



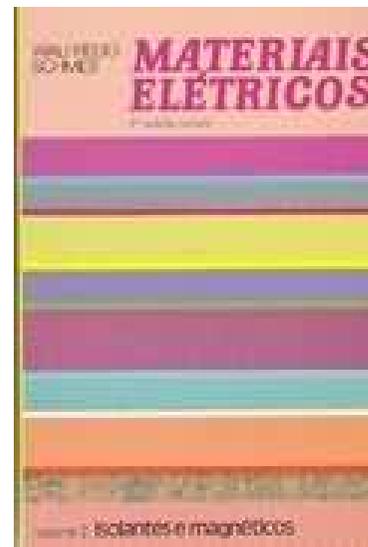
Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Elétrica
Materiais Elétricos - Teoria

Aula 05
Materiais Magnéticos

Clóvis Antônio Petry, professor.

Florianópolis, outubro de 2006.

Bibliografia



Nesta aula

Cronograma:

1. Propriedades gerais dos materiais;
2. **Materiais magnéticos;**
3. Materiais condutores;
4. Materiais semicondutores;
5. Materiais isolantes.

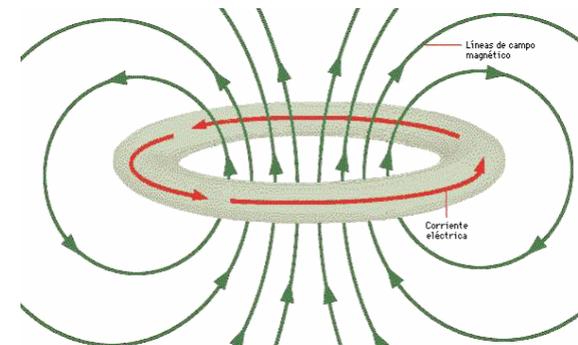
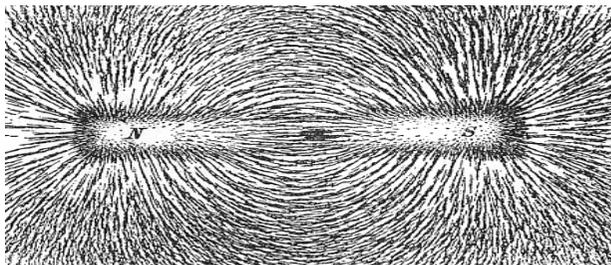
Revisão da aula anterior

Campo magnético:

- Região do espaço onde se manifestam fenômenos magnéticos;
- Também chamado de intensidade de campo ou força magnética;
- Simbolizado pela letra H.

Indução magnética:

- Linhas de fluxo magnético por unidade de área;
- Também chamado de densidade de fluxo ou fluxo magnético;
- Simbolizado pela letra B.



Revisão da aula anterior

Permeabilidade magnética:

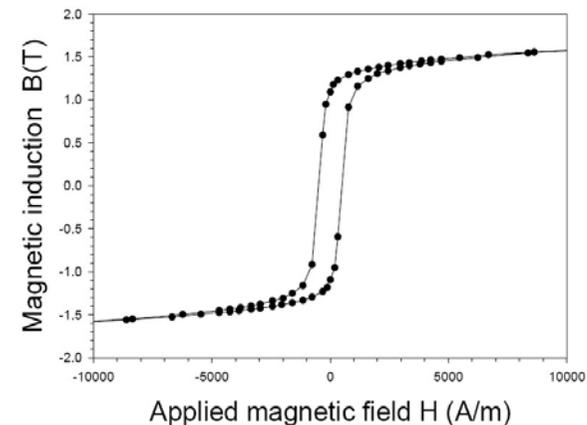
- Grau de magnetização de um material em resposta ao campo magnético;
- Facilidade de “conduzir” o fluxo magnético;
- Simbolizado pela letra μ .

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

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \longrightarrow \quad \text{Permeabilidade relativa}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N / A}^2$$

Permeabilidade do vácuo



Revisão da aula anterior

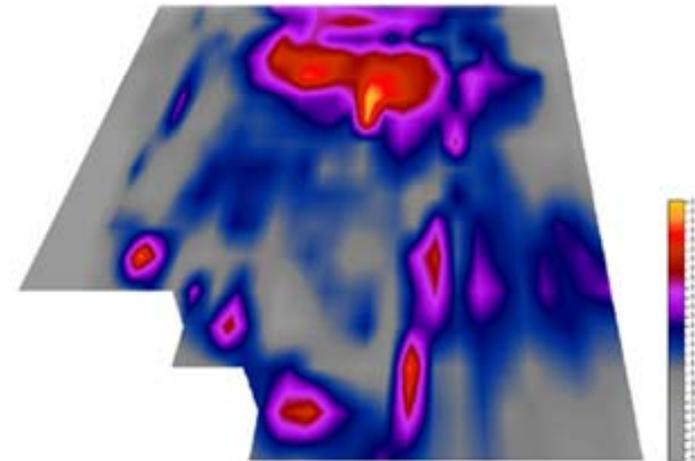
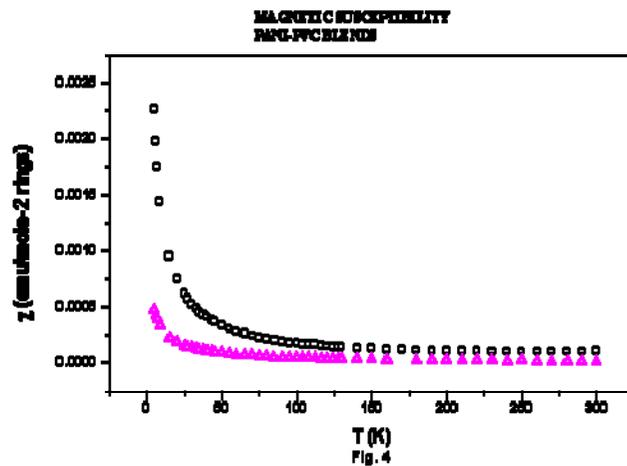
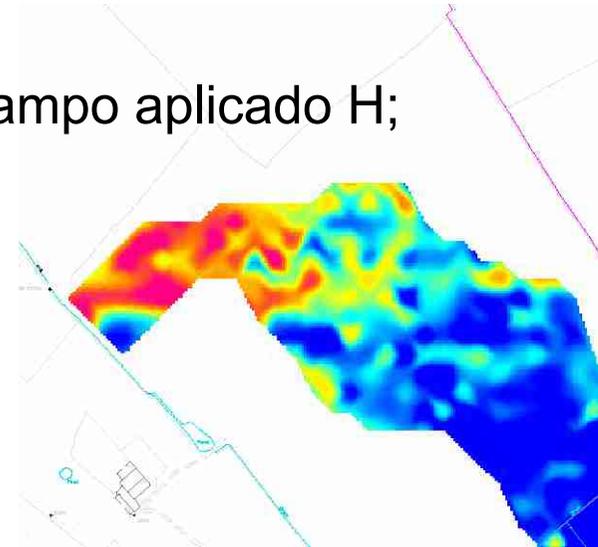
Susceptibilidade magnética:

- É a resposta do material a um campo aplicado H ;
- Simbolizado pela letra χ .

$$B = \mu_o \cdot (H + M)$$

SI $\mu = \mu_o \cdot (1 + \chi)$

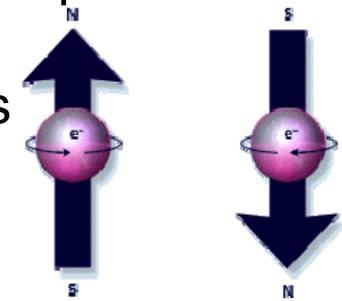
CGS $\mu = 1 + 4\pi \cdot \chi$



Revisão da aula anterior

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.



