

Curso Técnico em Eletrotécnica

Força Magnetizante, Histerese e Perdas Magnéticas

Circuitos magnéticos

1. Força magnetizante;
2. Histerese;
3. Perdas magnéticas.

Vitória-ES

Força magnetizante

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

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

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

Força magneto-motriz

FMM:

- Força magneto-motriz (FMM) é a causa da produção do fluxo no núcleo de um circuito magnético;
- Unidade de medida: Ampère-espira [Ae].

$$FMM = N \cdot I$$

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l}$$

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

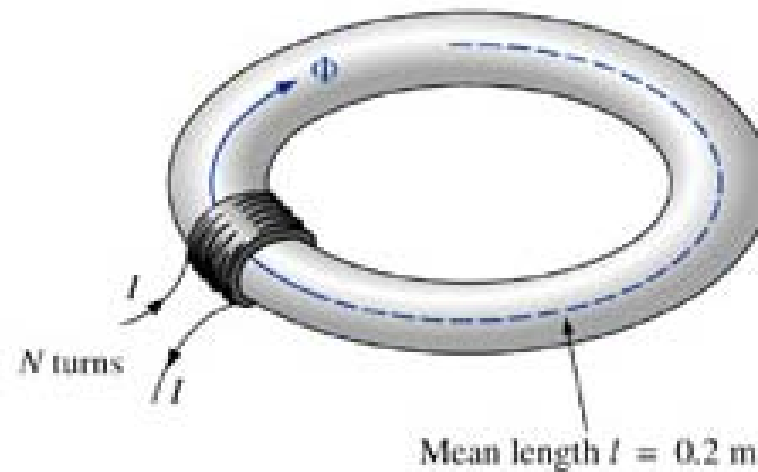
$$H = \frac{FMM}{l} \longrightarrow \boxed{FMM = H \cdot l}$$

- FMM em [Ae];
- H [Ae/m];
- l [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.

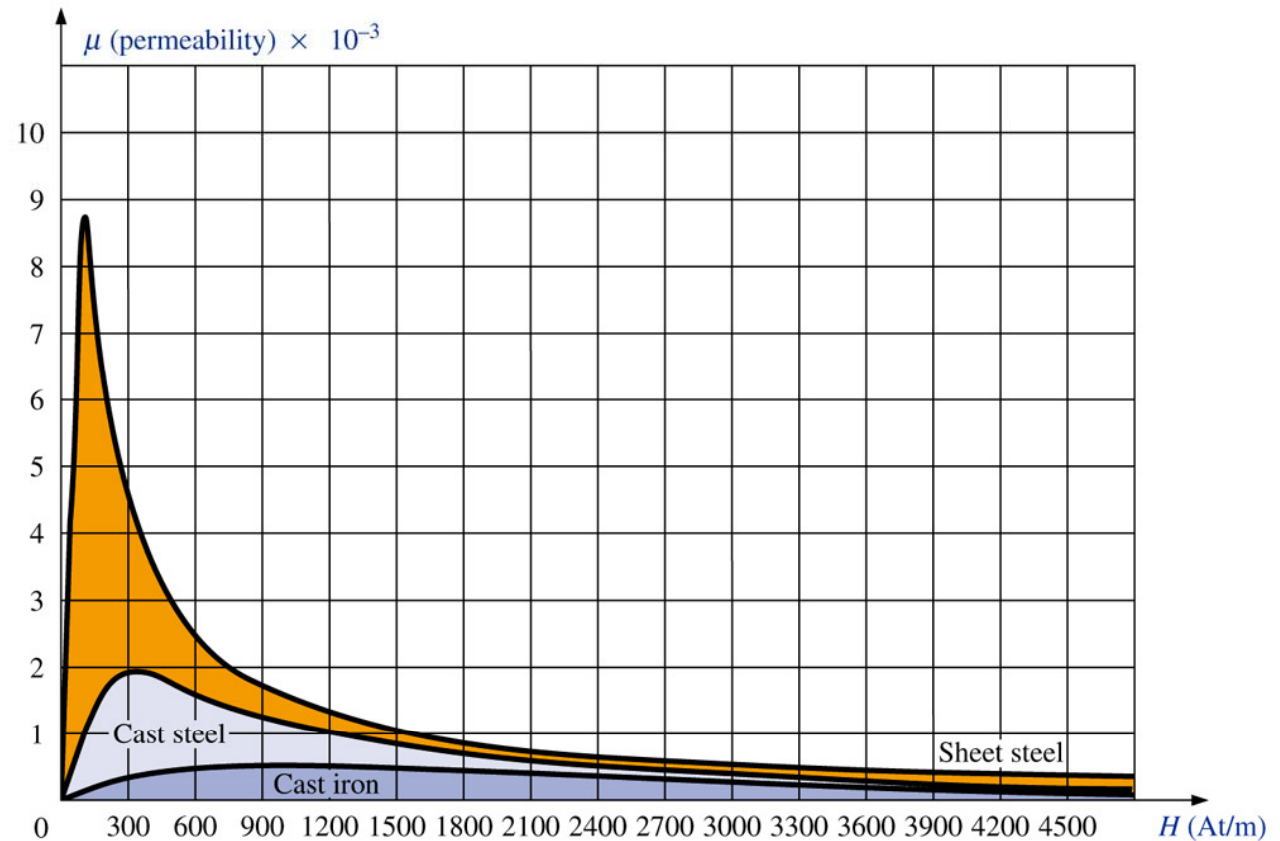


Força magnetizante

Relação densidade de fluxo e força magnetizante:

$$B = \mu H$$

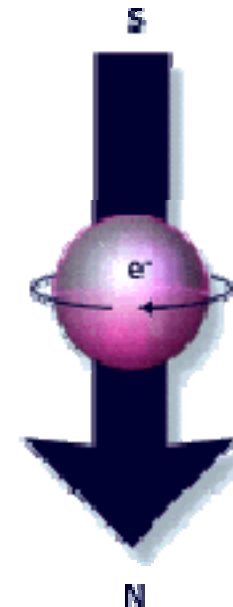
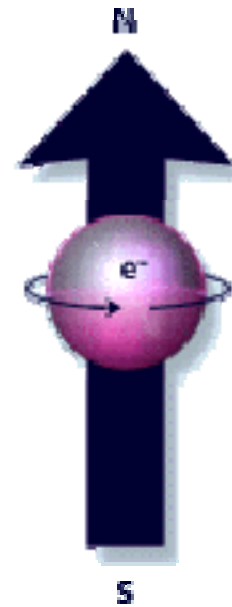
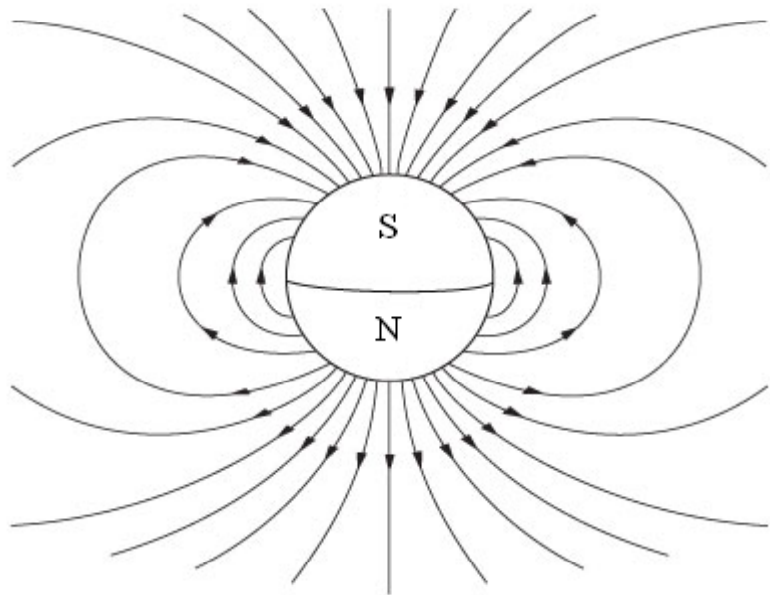
Variação de μ com a força magnetizante



Dipolos magnéticos - revisão

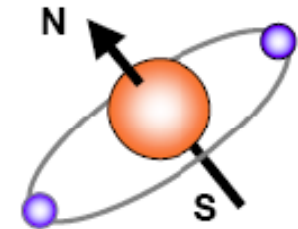
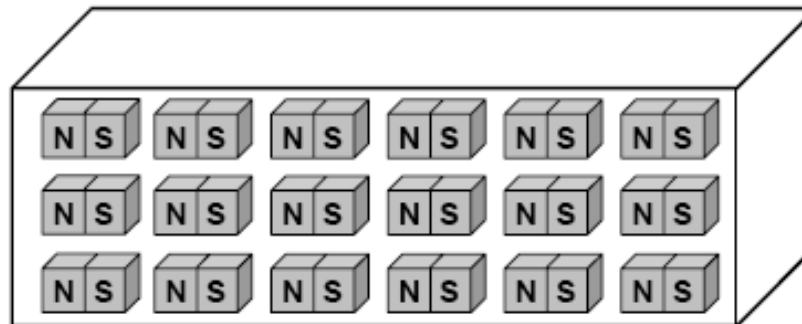
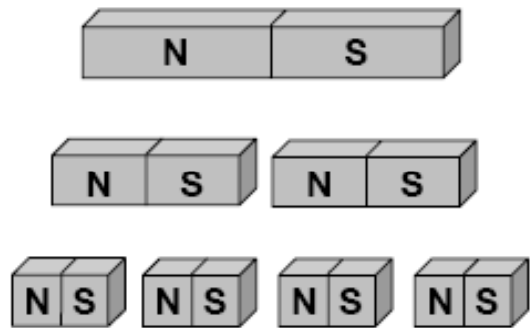
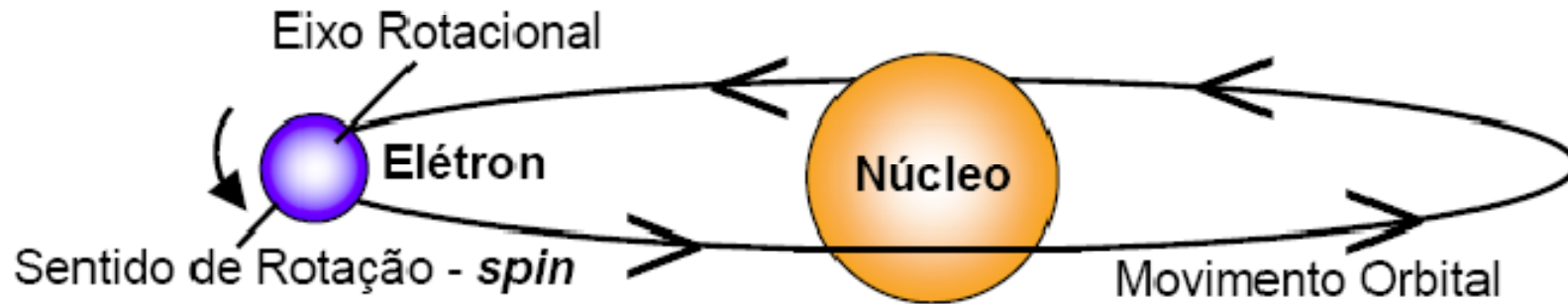
Dipolos magnéticos:

