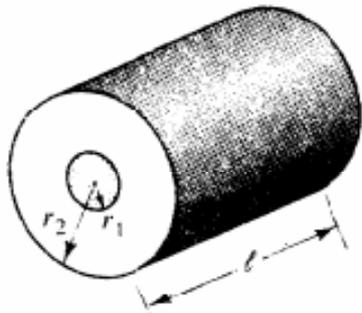
L - indutância desejada para o indutor, [Micro Henry, μH];

ℓ - comprimento longitudinal da bobina [metro, m];

a - raio do núcleo (raio das espiras), [metro, m]

Projeto de indutores com núcleo de ar

Bobina de diversas camadas com núcleo de ar:



$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (6r_1 + 9\ell + 10(r_2 - r_1))}{31,6 \cdot r_1^2}}$$

N - número de espiras da bobina indutora;

L - indutância desejada para o indutor, [Micro Henry, μH];

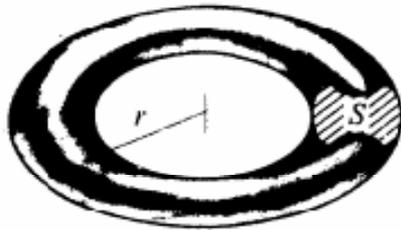
ℓ - comprimento longitudinal da bobina, [metro, m];

r_1 - raio interno da bobina (raio das espiras interiores), [metro, m];

r_2 - raio externo da bobina (raio das espiras exteriores), [metro, m].

Projeto de indutores com núcleo de ar

Núcleos toroidais:



$$N = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L}{\mu \cdot A}}$$

N - número de espiras da bobina indutora;

L - indutância desejada para o indutor, [Henry, H];

r - raio médio do toroide¹⁴, [metro, m];

μ - permeabilidade magnética do material do núcleo, [Henry por metro, H/m];

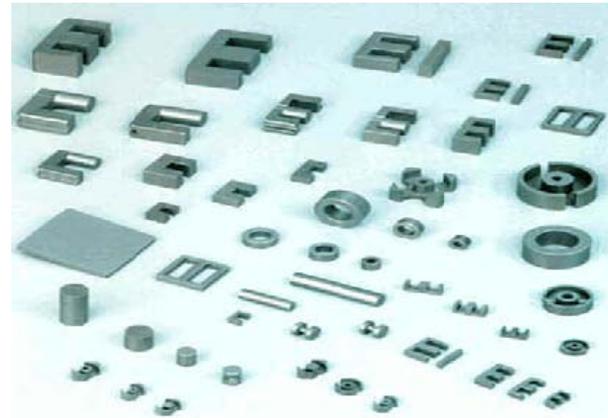
A - área da seção transversal do núcleo toroide (área das espiras da bobina), [metro quadrado, m²]

Projeto de indutores de alta frequência com núcleo

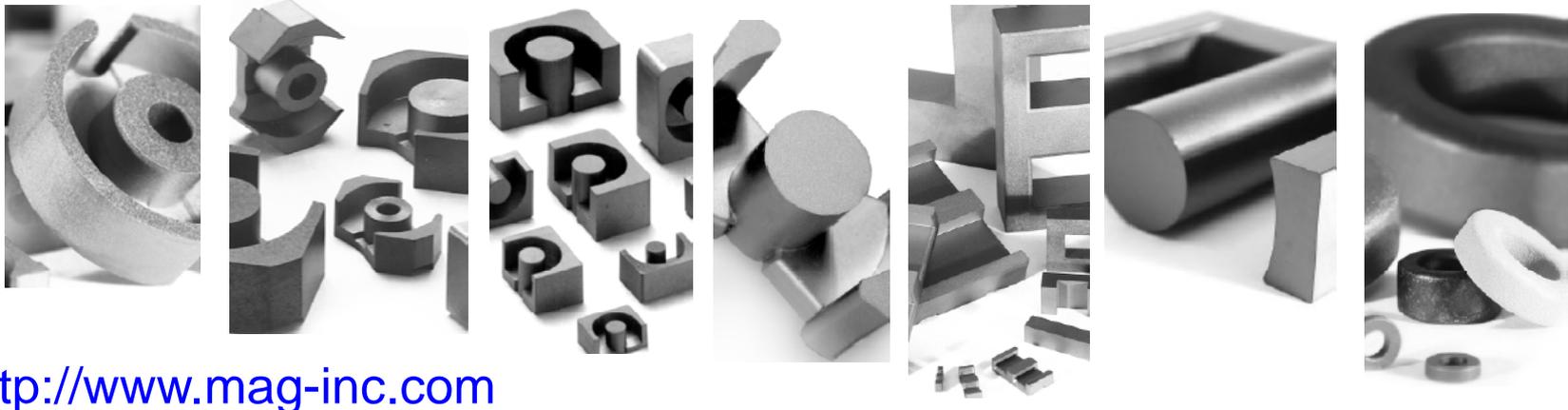
Núcleos usados na implementação de indutores de HF:



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



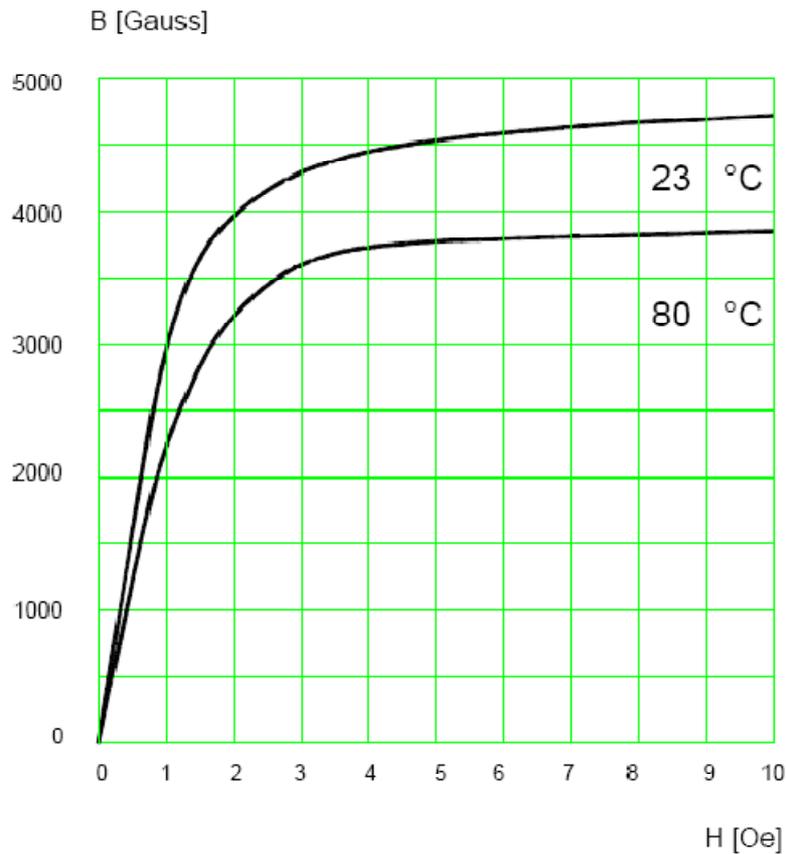
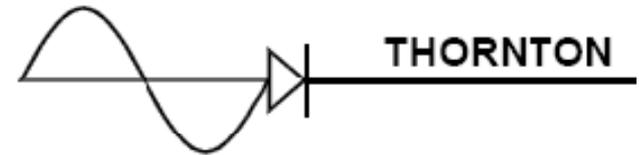
<http://www.thornton.com.br>