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

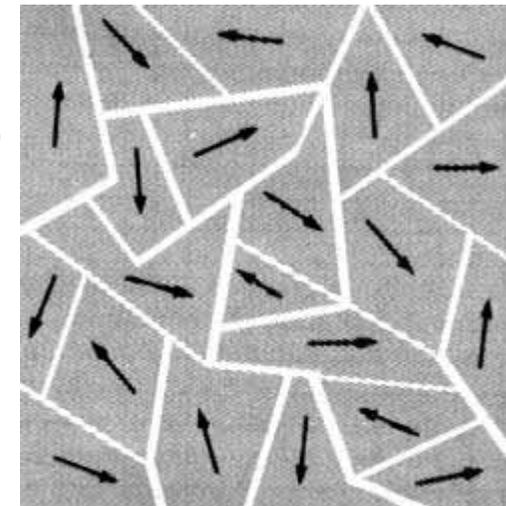
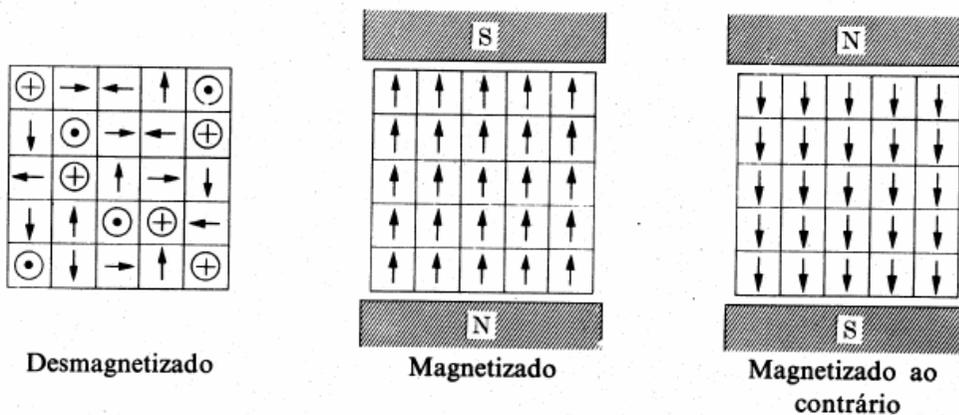
Revisão da aula anterior

Domínios magnéticos:

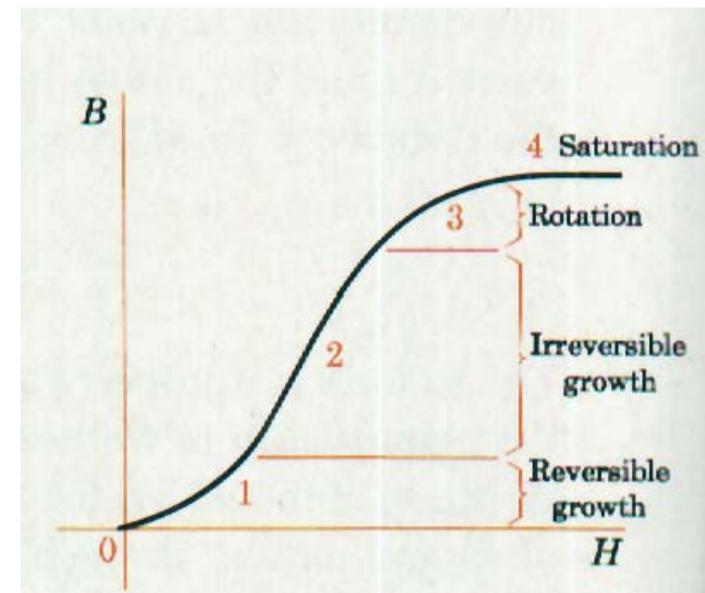
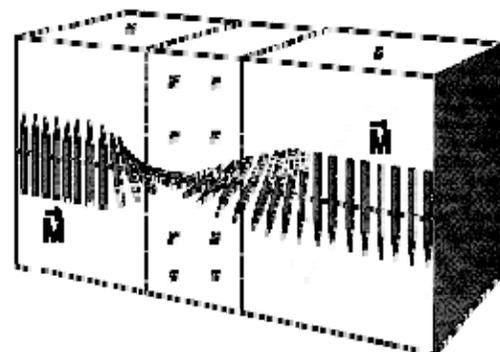
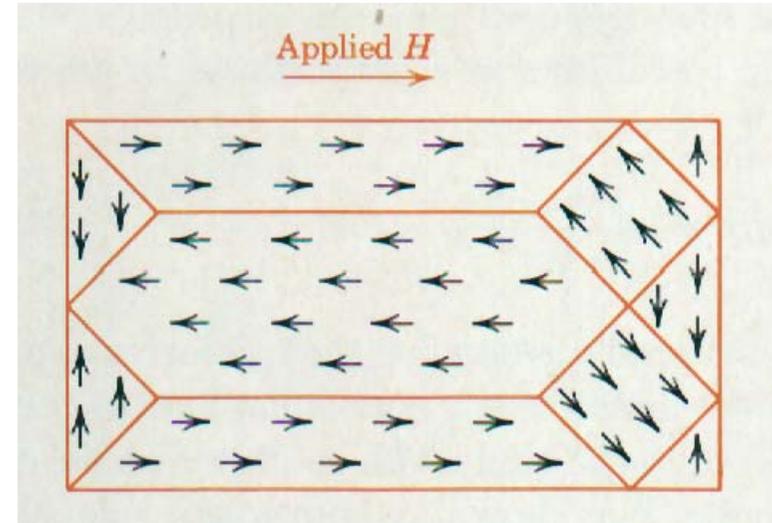
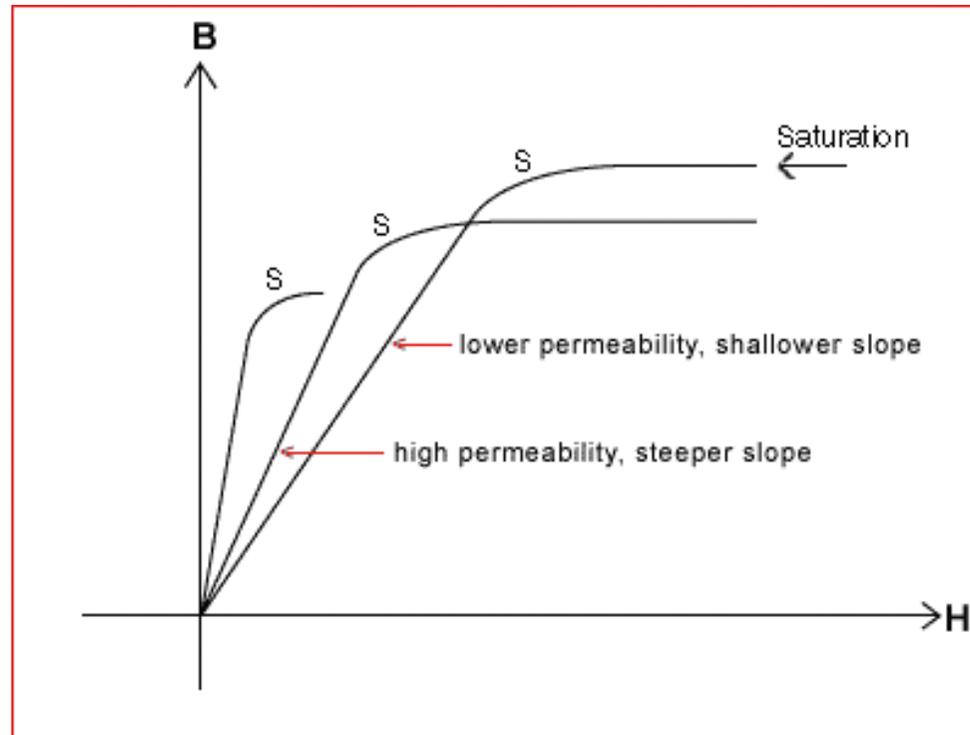
- Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
- Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
- Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.

Alinhamento dos domínios:

- Aplicando um campo magnético externo.



