

Materials Magnéticos

Macios (soft)

Materiais macios

Principais características

Magnéticas

- ❑ Alta magnetização de saturação
- ❑ Alta permeabilidade magnética
- ❑ Mínima dissipação de energia

Mecânicas

- ❖ Boa conformação mecânica
- ❖ Fácil de cortar
- ❖ Alta resistência à oxidação e corrosão
- ❖ Barato
- ❖ Reciclável

Principais materiais macios

Cristalinos a base de Fe

Chapas de Fe-Si de grão orientado

Chapas finas de Fe-Si

Altos teores de Si em Fe-Si

Fe-Ni e Fe-Co

Ferritas Macias

Materiais Amorfos

Materiais Nanocristalinos

Perdas magnéticas em condutores

► Modelo de Pry e Bean (PB)

Movimento de parede de domínio → variação de fluxo → correntes parasitas distribuídas não homogeneamente

- Os domínios são considerados infinitos em comprimento em uma bloco retangular de espessura t e largura d .
- Este modelo é particularmente adequado para chapas de Si de grão orientado.

As paredes de domínio são consideradas rígidas, se movem em fase e senoidalmente como função do tempo.

Das equações de Maxwell obtém-se a expressão:

$$(P/f)_{PB} = \frac{16tdB_0^2}{\pi\rho} f \sum_{n \text{ ímpar}} \frac{1}{n^3} \cot \left(\frac{n\pi d}{t} \right)$$

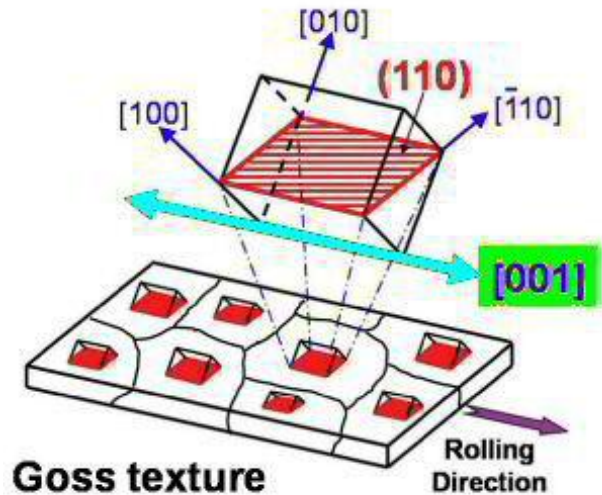
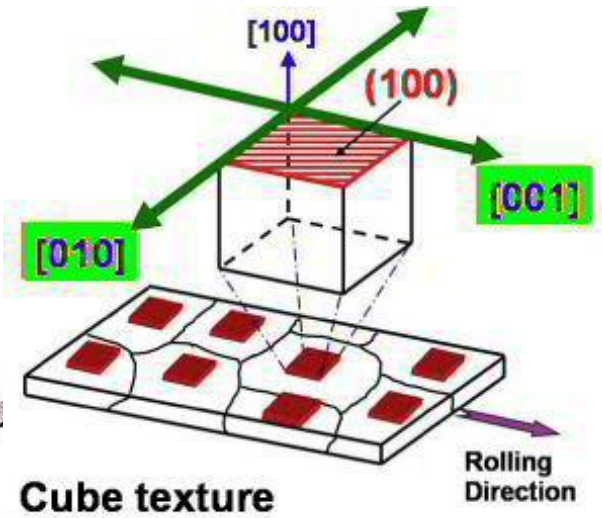
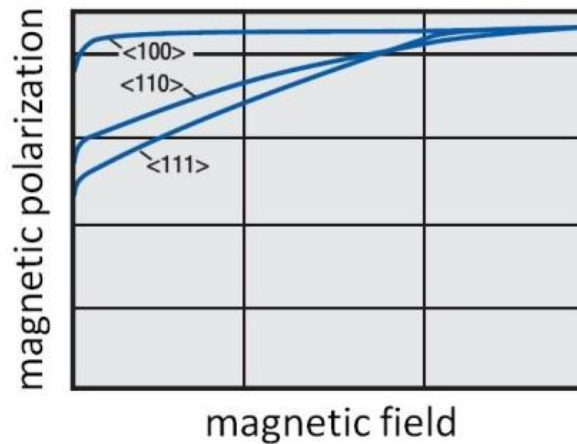
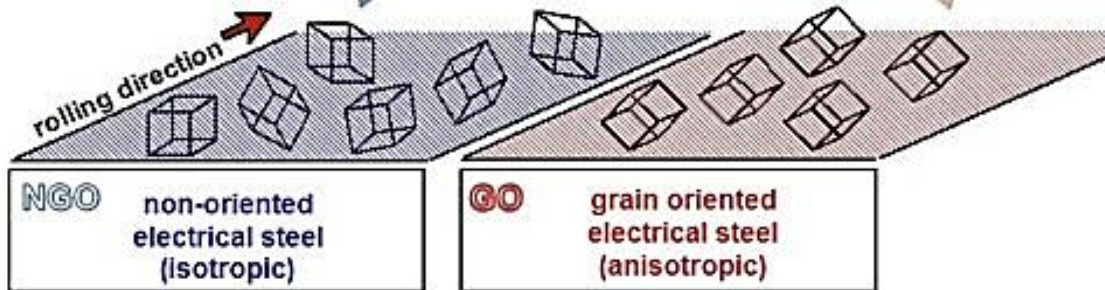
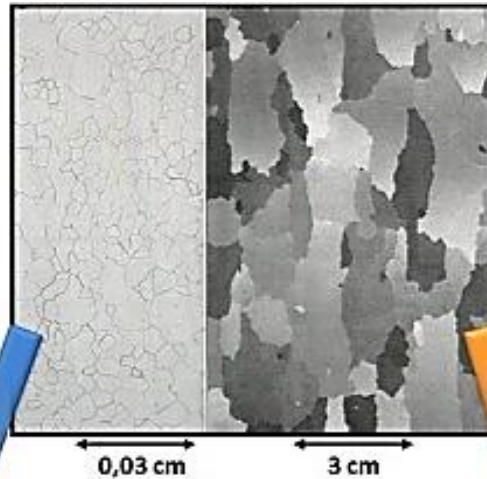
Fe-Si