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



Dipolos magnéticos - revisão

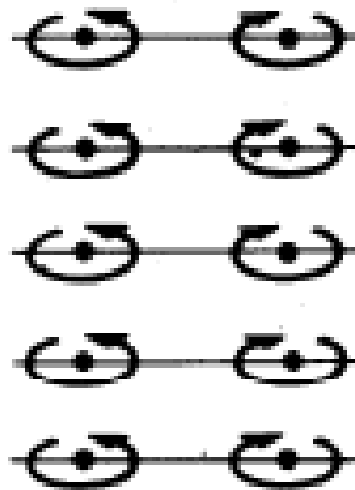
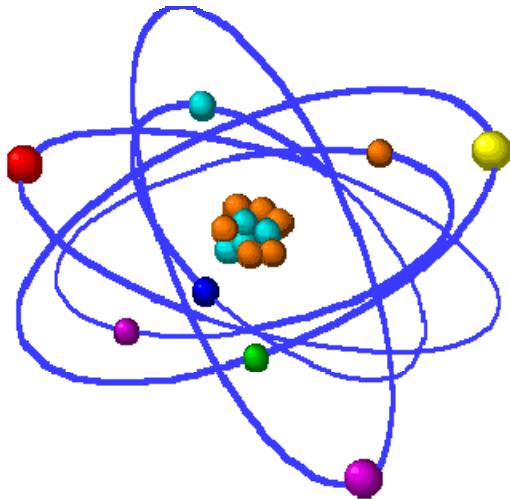
Dipolos magnéticos



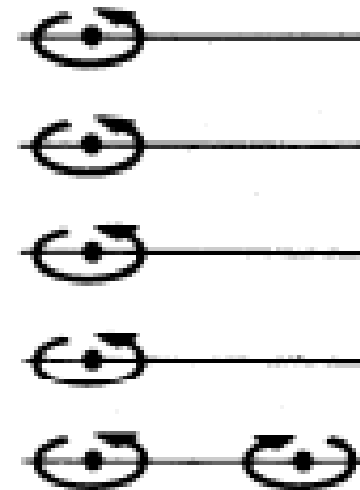
Magnetismo atômico - revisão

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

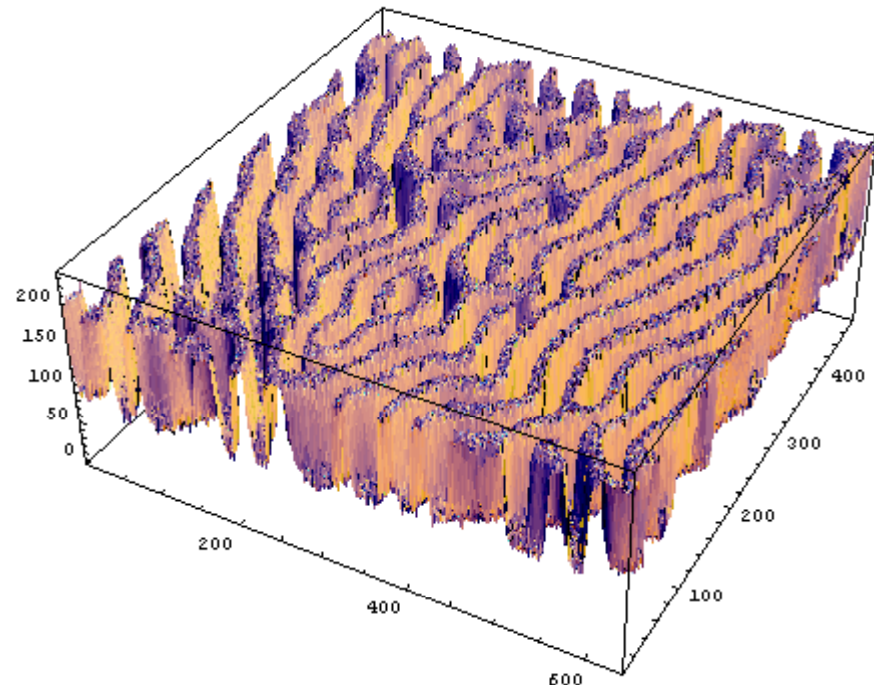
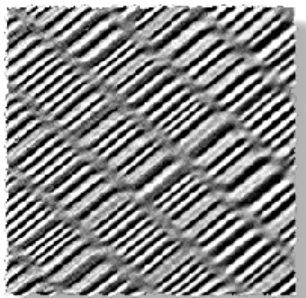
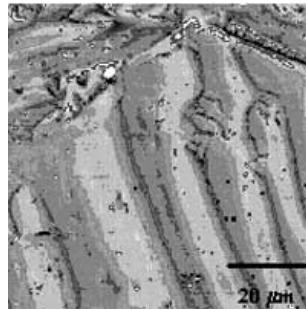
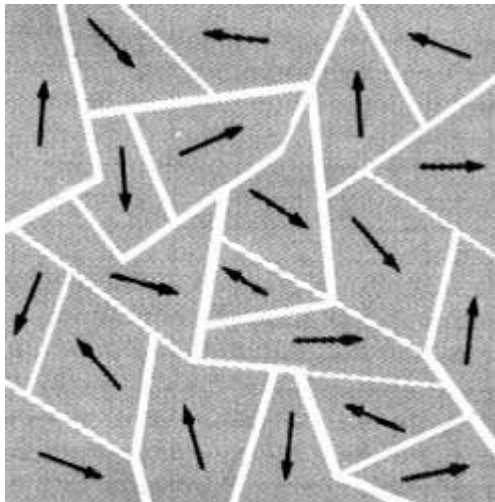


Momento $\neq 0$

Domínios magnéticos - revisão

Domínios magnéticos:

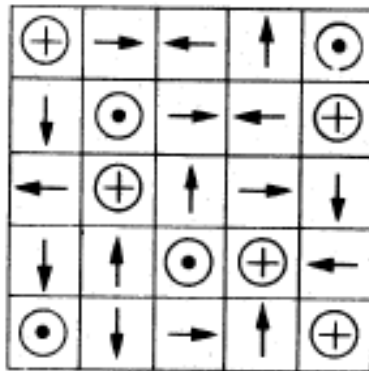
- Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
- Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
- Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.



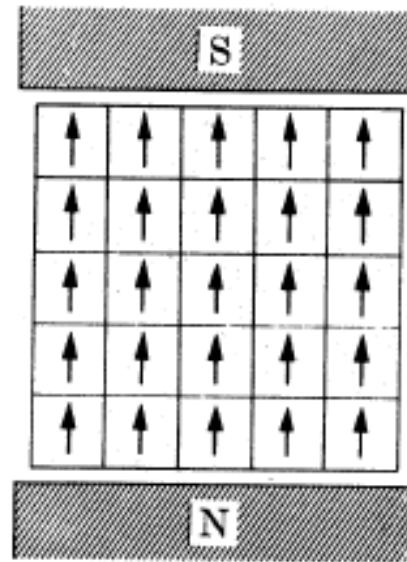
Domínios magnéticos - revisão

Alinhamento dos domínios:

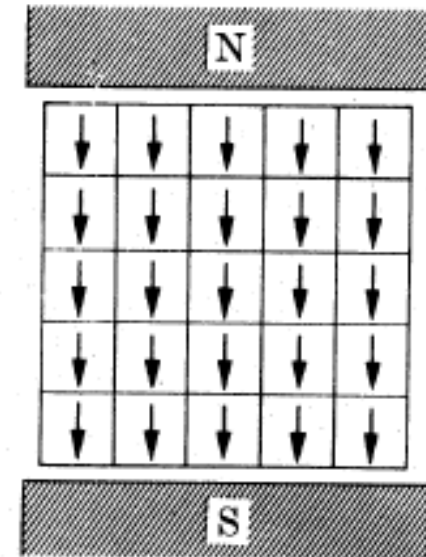
- Aplicando um campo magnético externo.



Desmagnetizado

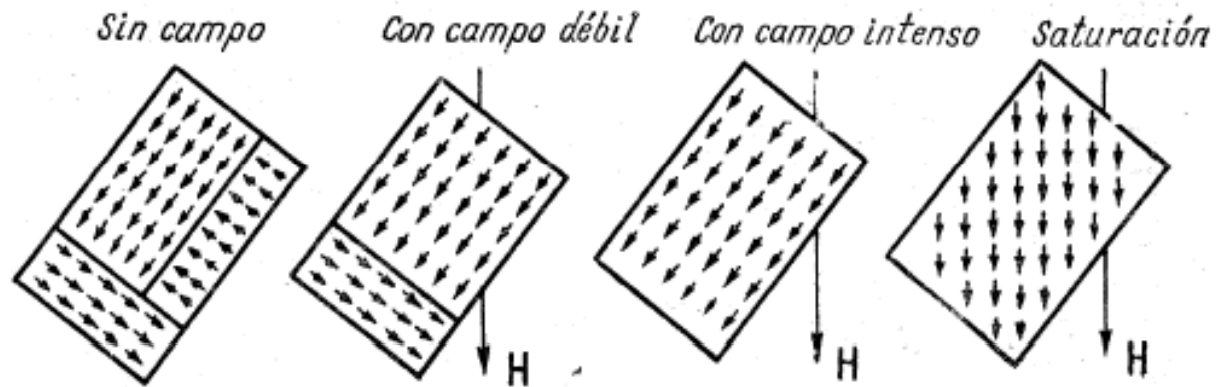
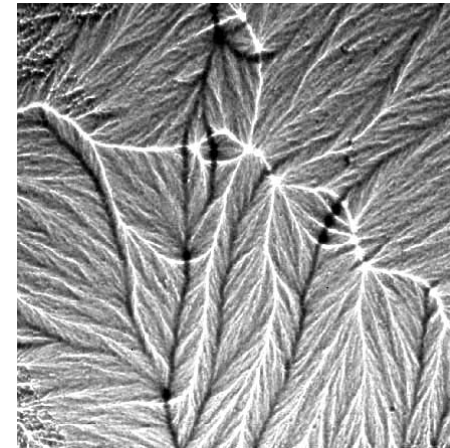
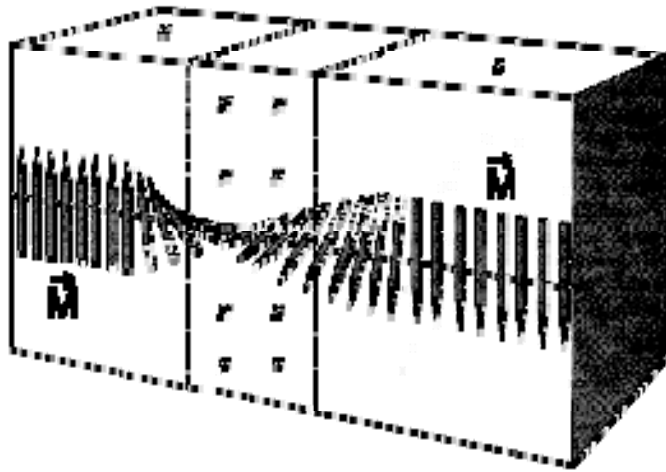