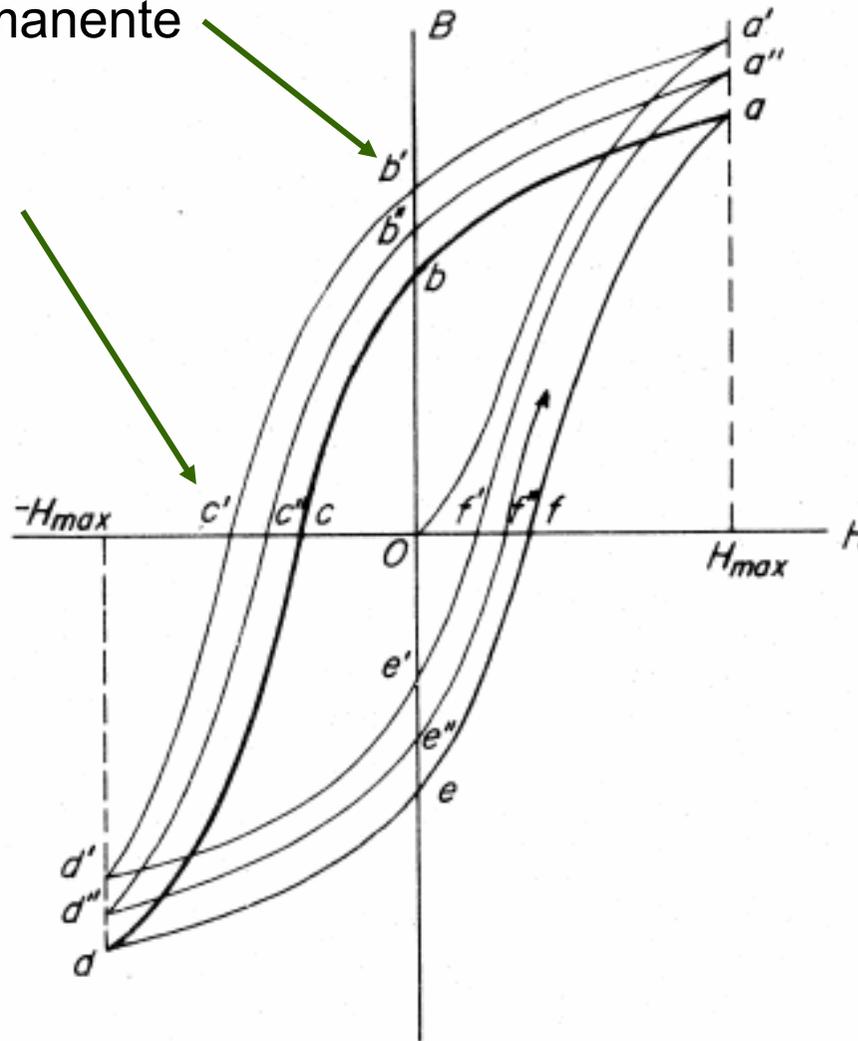
Revisão da aula anterior



Revisão da aula anterior

Magnetização remanente

Campo coercitivo



Revisão da aula anterior

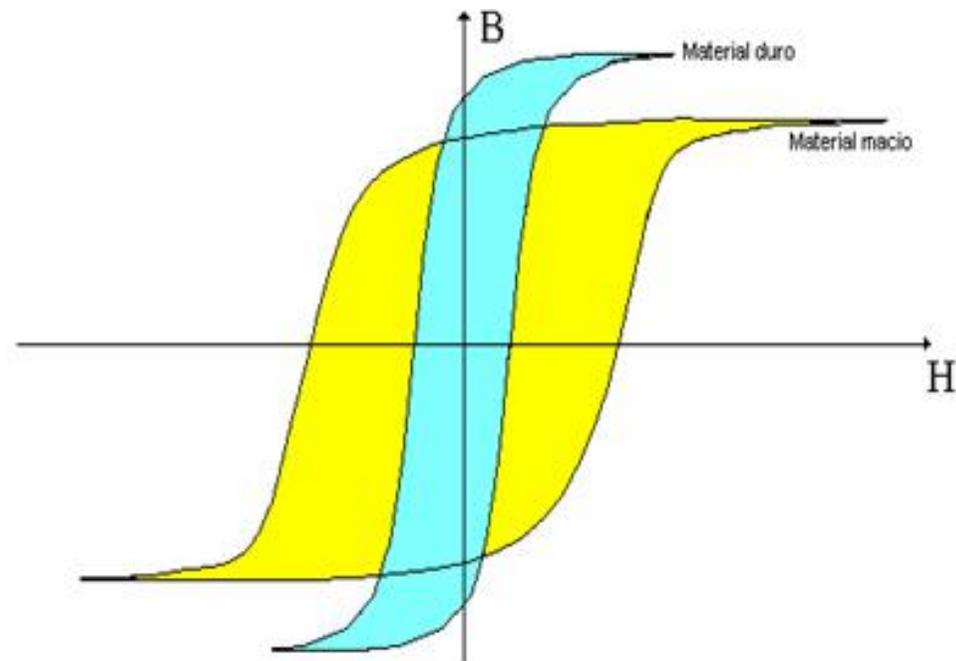
Correntes parasitas:

- 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.



Revisão da aula anterior

Classificação quanto ao alinhamento magnético:

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

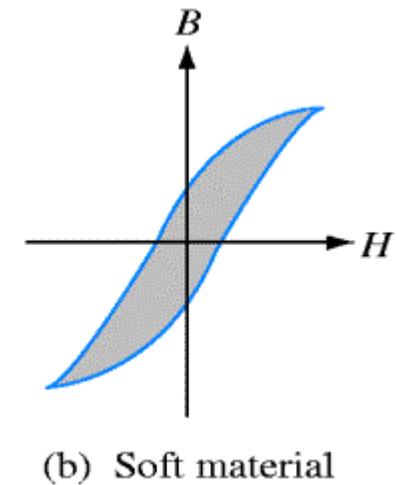
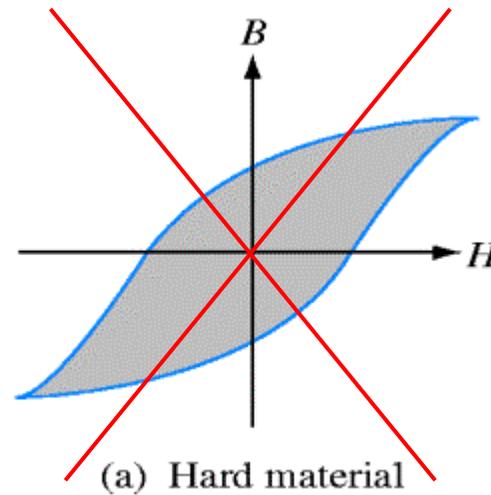
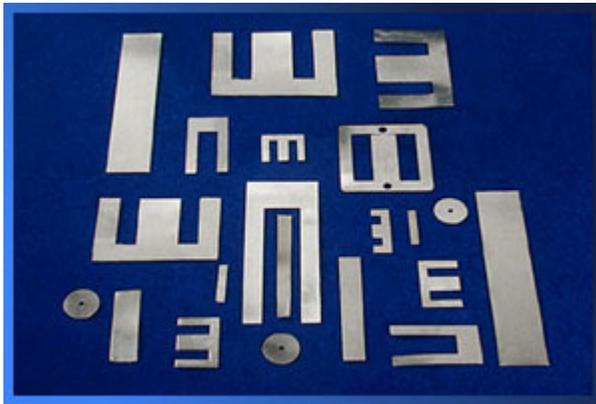
Classificação quanto a susceptibilidade e permeabilidade:

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

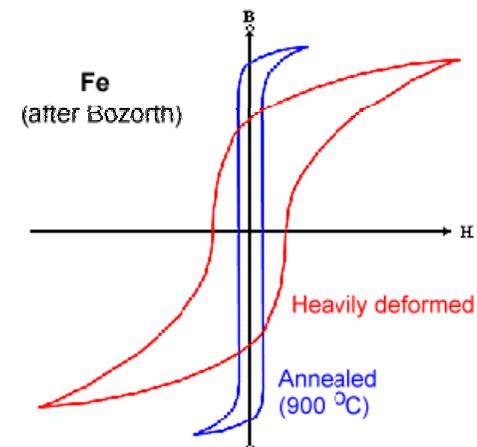
Revisão da aula anterior

Materiais magnéticos moles:

- Não apresentam magnetismo remanente.