- ▶ Melhor que Fe puro → maior resistividade → menores perdas por correntes parasitas (mas menor M_s)
- ▶ Máximo de Si é de $\sim 3\%$ em atômico → monofásico (teores maiores → processamentos especiais)
- ▶ Impurezas como C, N, O e S < 20 ppm e grãos grandes (pouco contorno de grão) → baixo H_c
- ▶ Redução das perdas AC → chapas finas

Fe-Si: Perda magnética a 1,5T e 60 Hz

- ▶ Aço ABNT 1006 sem recozimento (SR) → 18W/kg.
- ▶ Recozimento especial reduz de 18 → 10W/kg.
- ▶ A adição de silício e alumínio ao aço aumenta sua resistividade elétrica (reduz a intensidade das correntes elétricas parasitas) → 4,2W/kg.
- ▶ A redução da espessura de 0,5 para 0,3 mm é capaz de reduzir as perdas de 3,6 → 2,8W/kg.
- ▶ O aço tipo grão-orientado chega a apenas 1W/kg na direção de laminação, mas tem perdas de 4 W/kg na direção transversal.

Fe-Si: Grão Orientado



Fe-Si: Camada protetora de 2 - 3 μm

- ▶ Isolamento elétrico
- ▶ Exercem pressão longitudinal de alguns MPa.
- ▶ Favorece a anisotropia na direção da laminação e atua no sentido de alinhar os domínios magnéticos na direção da laminação.
- ▶ Elimina a formação de estruturas secundárias na superfície.
 - Rugosidade mecânica
 - Radiação a laser, contínua ou pulsada
 - Eletro-usinagem
 - Recobrimentos de filmes finos orgânicos ou minerais

Fe-Si: aplicações

- ▶ **Chapas finas:**
- ▶ dispositivos em que haja variação rápida de indução;
- ▶ máquinas rotativas de alta velocidades;
- ▶ máquinas com um número grande de pólos,
- ▶ etc