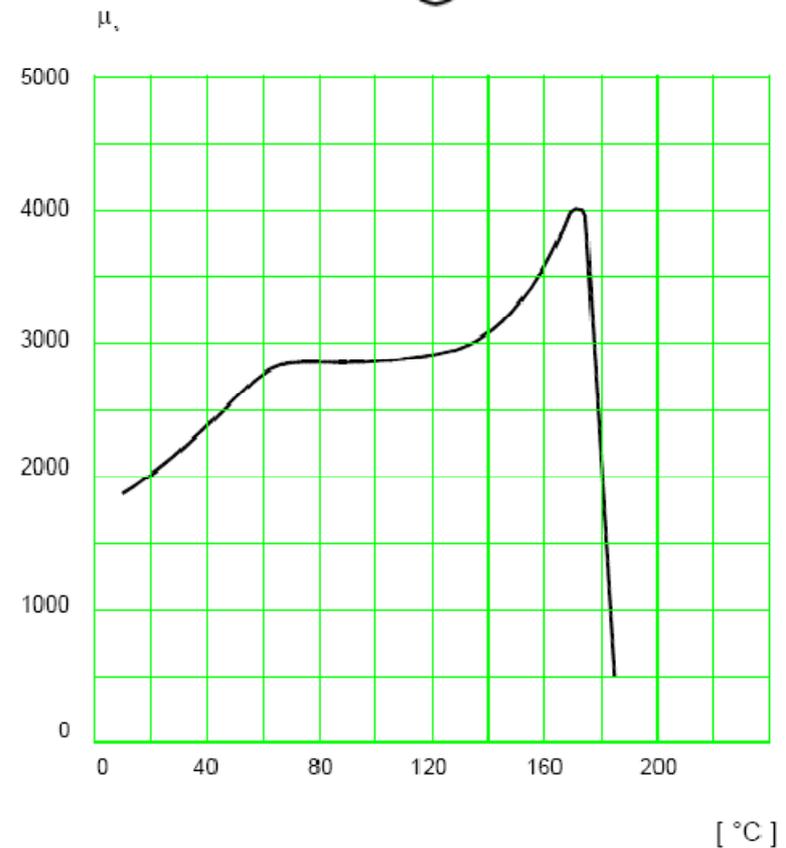
<http://www.mag-inc.com>

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

Características do núcleo:



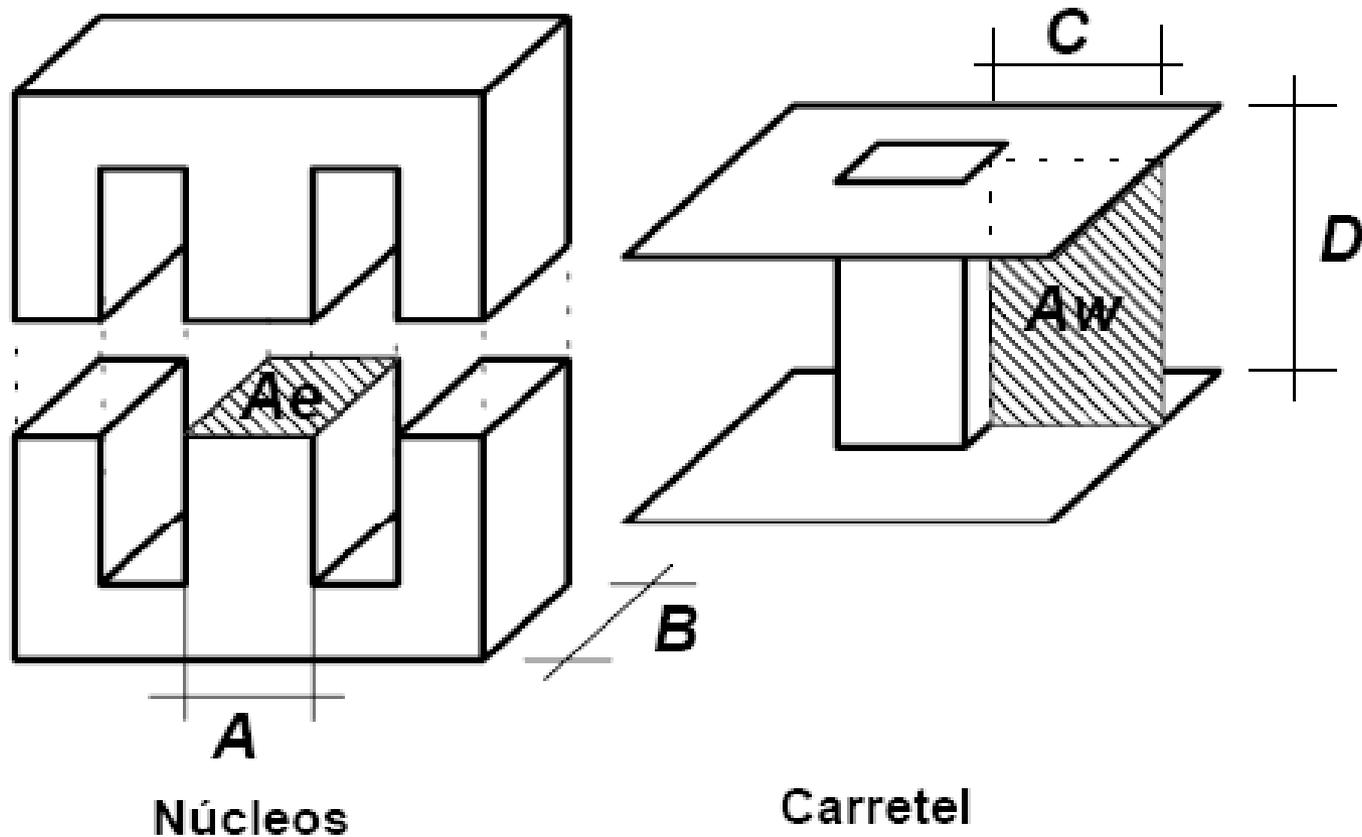
Típico $B \times H$



$\mu_r \times$ Temperatura

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

Montagem do núcleo (com entreferro):



Projeto de indutores com núcleo de ferrite

1) Dados de entrada:

$$L_o = 100 \mu H$$

$$F_s = 20 kHz$$

$$I_{Lop} = 10 A$$

$$I_{Loef} = 6 A$$

$$\Delta I_{Lo} = 1 A$$

$$k = 0,7$$

$$J = 450 A/cm^2$$

$$B = 0,35 T$$

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

Indutância do indutor;

Frequência de operação;

Corrente de pico;

Corrente eficaz;

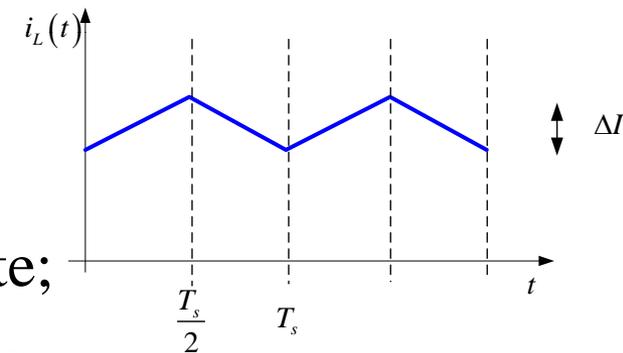
Ondulação de corrente;

Fator de enrolamento;

Densidade de corrente;

Densidade de fluxo máximo;

Permeabilidade no vácuo.



Projeto de indutores com núcleo de ferrite

2) Escolha do núcleo:

$$\Delta B = B \frac{\Delta I_{Lo}}{I_{Lop}} = 0,35 \frac{1}{10} = 0,035 T$$

$$A_e A_w = \frac{L_o \cdot I_{Lop} \cdot I_{Loef} \cdot 10^4}{k \cdot B \cdot J} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 6 \cdot 10^4}{0,7 \cdot 0,35 \cdot 450} = 0,544 \text{ cm}^4$$

Núcleo	A_e (cm ²)	A_w (cm ²)	l_e (cm)	l_t (cm)	v_e (cm ³)	$A_e A_w$ (cm ⁴)
E-20	0,312	0,26	4,28	3,8	1,34	0,08
E-30/7	0,60	0,80	6,7	5,6	4,00	0,48
E-30/14	1,20	0,85	6,7	6,7	8,00	1,02
E-42/15	1,81	1,57	9,7	8,7	17,10	2,84
E-42/20	2,40	1,57	9,7	10,5	23,30	3,77
E-55	3,54	2,50	1,2	11,6	42,50	8,85