Magnetizado

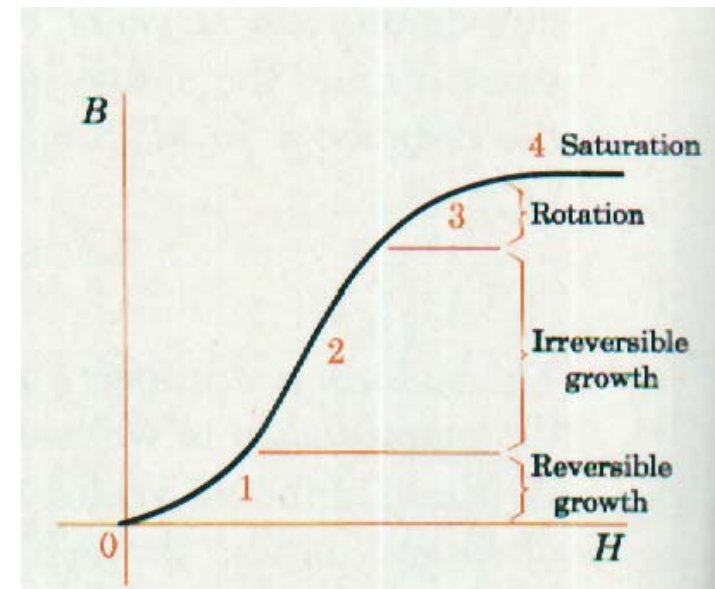
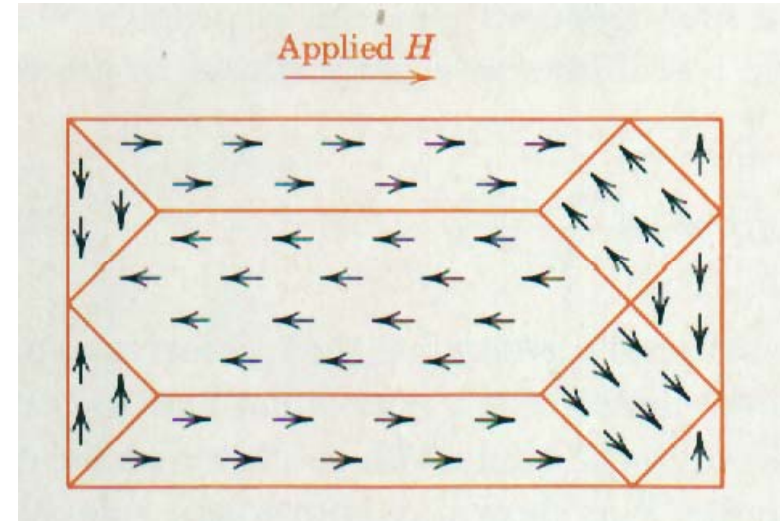
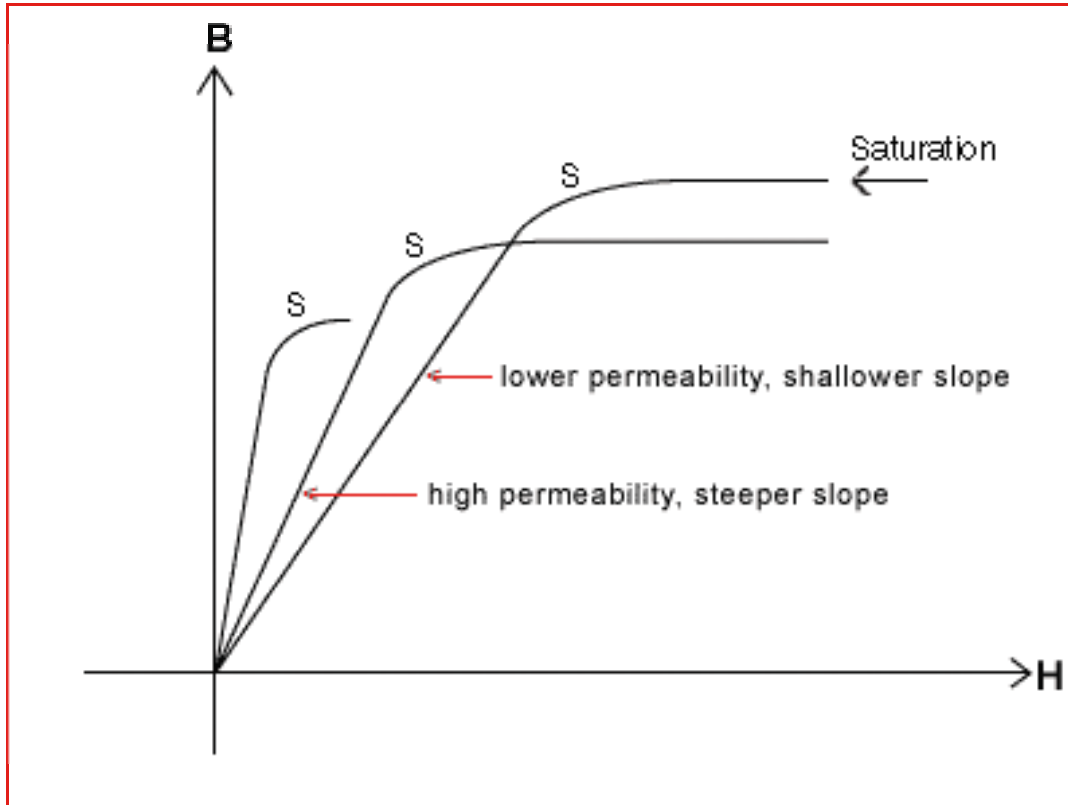