Fe-Si: aplicações

- ▶ **Ligas com alto teor de Si:** 6,5% de Si é o teor que maximiza as propriedades eletromagnéticas da liga:
 - magnetostricção nula, alta resistividade, propriedades de supressão da formação de carbeto.
 - **Mas ... extremamente frágil, não é possível laminar.**
- ▶ **Como ultrapassar esta limitação?**
 - Solidificação rápida → fitas de espessuras de 30 a ~ 150 μm → TT para $T < 1100^\circ\text{C}$ → grãos grandes e textura adequada.
 - Ligas enriquecidas em Si, por difusão → estágios finais de fabricação, após a laminação.

Família do Fe-Ni

- ▶ Estrutura cfc.
- ▶ T_c próxima a T ambiente.
- ▶ Tem máxima M_s para ~ 50% de Ni
- ▶ Magnetostricção (λ) e Anisotropia
- ▶ Magnetocristalina (K) ~ nula para 80% de Ni.
- ▶ Baixa resistividade >>> adição de Cr ou Mo.
- ▶ Fácil de conformar mecanicamente

Aplicações: Ligas com % Ni ~ 30 %

- ▶ M_s varia significativamente com a temperatura e é reversível.
- Usado como "shunt" magnético para o magneto permanente em circuitos magnéticos, que sofrem aquecimento durante a operação. O material macio supre parte do fluxo magnético que decresce quando a temperatura aumenta.
- Medidores elétricos, medidores que têm bobina que se movem; tacógrafos; autofalantes. → ligas de 28 - 30% Ni com $T_c \sim 60^\circ\text{C}$.
- Aparelhos como panela elétrica de fazer arroz necessitam de materiais com T_c de 150 - 200 $^\circ\text{C}$ → ligas de 38 - 40% Ni com 10% de Cr.

Aplicações: Ligas com % Ni ~ 50 %

- ▶ Tem saturação de 1,6 T e alta permeabilidade, além de resistência à corrosão melhor que o Fe-Si.
- ▶ **48% Ni:** Tipo Anhyster; usados na forma maciça em relês e dispositivos de segurança.
- ▶ As vezes em folhas finas em circuitos bobinados e motores de tamanho pequeno.
- ▶ A linearidade da magnetização com o campo assegura sinais sem distorção.
- ▶ **50% Ni** >> Laminação produz textura cúbica → $M_r/M_s \sim 0,98$
- ▶ >> toróides usados em amplificadores
- ▶ **56% Ni** >>> magnetostricção isotrópica $\lambda_{111} = \lambda_{100} = 25 \times 10^{-6}$ → TT com campo aplicado → alta permeabilidade

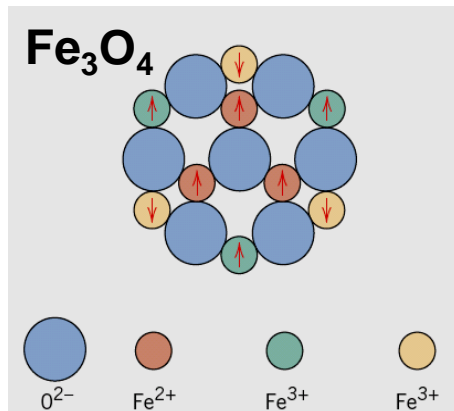
Família do Fe-Co

- ▶ Grandes virtudes → alto valor de M_s e T_c
- ▶ Transformação $\alpha \rightarrow \gamma$ em altas temperaturas $\sim 1100^\circ\text{C}$
- ▶ Fe-35%Co → maior valor de $\mu_0 M_s \rightarrow 2,4 \text{ T}$
- ▶ Cobalto é raro e caro.
- ▶ Permeabilidade menor que ligas Fe-Ni
- ▶ Adição de vanádio melhora a ductilidade.
- ▶ Uso: polos magnéticos em eletroímãs, altas temperaturas (estabilidade térmica), máquinas que demandam alta energia específica.
- ▶ Fe-94%Co é usada até temperaturas de 950°C em bombas eletromagnéticas para metais fundidos.