Projeto de indutores com núcleo de ferrite

3) Cálculo do número de espiras:

$$N = \frac{L_o \cdot I_{Lop} \cdot 10^4}{B \cdot A_e} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^4}{0,35 \cdot 1,20} = 24 \text{ espiras}$$

4) Cálculo do entreferro:

$$lg = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A_e \cdot 10^{-2}}{L_o} = \frac{24^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,20 \cdot 10^{-2}}{100 \cdot 10^{-6}} = 0,087 \text{ cm}$$

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

5) Perdas no núcleo:

$$K_H = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$K_E = 4 \cdot 10^{-10}$$



$$P_{nucleo} = \Delta B^{2,4} \cdot (K_H \cdot F_s + K_E \cdot F_s^2) \cdot V_e$$

$$P_{nucleo} = 0,035^{2,4} \cdot (4 \cdot 10^{-5} \cdot 20000 + 4 \cdot 10^{-10} \cdot 20000^2) \cdot 8$$

$$P_{nucleo} = 2,46 mW$$

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

6) Profundidade de penetração:

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{F_s}} = \frac{7,5}{\sqrt{20000}} = 0,053 \text{ cm}$$

$$D_{\text{fio}_{max}} = 2 \cdot \Delta = 2 \cdot 0,053 = 0,106 \text{ cm}$$

Não poderá ser utilizado condutor com diâmetro maior que 0,106 cm. Portanto, podem ser utilizados condutores mais finos que o fio 18 AWG. Escolheu-se o condutor 22 AWG.

$$A_{cu22} = 0,003255 \text{ cm}^2 \quad S_{22} = 0,004013 \text{ cm}^2$$

$$\rho_{22} = 0,000530 \Omega / \text{cm}$$

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

7) Escolha da seção dos condutores:

$$S = \frac{I_{Loef}}{J} = \frac{6}{450} = 0,013 \text{ cm}^2 \quad \text{Maior que a área do fio 22 AWG.}$$

$$N_{fios} = \frac{S}{A_{cu22}} = \frac{0,013}{0,003255} = 5 \text{ fios}$$

8) Cálculo da resistência do fio:

$$R_{fio} = N \cdot \frac{\rho_{22}}{N_{fios}} \cdot lt = 24 \cdot \frac{0,000530}{5} \cdot 6,7 = 0,017 \Omega$$

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

9) Perdas no cobre:

$$P_{cobre} = R_{fio} \cdot I_{Loef}^2 = 0,017 \cdot 6^2 = 0,614W$$

10) Perdas totais:

$$P_{totalis} = P_{nucleo} + P_{cobre} = 2,46m + 0,614 = 0,616W$$

11) Elevação de temperatura:

$$Rt = 23 \cdot (AeAw)^{-0,37} = 23 \cdot (1,02)^{-0,37} = 22,832 \text{ } ^\circ C / W$$

$$\Delta T = Rt \cdot P_{total} = 22,832 \cdot 0,616 = 14,066 \text{ } ^\circ$$

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

12) Cálculo do fator de ocupação:

$$Aw_{neces} = \frac{N \cdot N_{fios} \cdot S_{22}}{0,7} = \frac{24 \cdot 5 \cdot 0,004013}{0,7} = 0,688 \text{ cm}^2$$

$$K_{ocup} = \frac{Aw_{neces}}{Aw} = \frac{0,688}{0,85} = 0,809$$



Projeto de indutores com núcleo de ferrite

Exercício de aplicação:

Projetar um indutor de alta frequência com as seguintes especificações.

Usando Mathcad

$$L_o = 500 \mu H$$

Indutância do indutor;

$$F_s = 20 kHz$$

Frequência de operação;

$$I_{Lop} = 6,3 A$$

Corrente de pico;

$$I_{Loef} = 5 A$$

Corrente eficaz;

$$\Delta I_{Lo} = 2,5 A$$

Ondulação de corrente;

$$k = 0,7$$

Fator de enrolamento;

$$J = 450 A/cm^2$$

Densidade de corrente;

$$B = 0,35 T$$

Densidade de fluxo máximo.

Próxima aula

Capítulo 9: Choppers DC

1. Controle em malha fechada de conversores CC-CC.