Magnetizado ao contrário

Curvas de magnetização

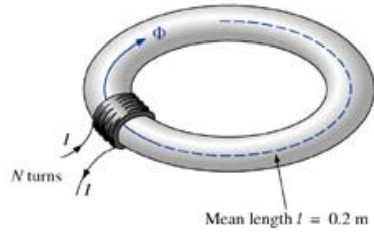


Curvas de magnetização

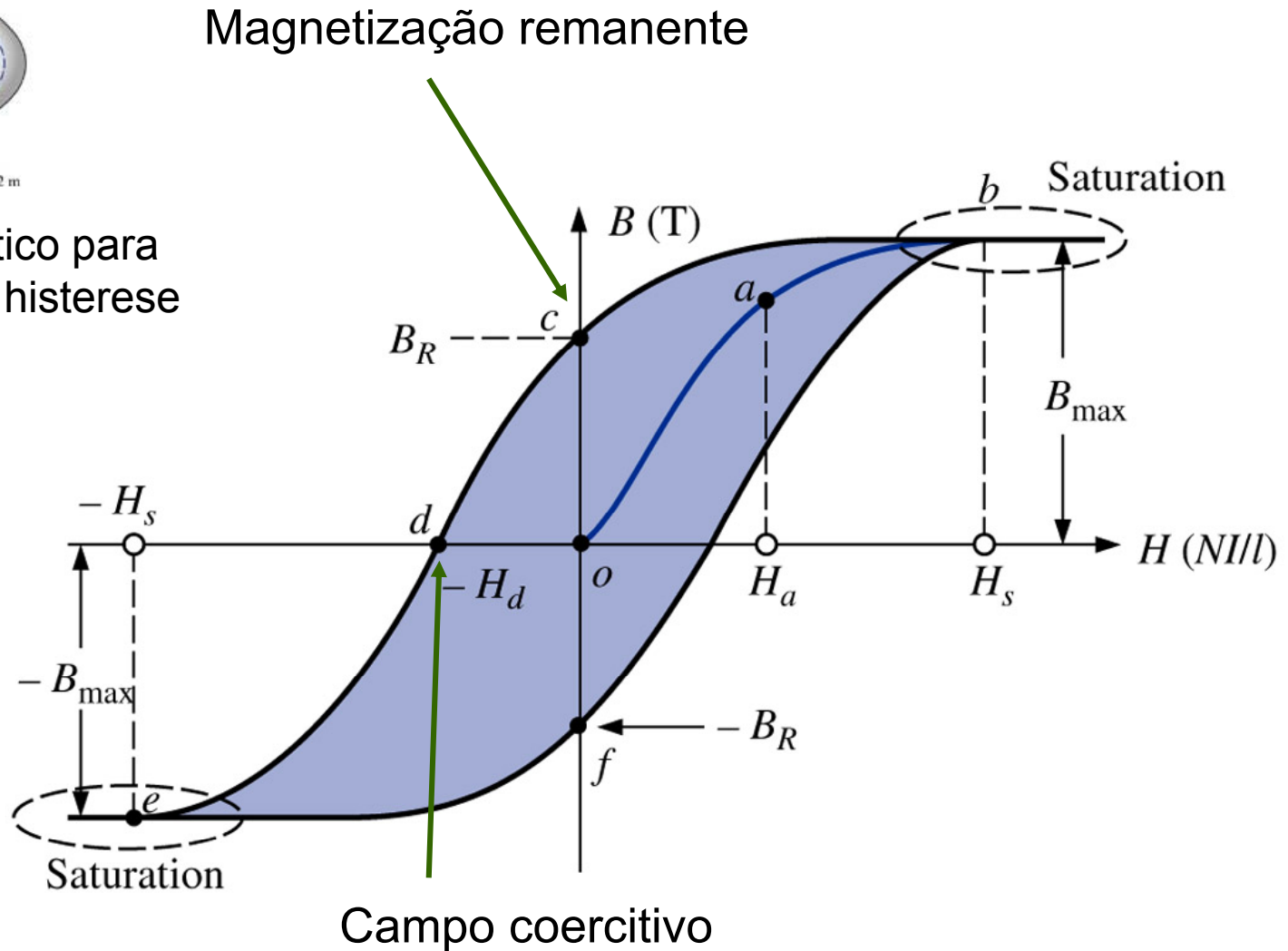


$$H \uparrow = \frac{NI \uparrow}{l}$$

Histerese

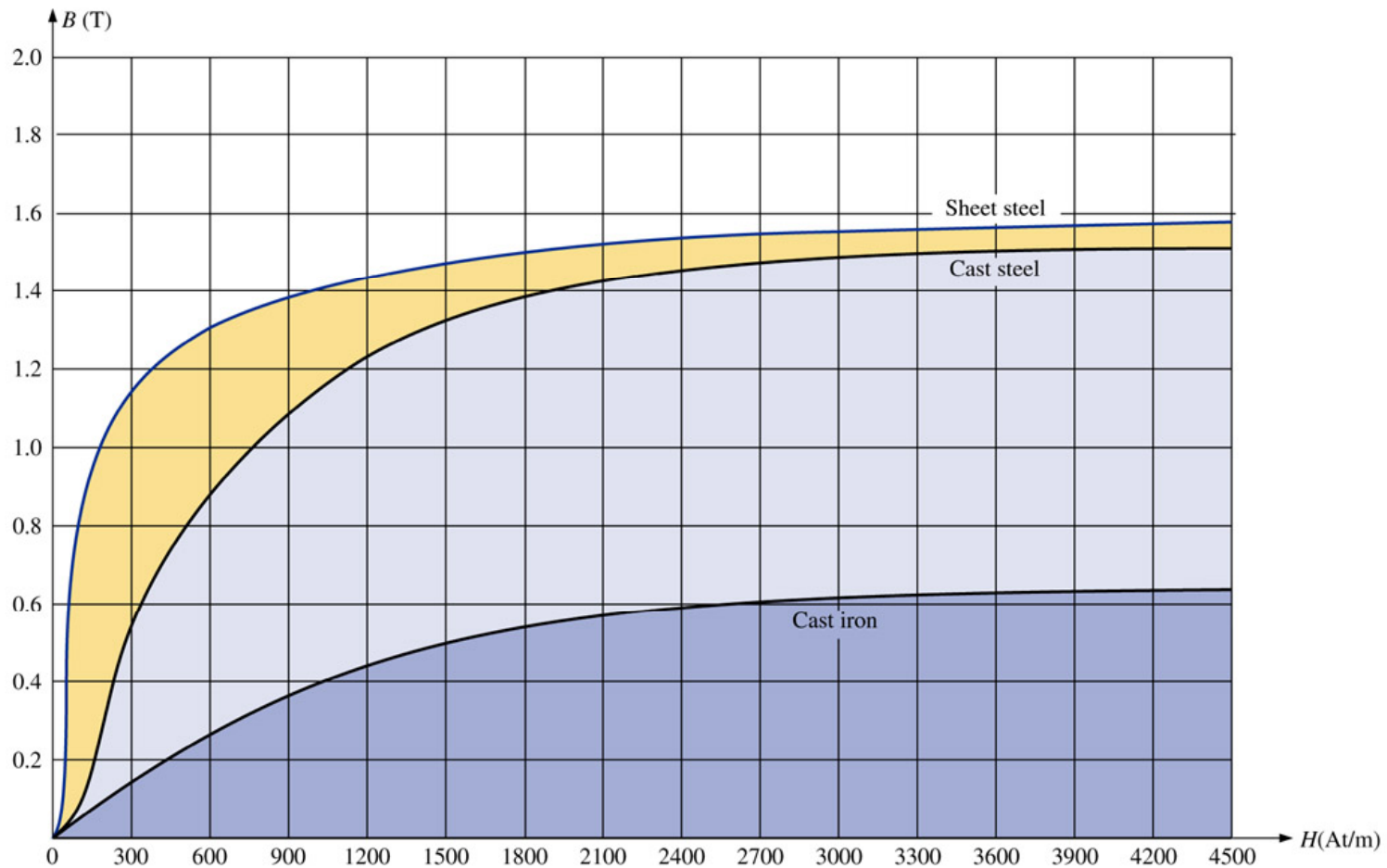


Circuito magnético para obter a curva de histerese



Histerese

Curva normal de magnetização para materiais ferromagnéticos:



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.

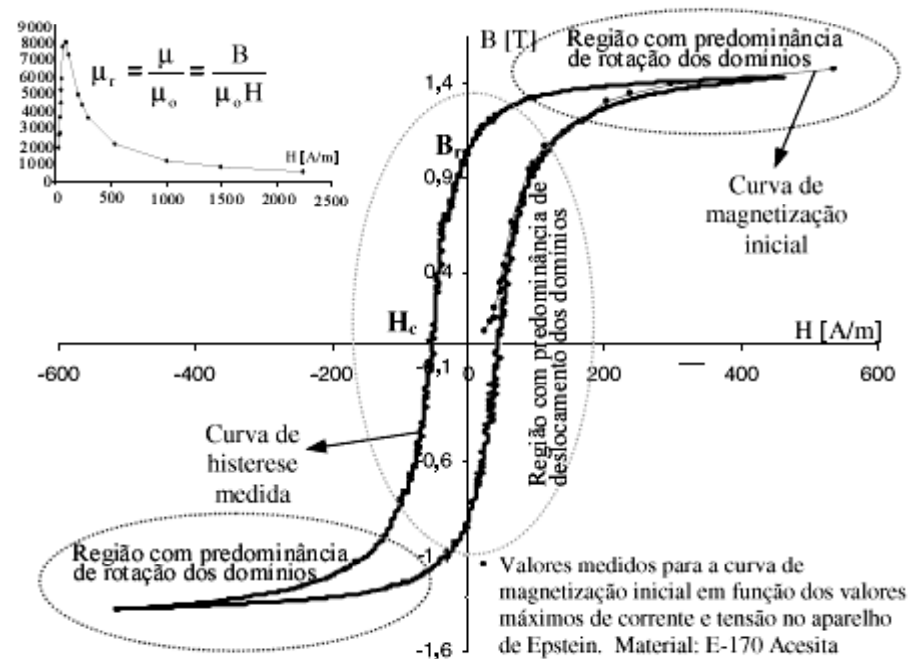


Figura 1: Curva representativa da histerese medida à 1Hz.

Efeito de proximidade e efeito pelicular

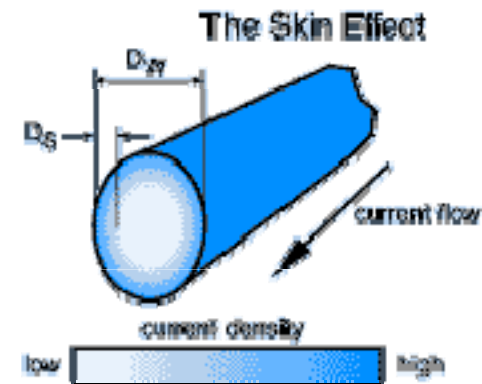
Efeito de proximidade:

-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.

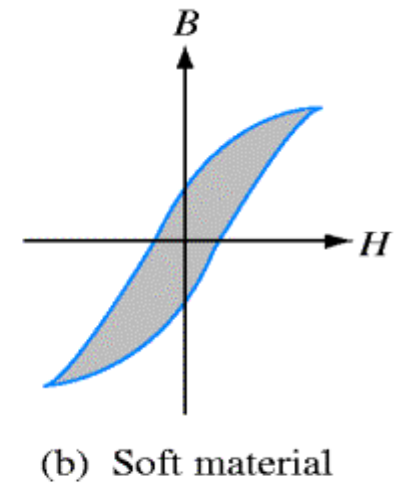
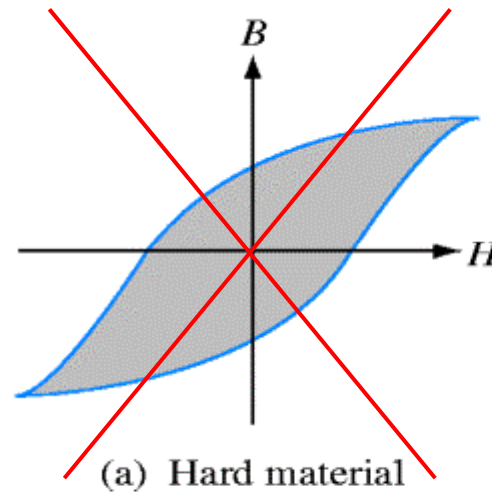
Classificação quanto a susceptibilidade e permeabilidade:

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

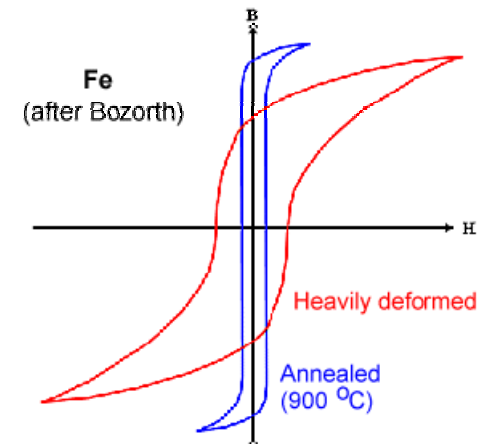
Materiais magnéticos moles

Característica geral:

- Não apresentam magnetismo remanente.



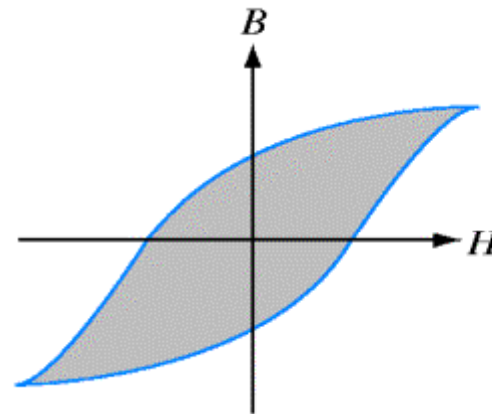
Recozimento →



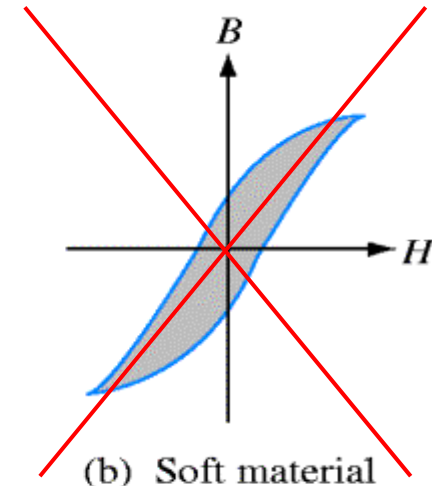
Materiais magnéticos duros

Característica geral:

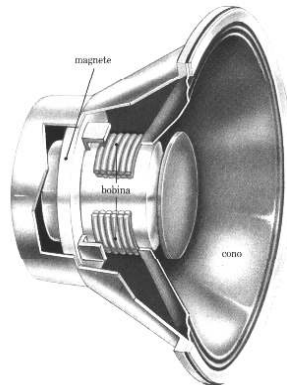
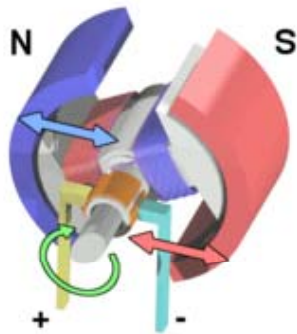
- Apresentam elevado magnetismo remanente.