Ferritas - Material Ferrimagnético

Característica: alinhamento antiparalelo de momentos magnéticos (spins) de átomos vizinhos → momento magnético de cada um dos componentes do par antiparalelo é diferente → não se cancelam → há um momento líquido resultante.

Em geral, todos MFe_2O_4 ,
(M = Metal)
são ferrimagnéticos

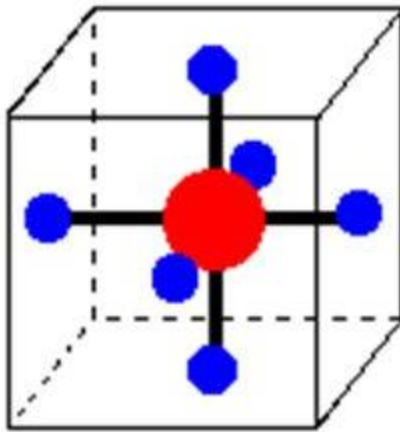


	coordenação octaédrica	coordenação tetraédrica	Momento magnético líquido
Fe^{3+}	↑ ↑ ↑ ↑	↓ ↓ ↓ ↓	<i>Cancelamento completo</i>
Fe^{2+}	↑ ↑ ↑ ↑	—	

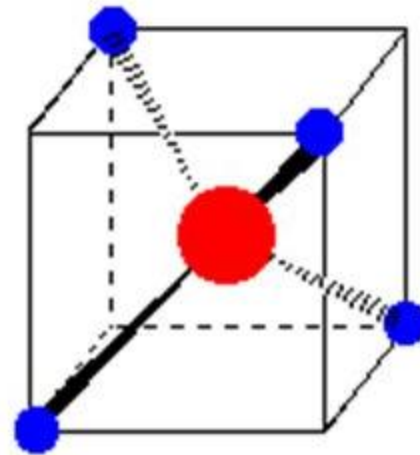
$Fe^{2+} (4\mu_B)$ e $Fe^{3+} (5\mu_B)$

Ambientes

Octaédrico



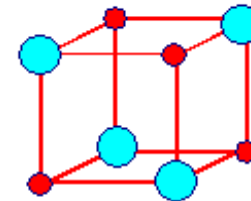
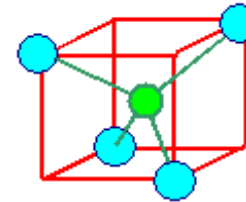
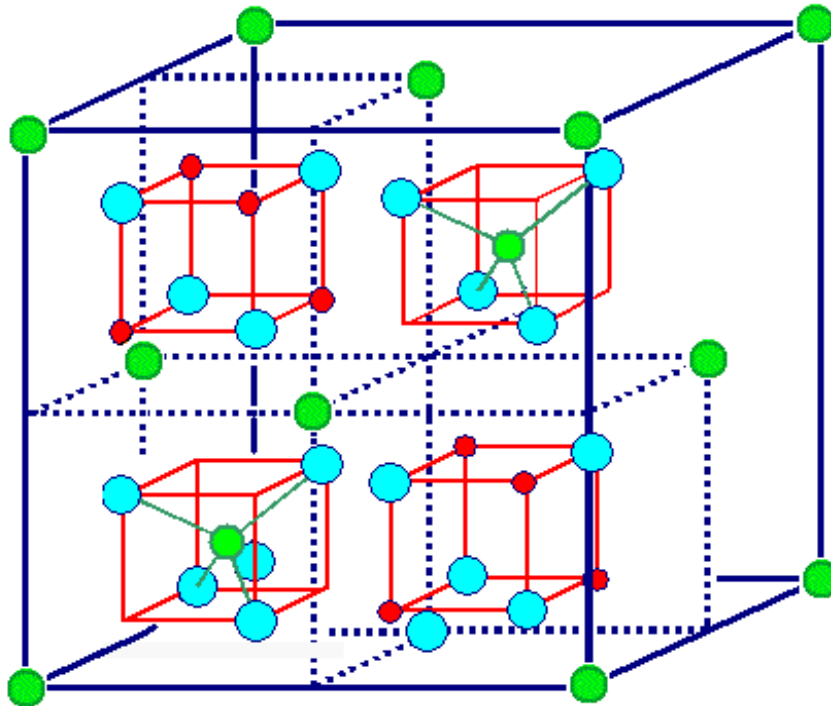
Tetraédrico