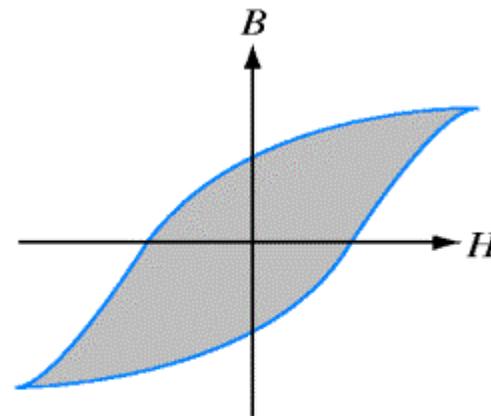
Recozimento →



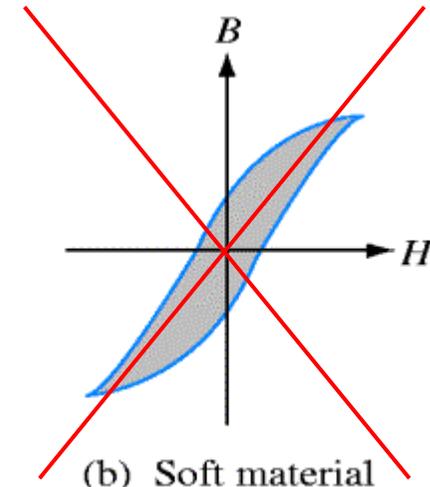
Revisão da aula anterior

Materiais magnéticos duros:

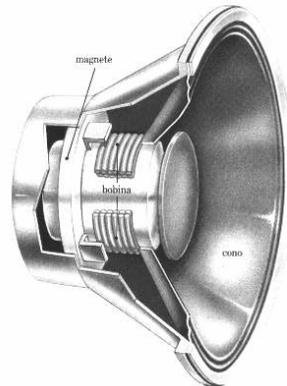
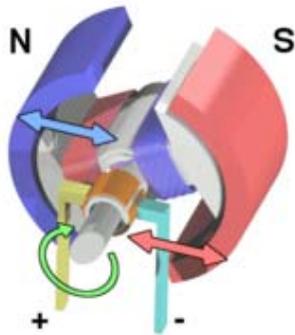
- Apresentam elevado magnetismo remanente.



(a) Hard material



(b) Soft material

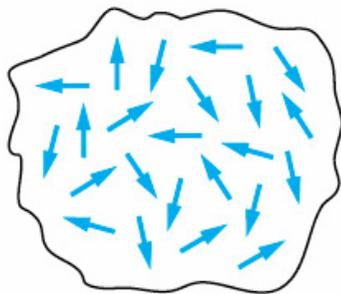


Revisão da aula anterior

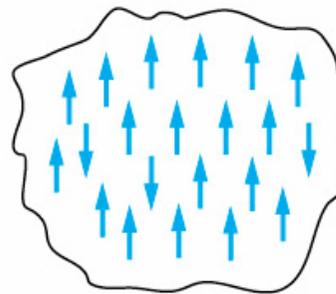
Materiais diamagnéticos:

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

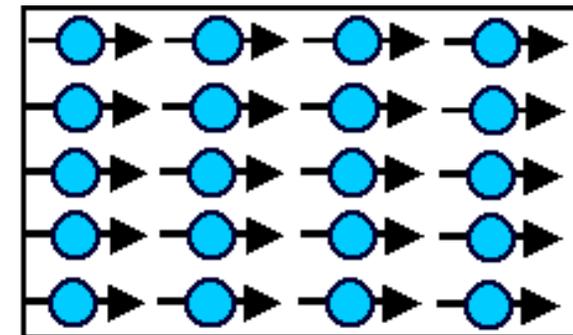
Magnetic field absent



In presence of magnetic field



Paramagnetism



Materiais paramagnéticos:

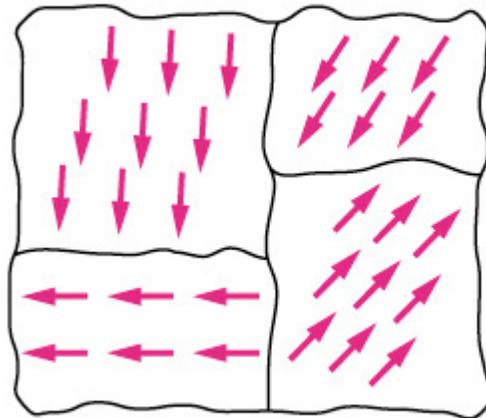
- Apresentam susceptibilidade positiva $\approx 10^{-5}$ - 10^{-3} ;
- Permeabilidade acima de 1, $\mu > 1$;
- Exemplos: alumínio, platina, sais de: ferro, cobalto, níquel, etc.

Revisão da aula anterior

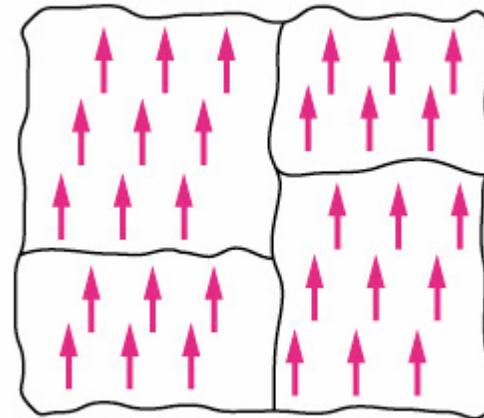
Materiais ferromagnéticos:

- 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



Ferromagnetism

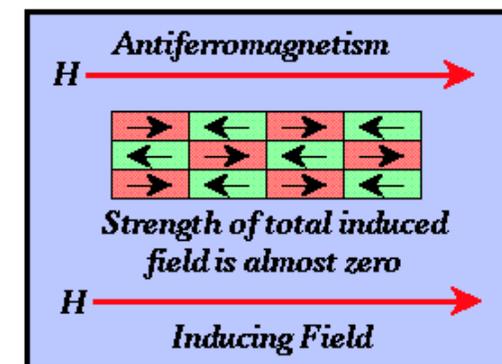
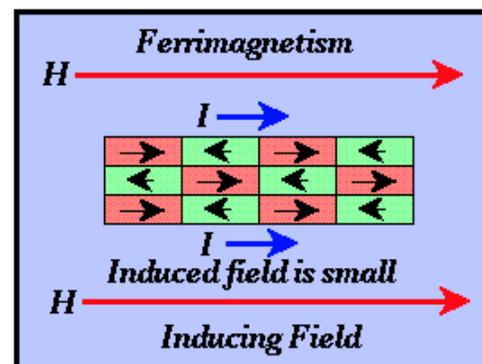
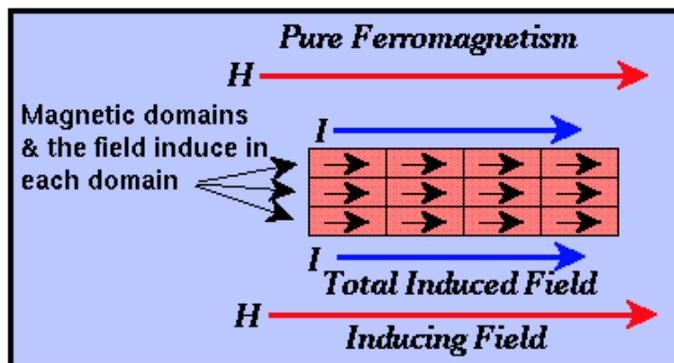
Revisão da aula anterior

Materiais ferrimagnéticos:

- Apresentam características semelhantes aos ferromagnéticos;
- Os momentos antiparalelos não são exatamente iguais;
- Magnetização resultante não é nula;
- Exemplo: ferrites, possuem rapidez na resposta da magnetização e alta resistividade.