(a) Hard material



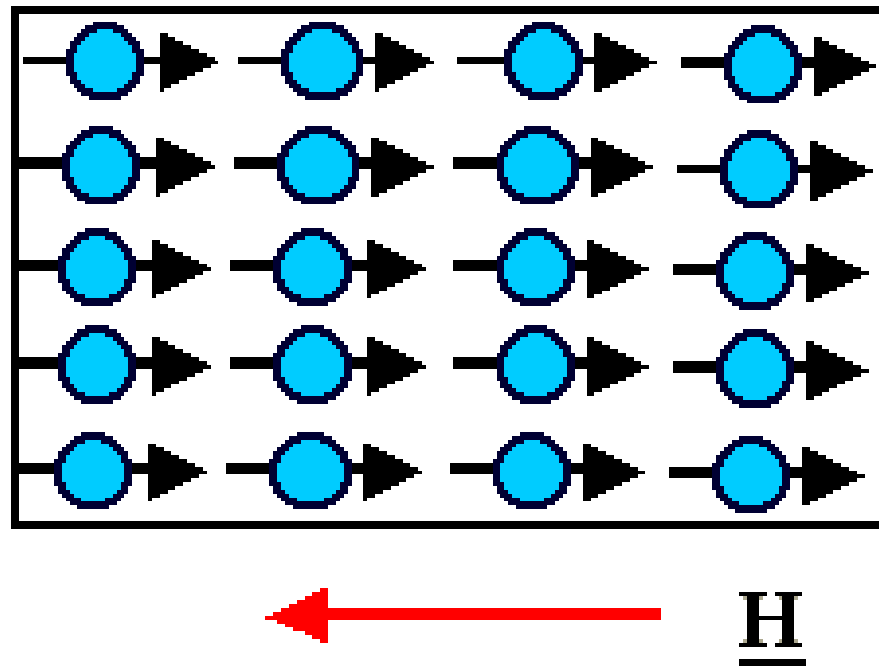
(b) Soft material



Materiais diamagnéticos

Características:

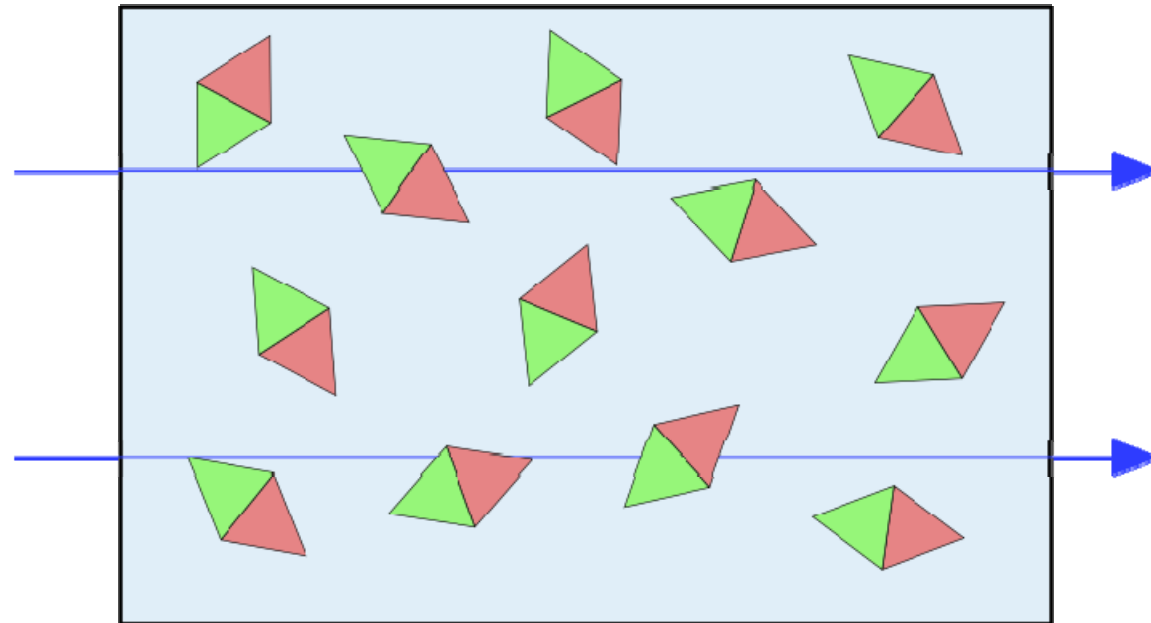
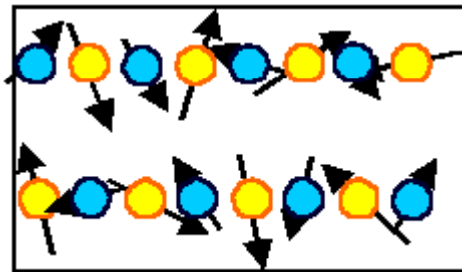
- Apresentam susceptibilidade negativa $\approx 10^{-5}$;
- Permeabilidade abaixo de 1, $\mu < 1$;
- Exemplos: gases inertes, metais (cobre, bismuto, ouro, etc.).



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.

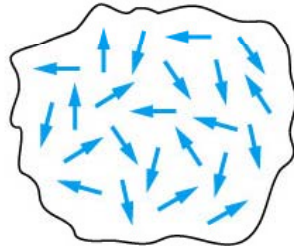


Materiais ferromagnéticos

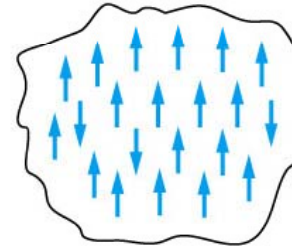
Características:

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

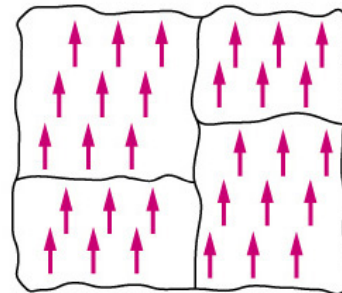
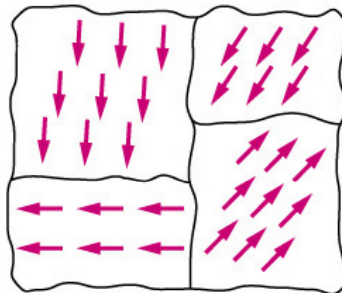
Magnetic field absent



In presence of magnetic field



Paramagnetism

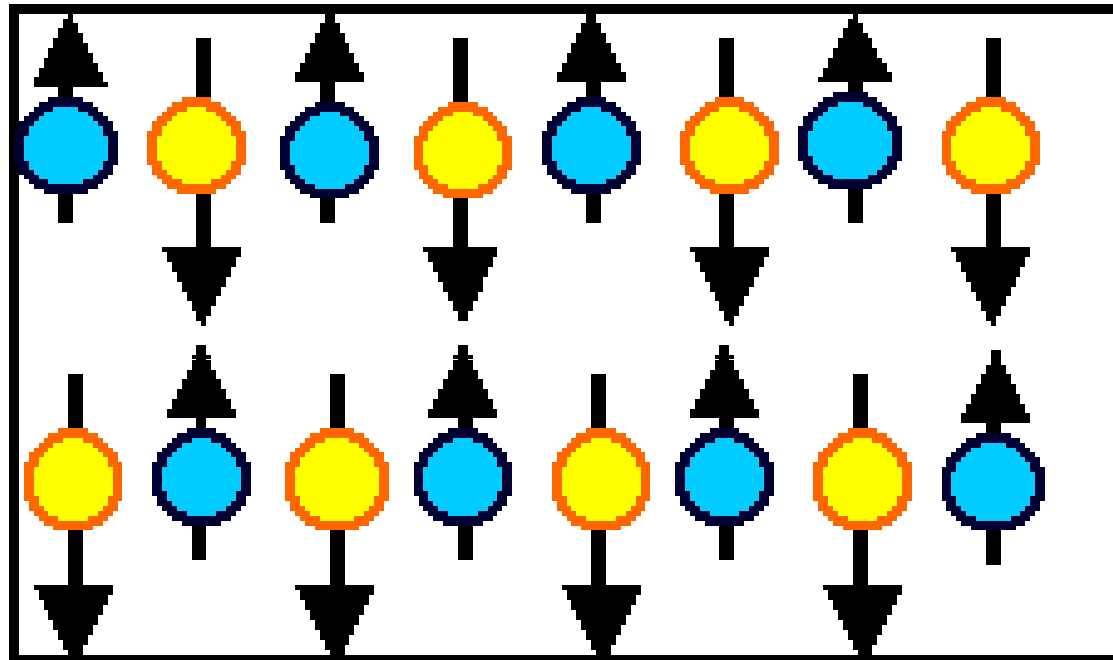


Ferromagnetism

Materiais ferrimagnéticos

Características:

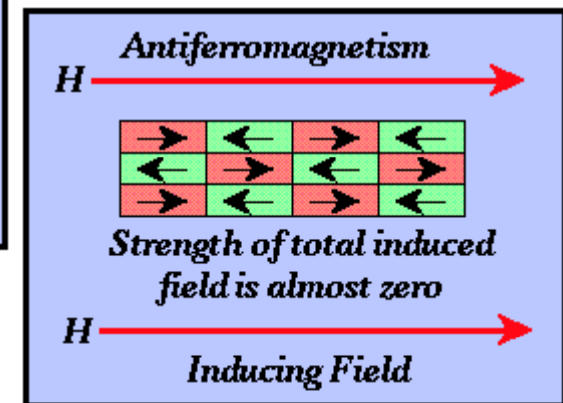
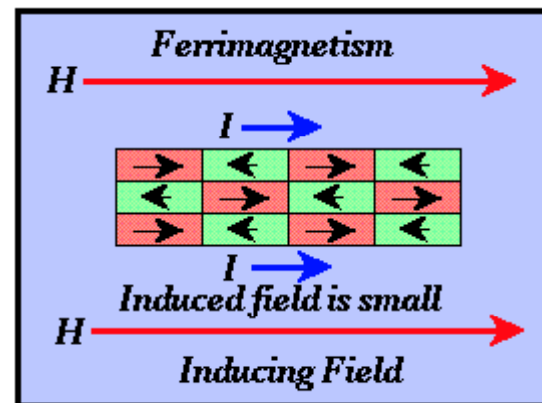
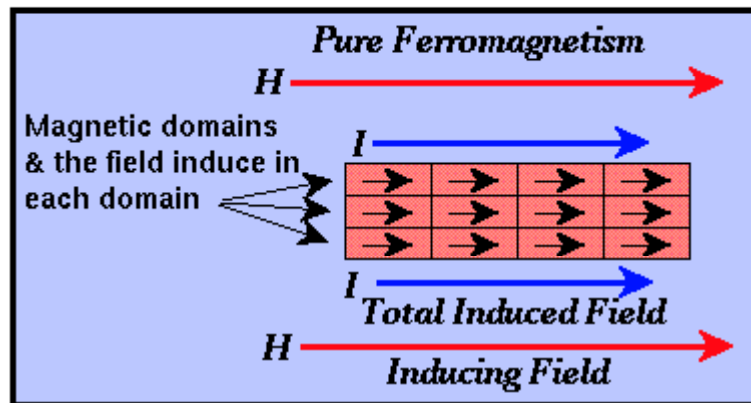
- Apresentam características semelhantes aos ferromagnéticos;
- Os momentos antiparalelos não são exatamente iguais;
- Magnetização resultante não é nula;
- Exemplo: ferrites, possuem rapidez na resposta da magnetização e alta resistividade.