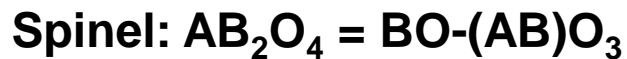
Ferritas - Estrutura Espinel

32 Sítios octaédricos – 16 ocupados

64 Sítios tetraédricos – 8 ocupados



-  Oxigênio
-  Átomos B - Sítios octaédricos
-  Átomos A – Sítios tetraédricos



Íons dos sítios tetraédricos e octaédricos têm spin contrários

Ferritas - Estrutura Espinel

- ▶ MFe_2O_4 , onde M são íons que substituem os íons divalentes de Fe^{+2}
- ▶ Virtudes:
 - Alta resistividade (isolante)
 - Adequado para altas frequências
 - Alta resistência à corrosão
- ▶ Desvantagens
 - Baixo valor de M_s
 - Valor de T_c relativamente baixo
 - Propriedades mecânicas inferiores

Ferritas - M = Ni-Zn e Mn-Zn competindo com Fe-Si

- ▶ **Magnetização de Saturação:** 0,35 para NiZn e 0.60 T para Mn-Zn.
- ▶ **Temperatura de Curie:** 100 a 600°C para NiZn ; 130 a 250°C para Mn-Zn.
- ▶ **Anisotropia;** negativa; decresce com T; $- 5,1 \times 10^{-3} \text{J/m}^3$ para NiFe_2O_4 ; direção de fácil magnetização $\langle 111 \rangle$
- ▶ **Magnetostricção:** a base de Zn \rightarrow 10 ppm para NiZn e 1 ppm para Mn-Zn
- ▶ **Resistividade:** 1 a $10^{10} \Omega$.
- ▶ **Permeabilidade:** é constante até uma frequência máxima;
 - 8000 MHz para Ni-Zn
 - 4000 MHz para Mn-Zn