Materiais antiferromagnéticos:

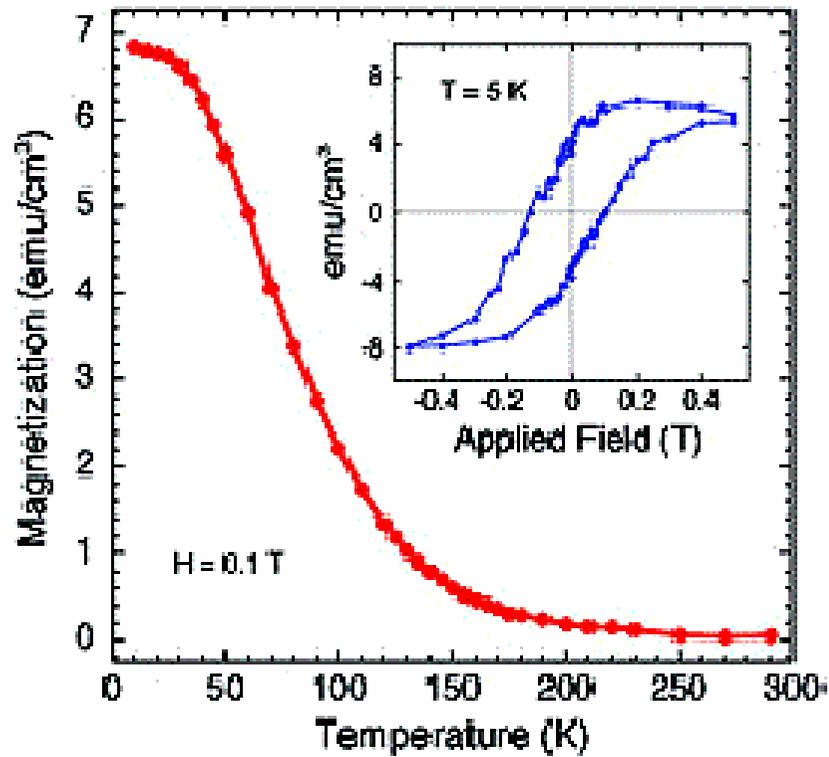
- Apresentam características semelhantes aos ferromagnéticos;
- Os momentos antiparalelos são iguais;
- Magnetização resultante é nula;
- Exemplo: cabeçotes de leitura de gravação magnética.



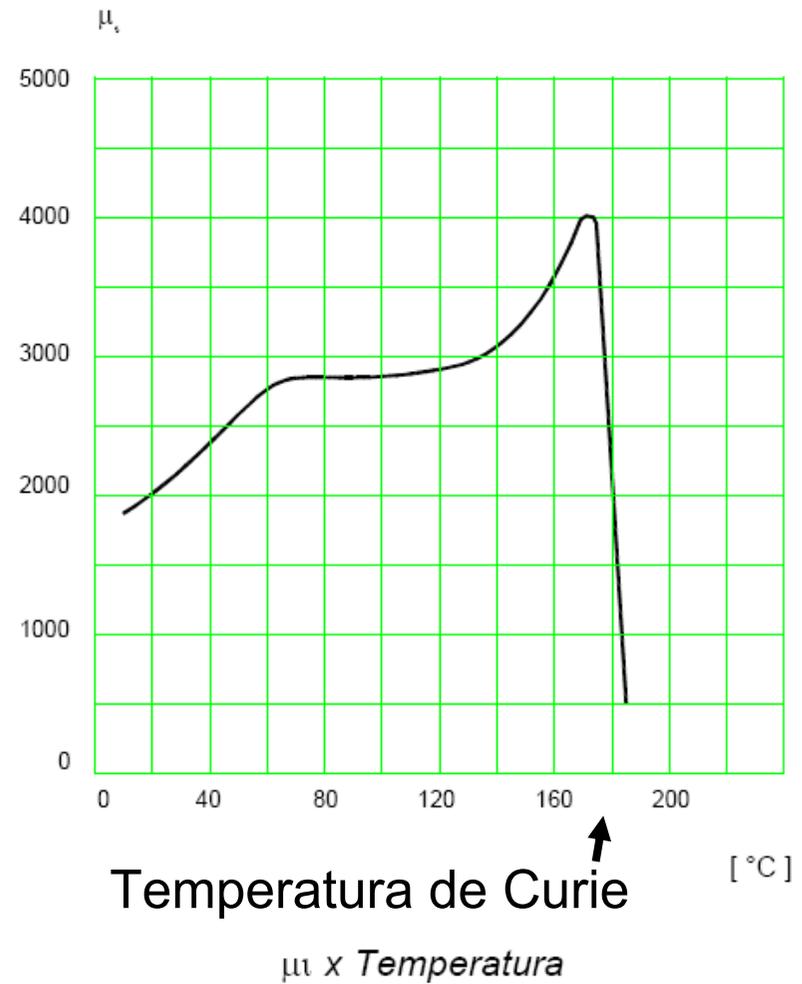
Revisão da aula anterior

Magnetismo versus temperatura:

$$M \times T$$



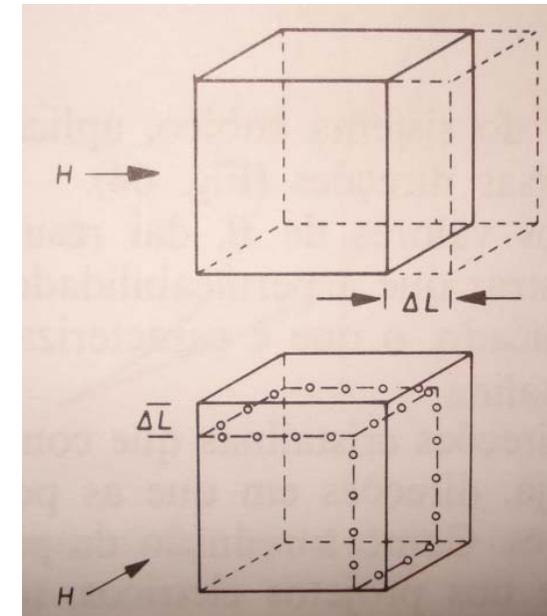
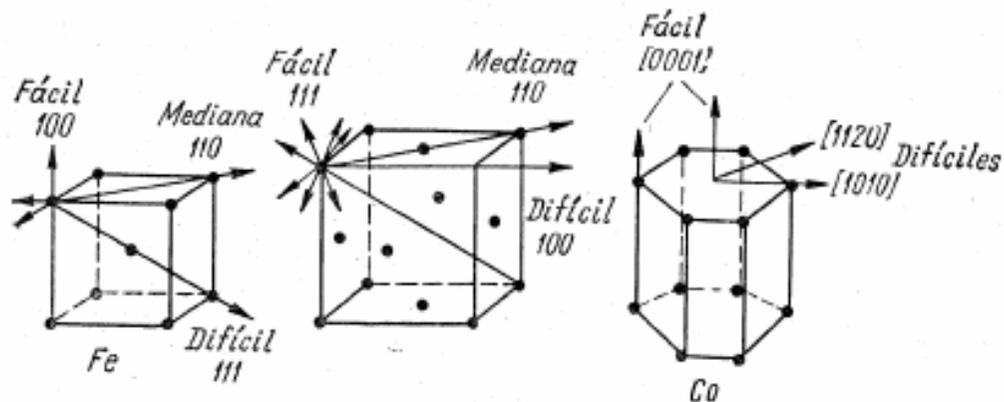
$$\mu \times T$$



Revisão da aula anterior

Anisotropia cristalina:

- Reação diferente conforme a direção do campo;
- Direção preferencial de magnetização.



Magnetostricção:

- Variação das dimensões do material conforme a aplicação de um campo magnético;
- Aplicação em sensores, por exemplo.