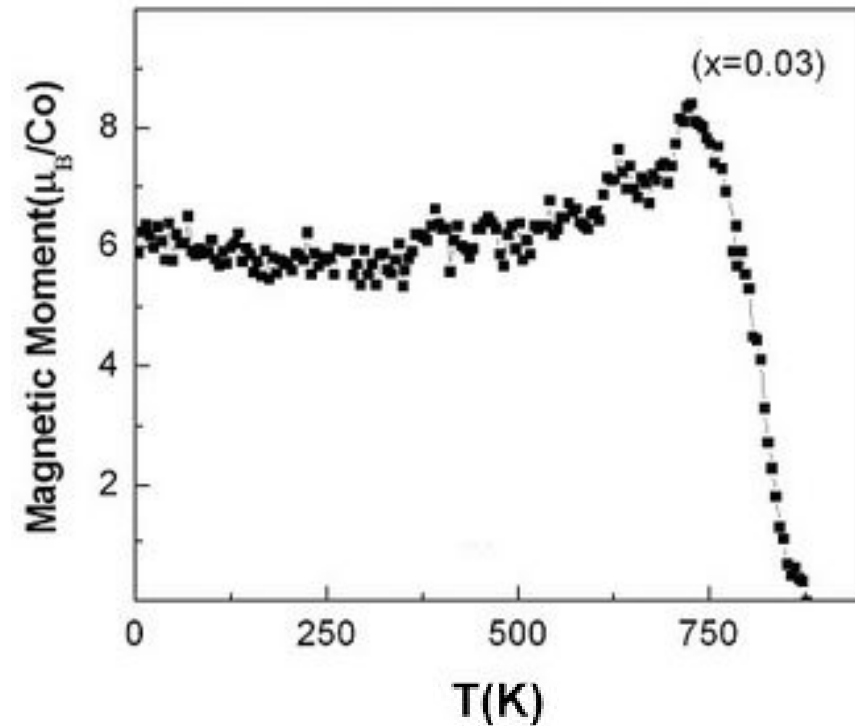
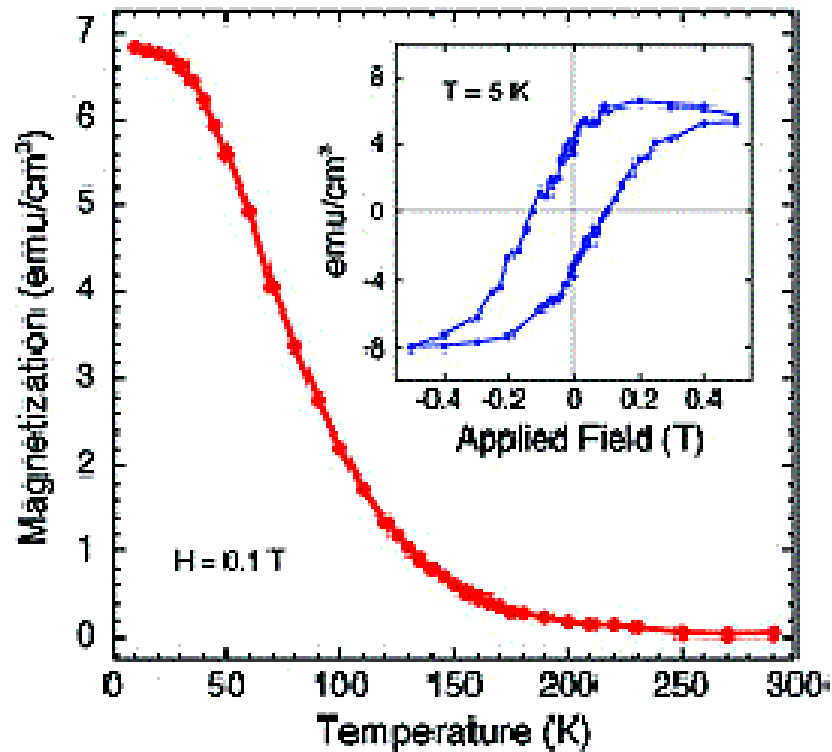
Materiais antiferromagnéticos

Características:

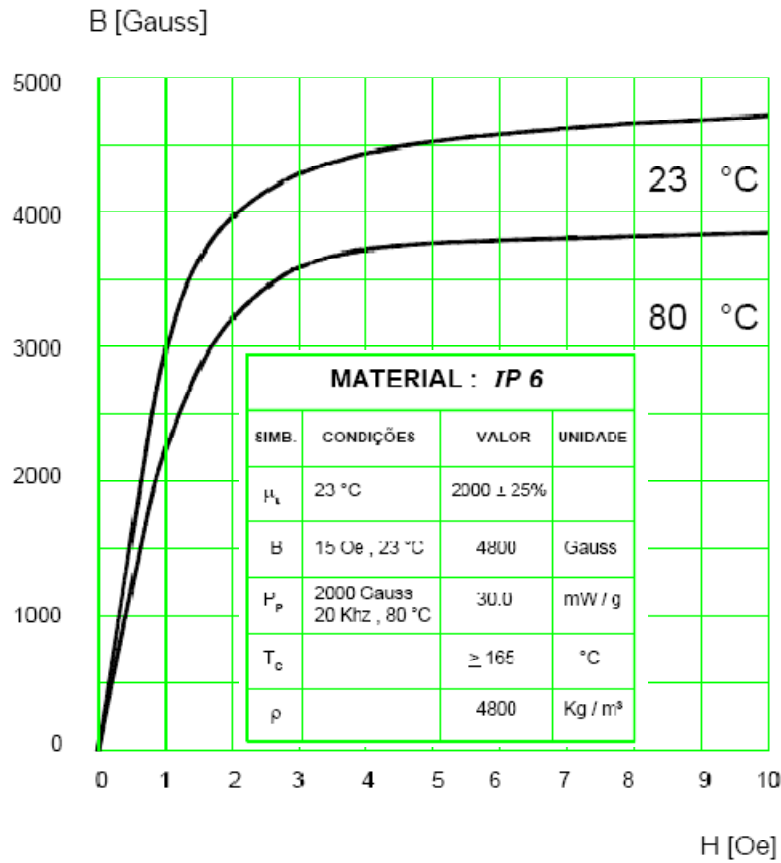
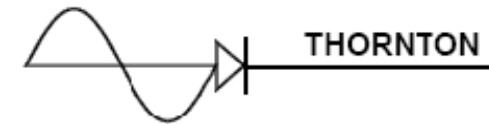
- Apresentam características semelhantes aos ferromagnéticos;
- Os momentos antiparalelos são iguais;
- Magnetização resultante é nula;
- Exemplo: cabeçotes de leitura de gravação magnética.



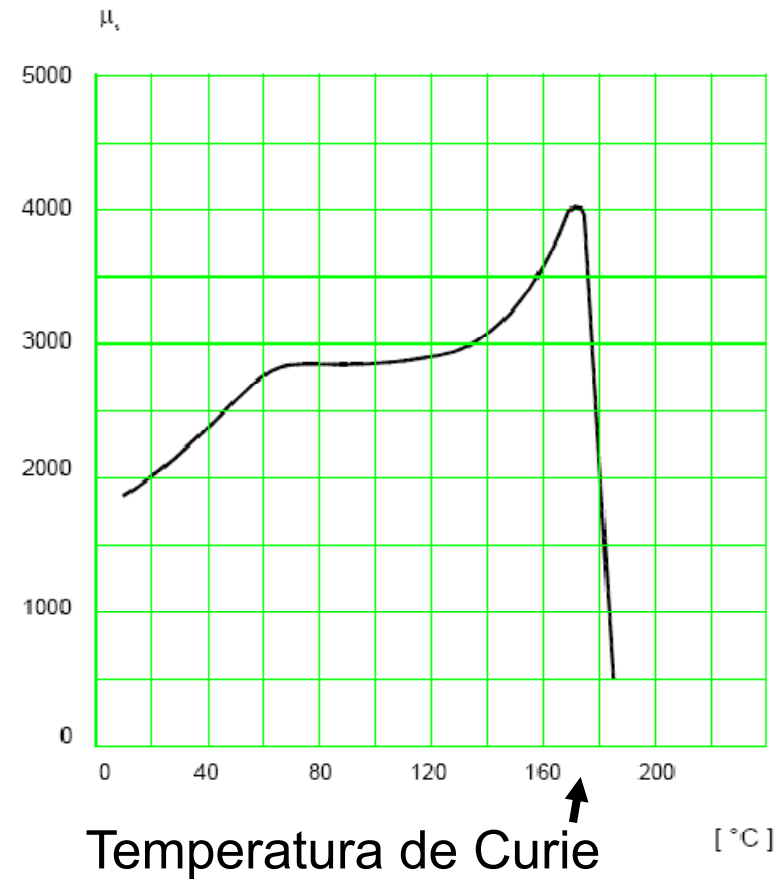
Fluxo magnético versus temperatura



Permeabilidade versus temperatura



Típico $B \times H$



$\mu_i \times$ Temperatura

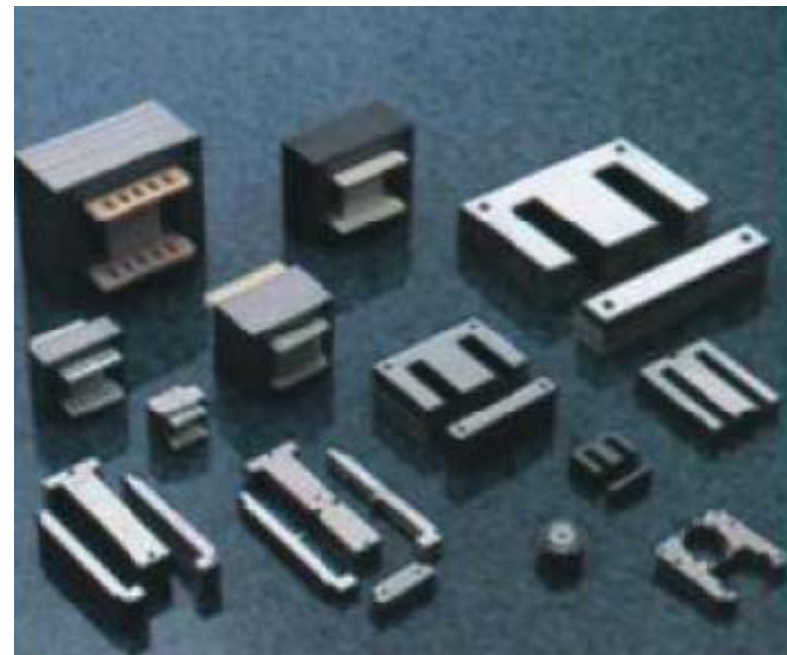
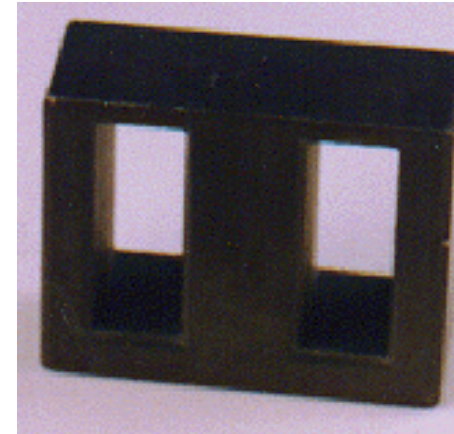
Núcleos magnéticos

Perdas magnéticas:

- Por correntes de Foucault;
- Perda por histerese.

Perdas dependem de:

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



Núcleos magnéticos

Núcleos:

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



Características versus aplicações

Freios magnéticos:

- Alta resistividade.

Estabilizadores de tensão e acionamentos:

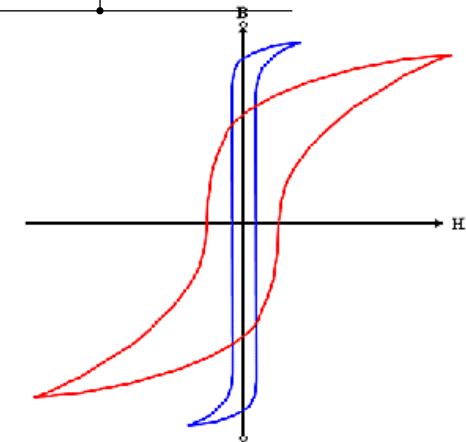
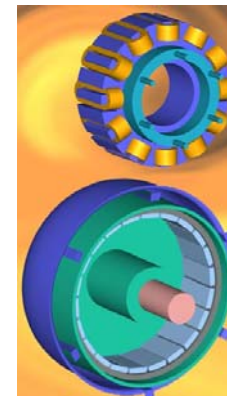
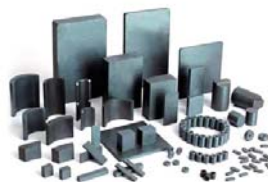
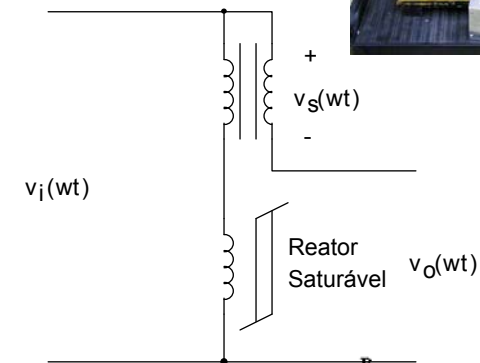
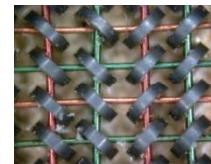
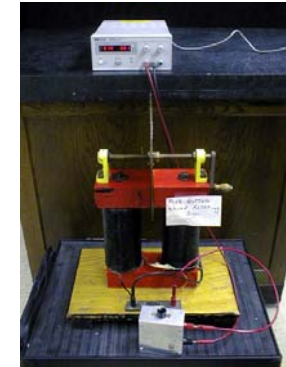
- Operação na saturação.

Memórias:

- Laço de histerese retangular.

Ímãs permanentes:

- Elevado magnetismo residual.



Materiais empregados em núcleos magnéticos

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

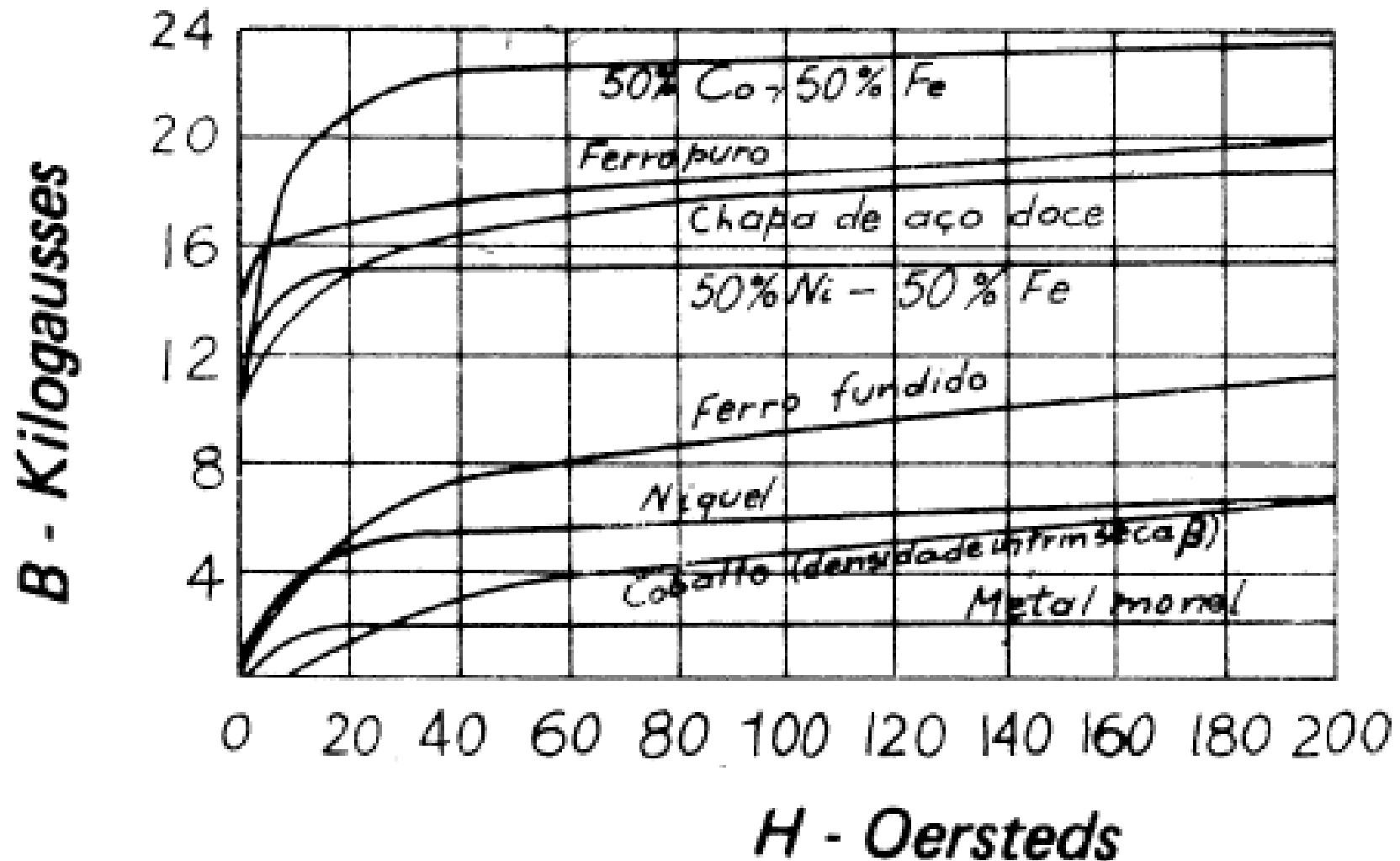
Ligas de ferro-silício: até 6,5% de silício, mas se torna quebradiço. Máquinas estáticas usam mais Si do que máquinas girantes.

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.

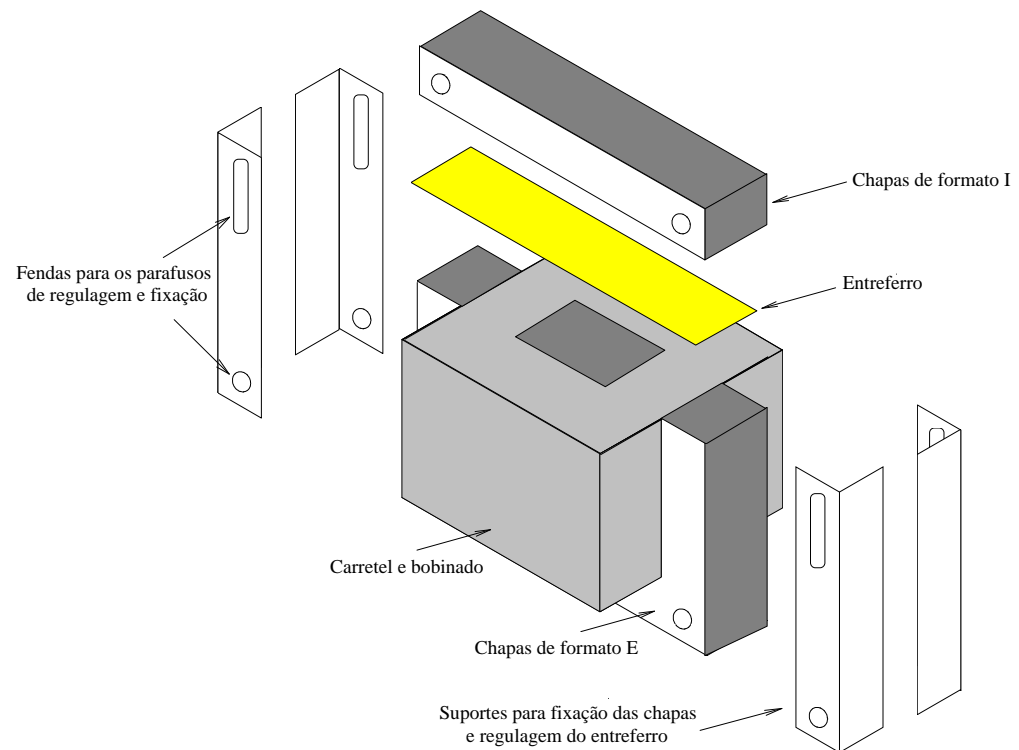
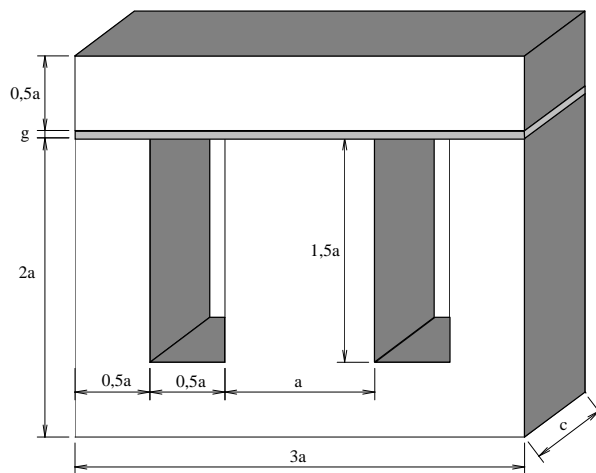
Materiais empregados em núcleos magnéticos



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.

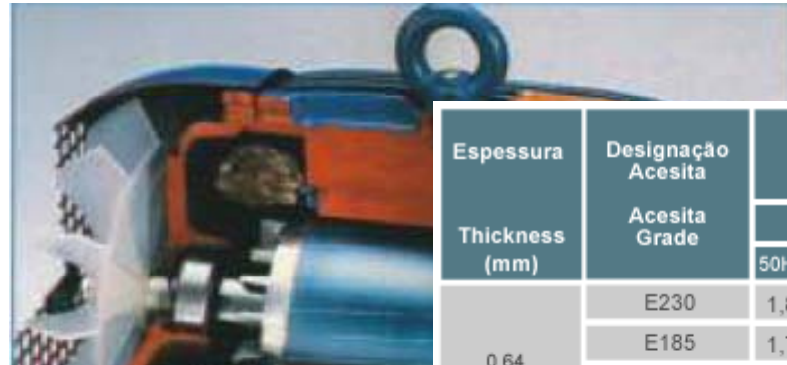


<http://www.acesita.com.br>

Núcleos magnéticos laminados



Aço Silício GNO
Características Magnéticas Típicas



AÇOS SILICIOSOS DE GRÃO NÃO ORIENTADO

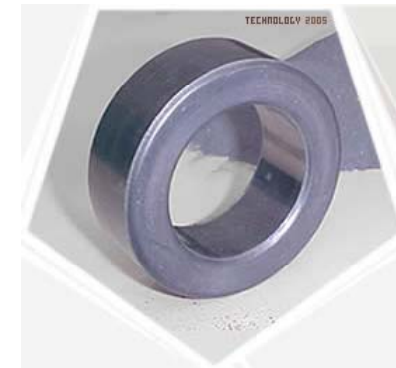
O aço silicioso GNO totalmente processado apresenta suas propriedades magnéticas plenamente desenvolvidas.