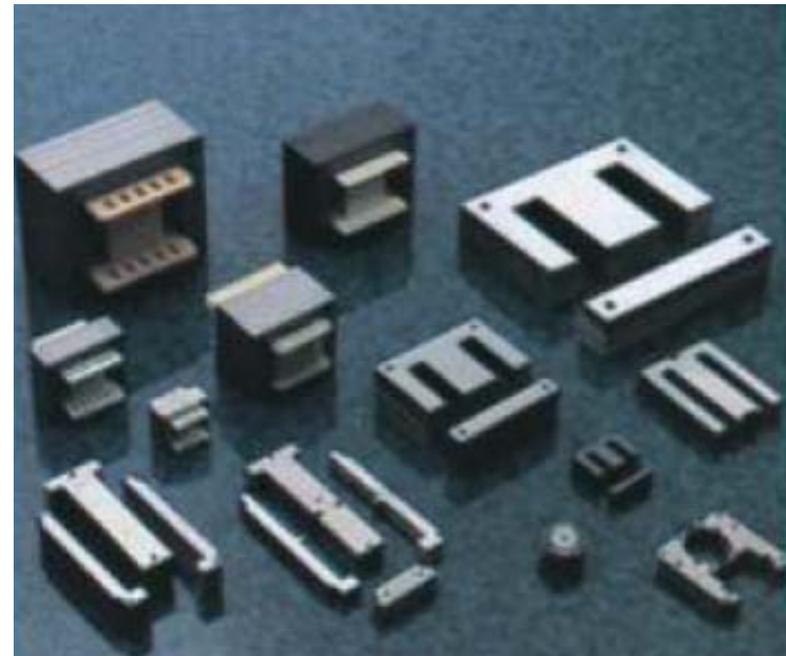
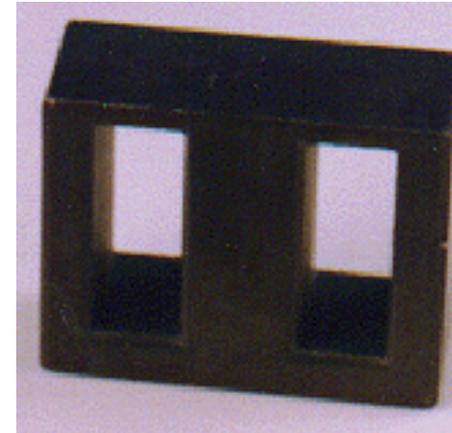
Núcleos magnéticos

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.



Características versus aplicações

Freios magnéticos:

- Alta resistividade.

Estabilizadores de tensão e acionamentos:

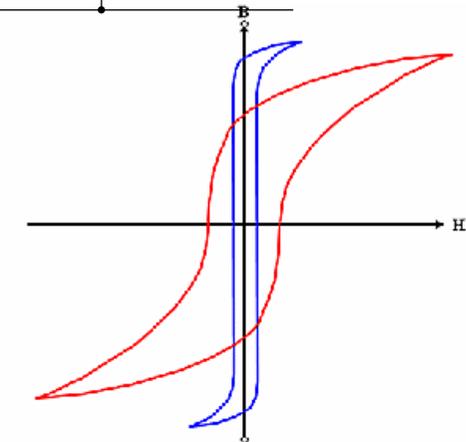
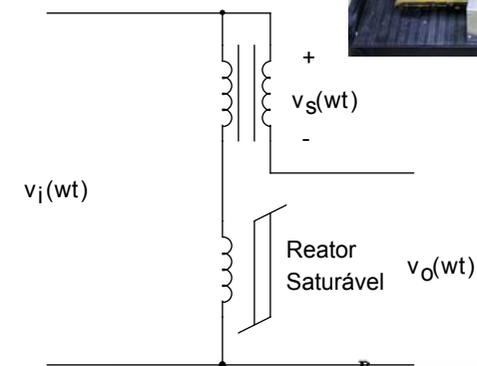
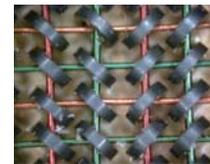
- Operação na saturação.

Memórias:

- Laço de histerese retangular.

Imãs permanentes:

- Elevado magnetismo residual.



Materiais empregados em núcleos magnéticos

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

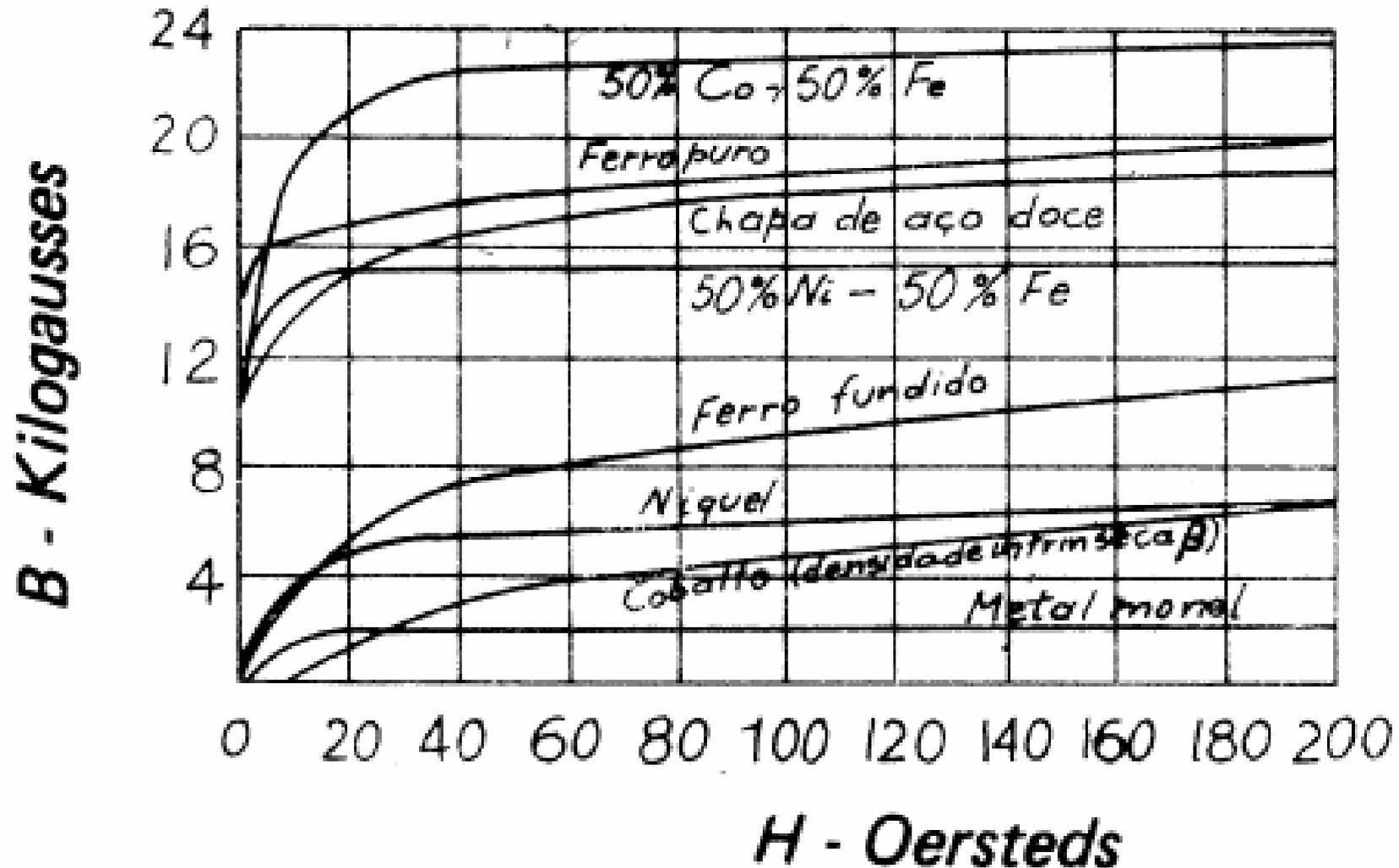
Ligas de ferro-silício: até 6,5% de silício, mas se torna quebradiço. Máquinas estáticas usam mais Si do que máquinas girantes.

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.

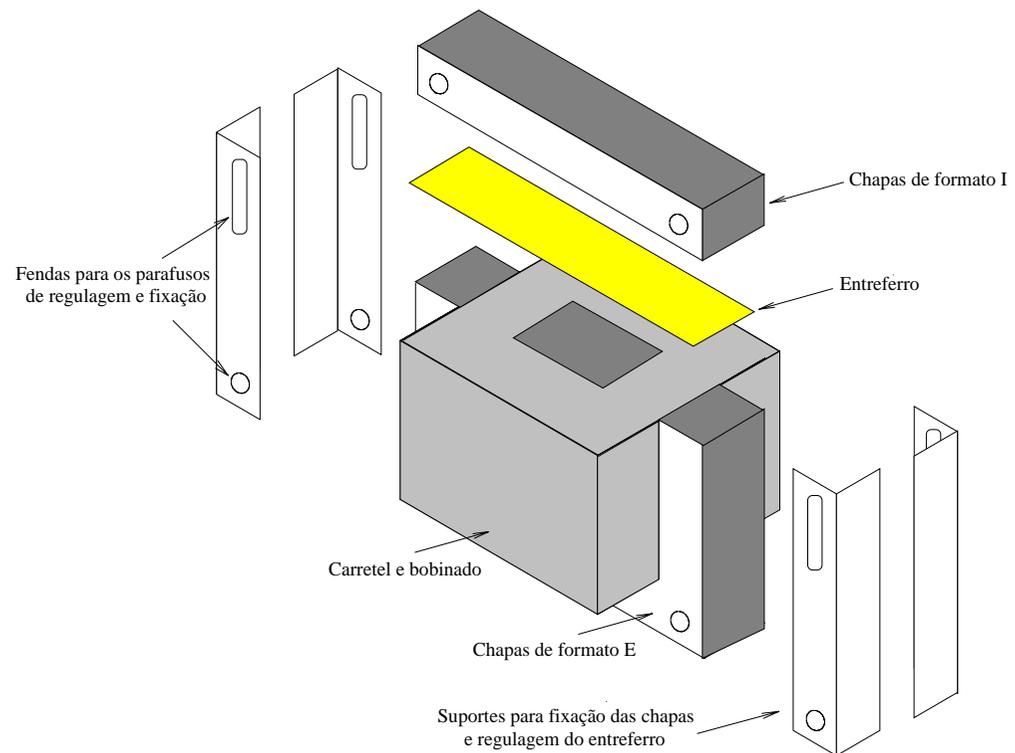
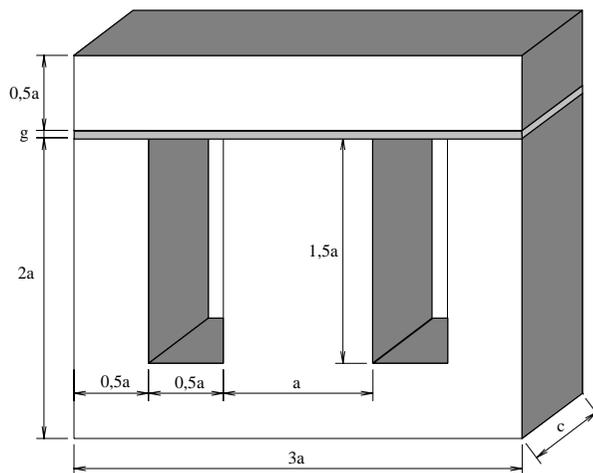
Materiais empregados em núcleos magnéticos



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

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

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.



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

Núcleos magnéticos laminados



Aço Silício GNO
Características Magnéticas Típicas



AÇOS SILICIOSOS DE GRÃO NÃO ORIENTADO

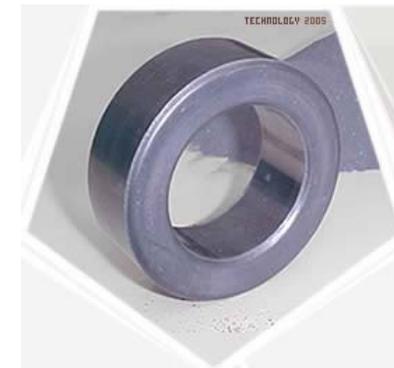
O aço silicioso GNO totalmente processado apresenta suas propriedades magnéticas plenamente desenvolvidas.

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	1,80	
	E170	1,71	2,23	3,95	5,14	1,60	1,69		
	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				
	0,35	E137	1,24	1,58	2,85	3,65	1,58	1,67	1,78
		E125	1,07	1,37	2,70	3,43			
		E115	1,04	1,34	2,59	3,32	1,54	1,63	1,75
		E110	1,01	1,30	2,51	3,23			
E105		0,94	1,25	2,42	3,11				
0,35		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				

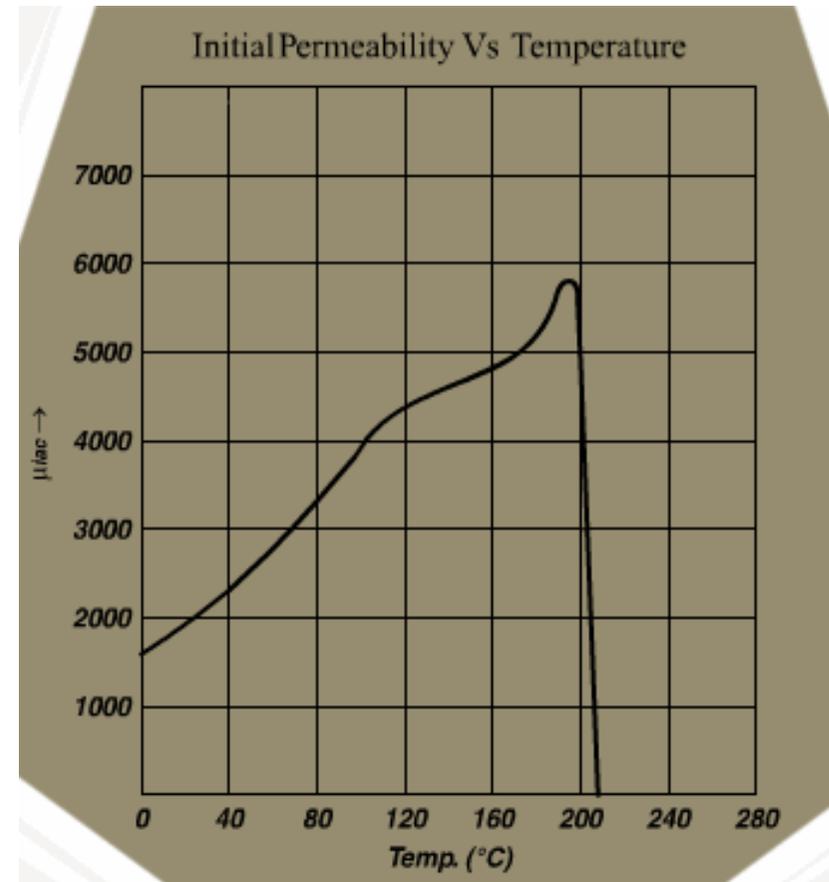
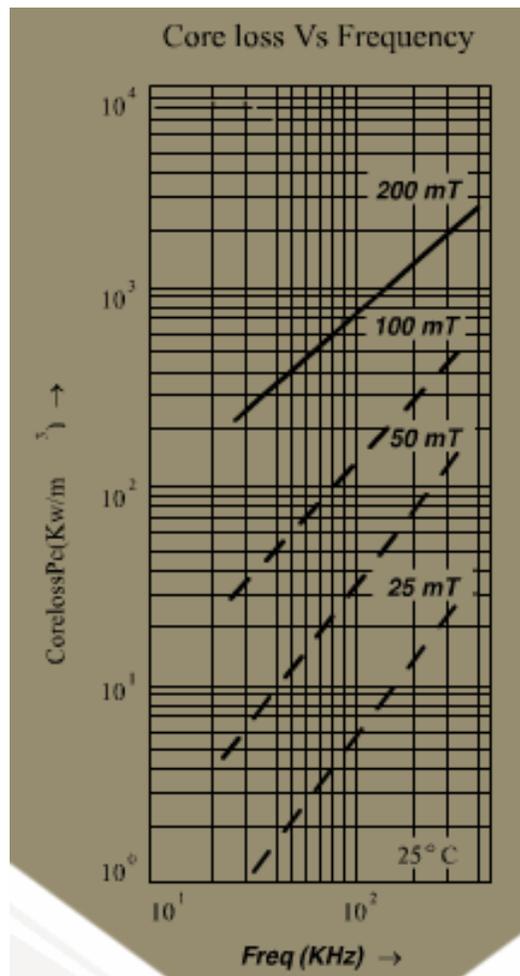
Núcleos magnéticos compactos