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	1,58	1,67	1,78			
	E137	1,24	1,58	2,85	3,65						
	E125	1,07	1,37	2,70	3,43	1,54	1,63	1,75			
	E115	1,04	1,34	2,59	3,32						
	E110	1,01	1,30	2,51	3,23						
E105	0,94	1,25	2,42	3,11	1,62	1,71	1,83				
0,35	E170	1,15	1,44	2,93				3,81			
	E157	1,14	1,43	2,87				3,58	1,59	1,70	1,81
	E145	1,08	1,35	2,82				3,52			
	E137	1,02	1,28	2,66				3,34	1,68	1,80	
	E125	0,94	1,18	2,50	3,13						

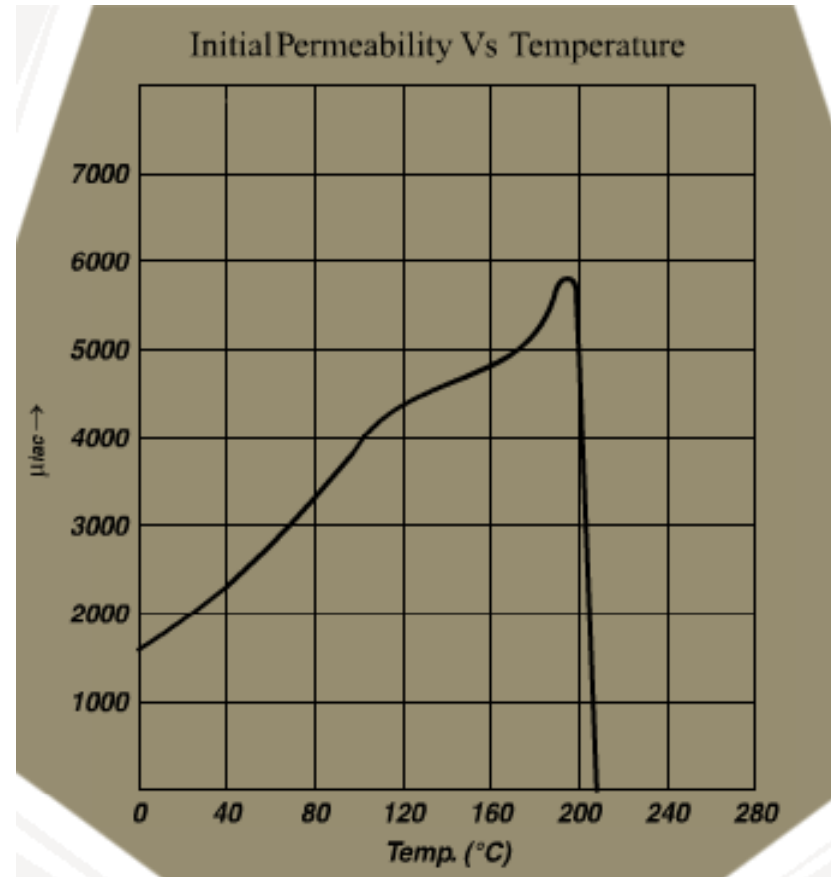
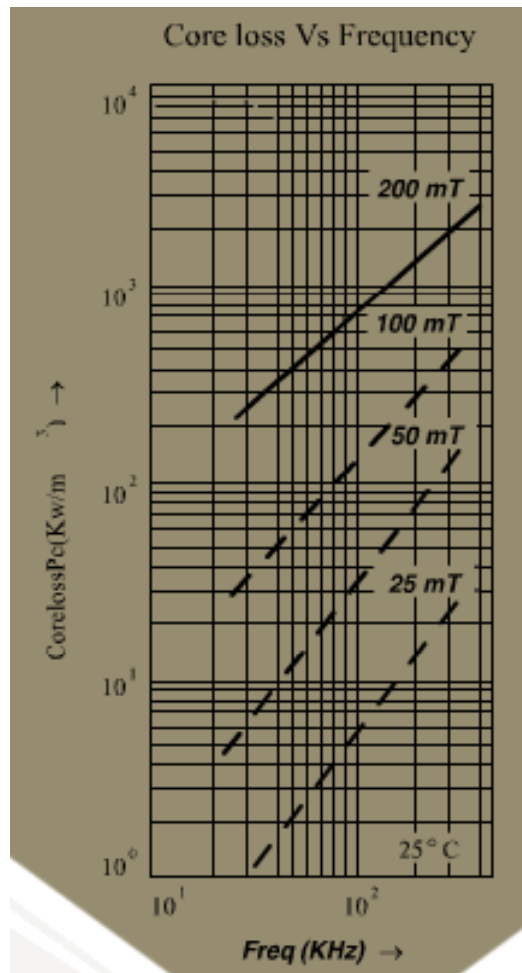
Núcleos magnéticos compactos



Núcleos magnéticos compactos



Ferrite



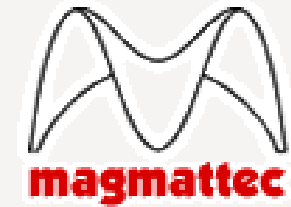
Núcleos magnéticos compactos

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](#)

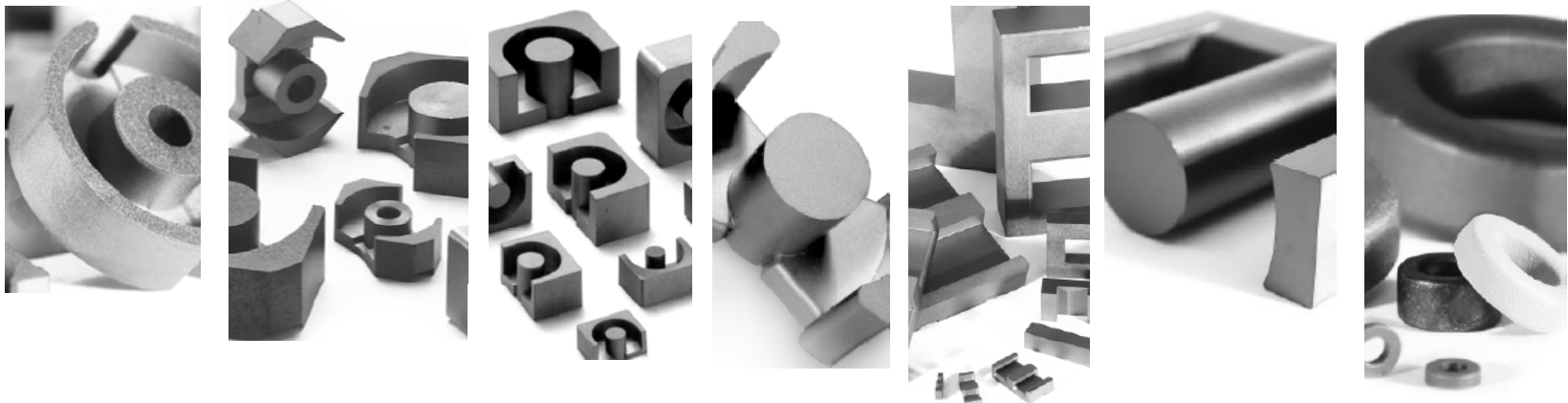


Núcleos magnéticos compactos



TABLE 1: FERRITE CORE COMPARATIVE GEOMETRY CONSIDERATIONS

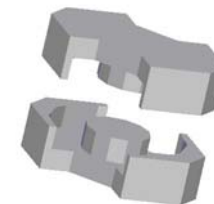
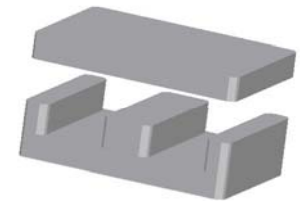
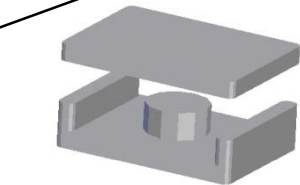
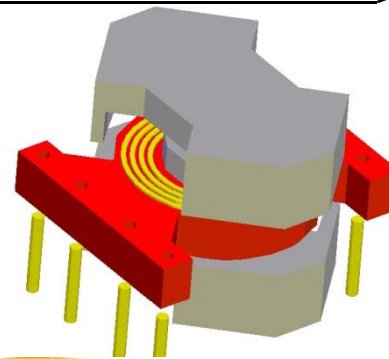
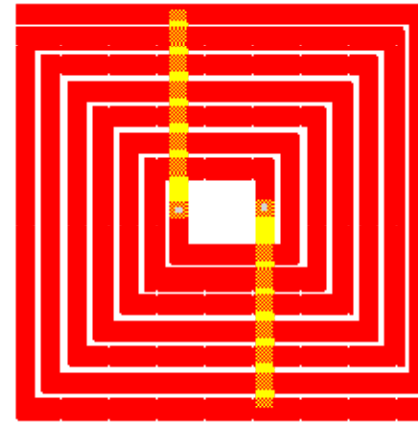
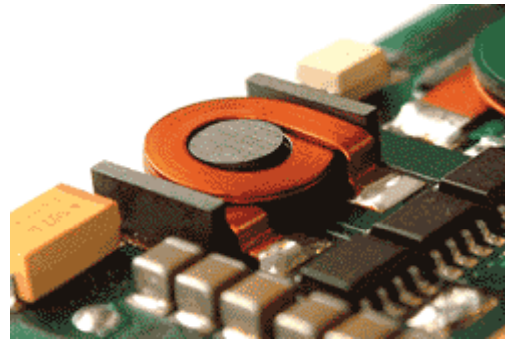
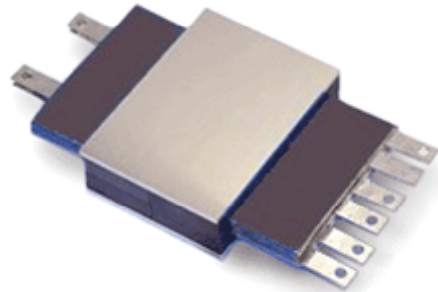
	POT CORES	DOUBLE SLAB, RM CORES	EP CORES	PQ CORES	E CORES	E _C , ETD, EER, ER CORES	TOROIDS
See Catalog Section	6	7-8	9	10	11	12	13
Core Cost	High	High	Medium	High	Low	Medium	Very Low
Bobbin Cost	Low	Low	High	High	Low	Medium	None
Winding Cost	Low	Low	Low	Low	Low	Low	High
Winding Flexibility	Good	Good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



Núcleos magnéticos compactos



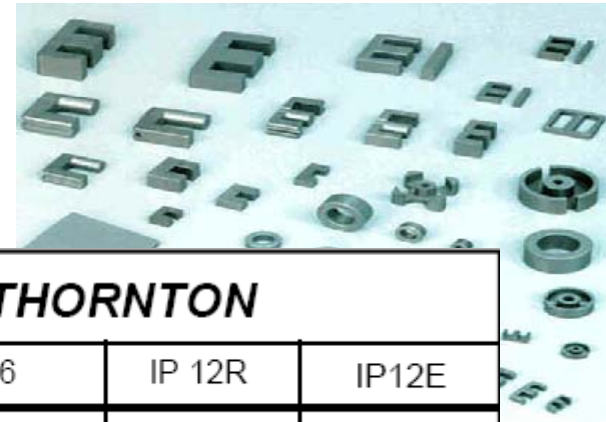
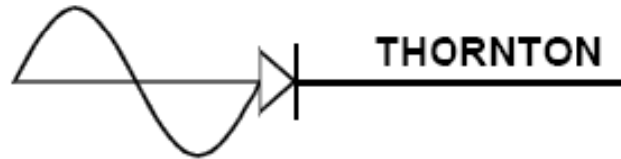
Núcleos planares



<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