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](#)

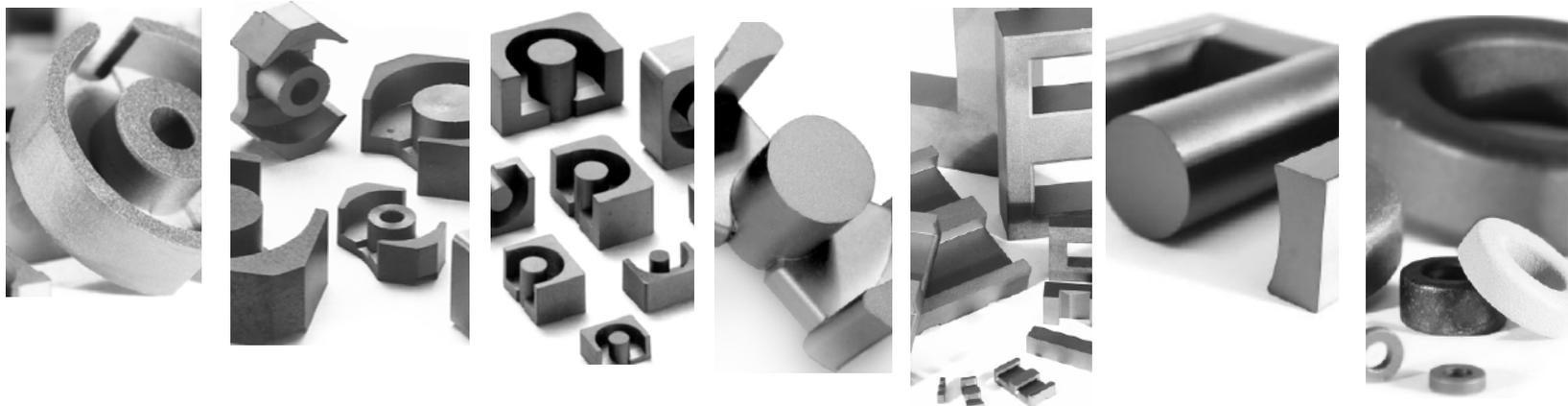


Núcleos magnéticos compactos



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

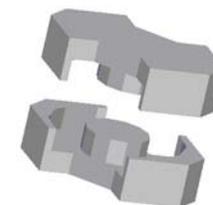
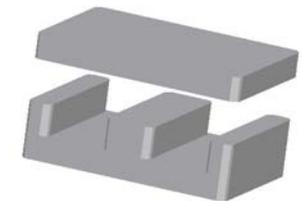
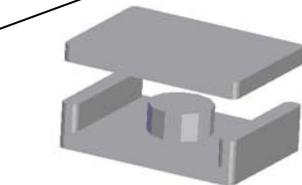
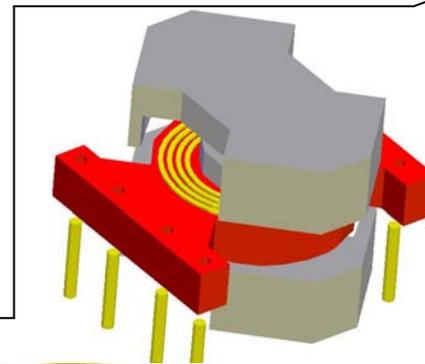
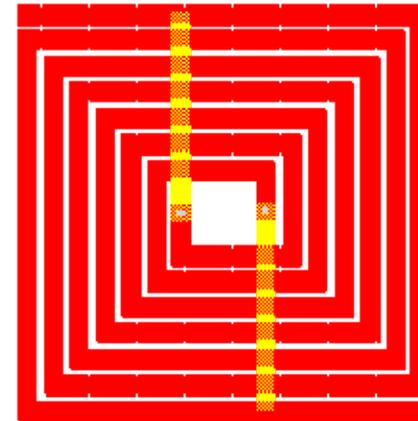
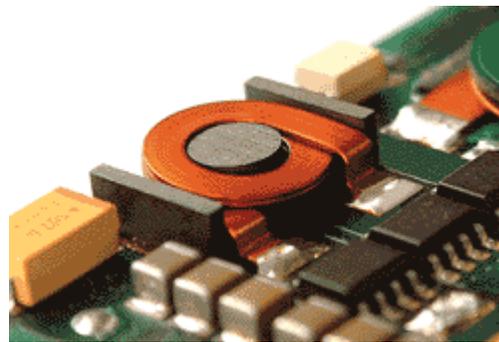
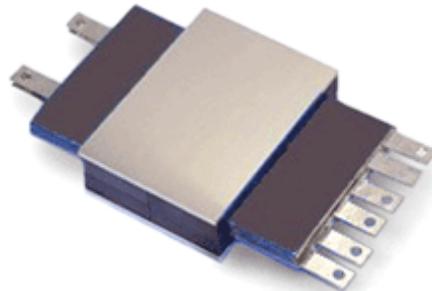


<http://www.mag-inc.com>

Núcleos magnéticos compactos



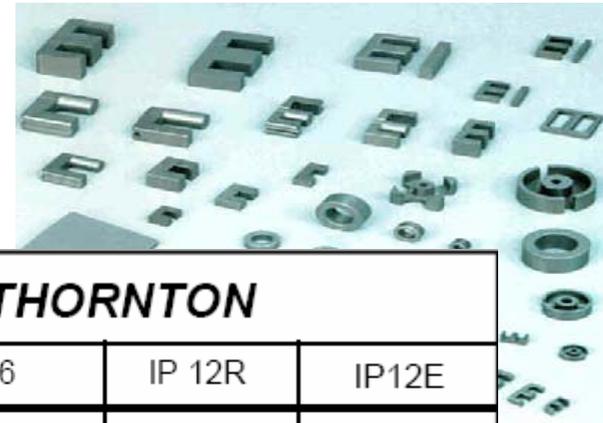
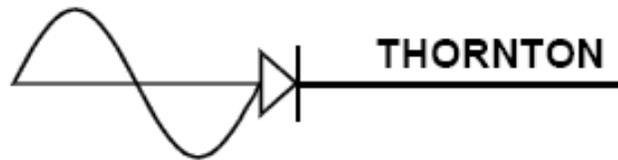
Núcleos planares



<http://virtual-magnetics.de>



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

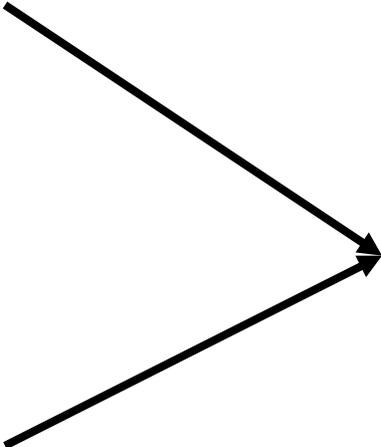
Próxima aula

Cronograma teoria:

1. Propriedades gerais dos materiais;
2. Materiais magnéticos;
3. Materiais condutores;
4. Materiais semicondutores;
5. Materiais isolantes.

Cronograma laboratório:

1. Disjuntor de baixa tensão;
2. Curva de magnetização de indutores;
3. Fio condutor;
4. Resistores e propriedades dos semicondutores;
5. Diodos de junção e fotodiodos;
6. Transistores e portas lógicas;
7. Rigidez dielétrica;
8. Resistência de isolamento.



Avaliação