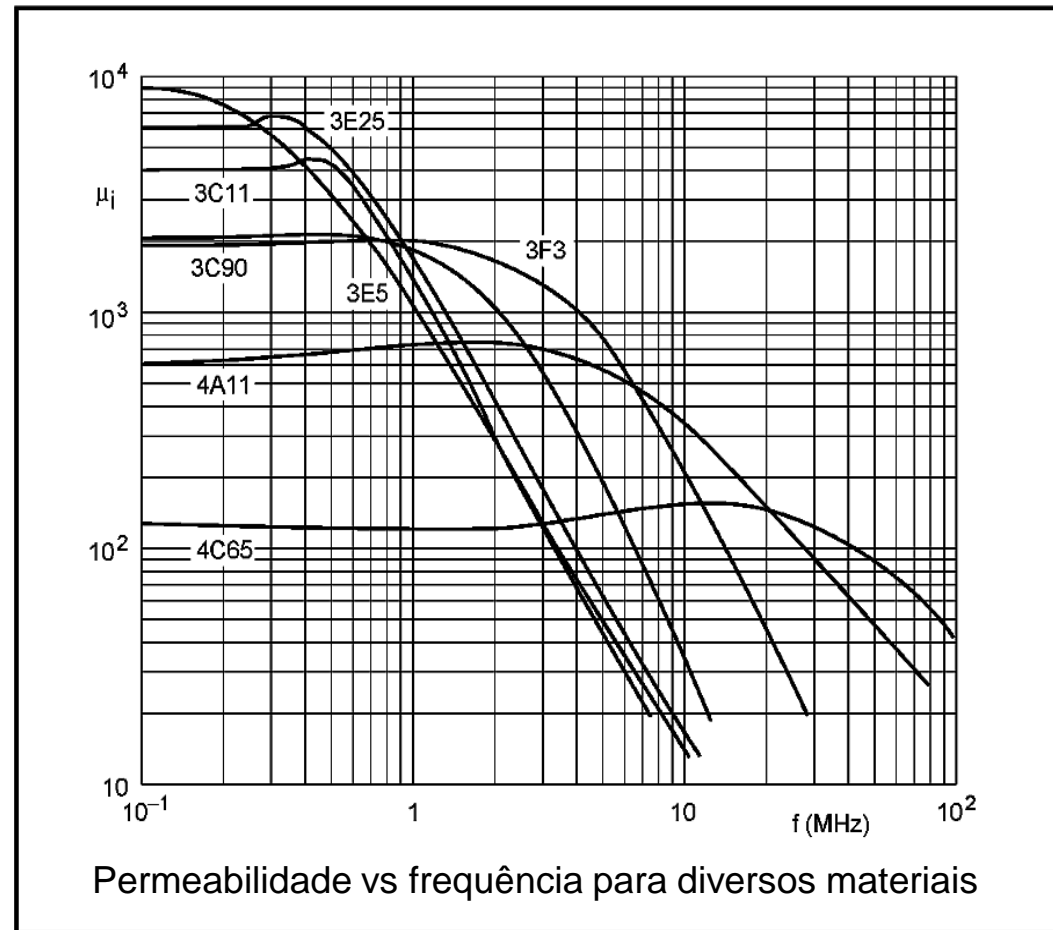
Ferritas Mn-Zn: Eletrônica de potência

- ▶ Transportadores de fluxo
 - Indutores de baixa frequência ~ 20 kHz
 - Indutores de média frequência (100 a 2 MHz): barras de antenas para transmissão de faixas de comprimentos de ondas de médios e longos.
- ▶ Transformadores
 - Banda larga → 400 Hz até 2 MHz (maiores permeabilidades)
 - Baixa potência e pulsados
- ▶ Conversores DC
- ▶ Alta M_s e baixa perda:
 - núcleos de deflexão,
 - transformadores de potência de 700 Hz a 100 kHz.
 - Transformadores de varredura - TV

Ferritas Ni-Zn: baixa potência

- ✓ **Transformadores; antenas transmissoras para comprimentos de onda médios e longos**
 - ✓ Banda larga → até 300 MHz
 - ✓ $\mu_i > 1000$ e 1 - 300 MHz
 - ✓ $500 > \mu_i > 1000$ e 5 - 300 MHz; transformadores de banda larga; transformadores de potência
 - ✓ $160 > \mu_i > 490$ e 500 kHz - 5 MHz
 - ✓ $70 > \mu_i > 150$ e 2 - 20 MHz
- ✓ **Indutores**
 - ✓ $35 > \mu_i > 65$ e 10 - 40 MHz
 - ✓ $12 > \mu_i > 30$ e 20 - 60 MHz
 - ✓ $\mu_i < 10$ e $f > 30$ MHz
 - ✓ ↑ Ni → ↓ μ_i ; também chamadas de Ferroxcube.

Ferritas Ni-Zn



<http://people.zeelandnet.nl/wgeeraert/ferrietUK.htm>



Ligas Amorfas

- ▶ Materiais metálicos solidificados rapidamente -
- ▶ *"melting spinning"*

<https://www.youtube.com/watch?v=76k8FJsluYA>

<https://www.youtube.com/watch?v=00ZrbXz0lWs>

- ▶ Altas resistividades 120 a 150 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ comparados com Fe-Si e Fe-Ni $\sim 30 - 50 \mu\Omega\cdot\text{cm}$
- ▶ *As fitas são bem finas - 30 - 100 μm*

1ª. Liga comercial amorfa - Metglas 2826: $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ (at.%)

Metglas®, Inc., localizado em Conway, na Carolina do Norte, EUA, é o maior produtor do mundo de fitas metálicas amorfas.

Na década de 1970, Metglas, Inc. (Allied Signal, localizava-se em Morristown, New Jersey), foi pioneira no desenvolvimento e na produção de metais amorfos.

Apresenta uma estrutura em que os átomos de metal se organizam num padrão aleatório.

A chave para o processo de fabricação do Metglas Inc. é a rápida solidificação da liga fundida a uma taxa de cerca de um milhão de graus Celsius por segundo (10^6 °C/s).

Metglas®

http://www.metglas.com/products/magnetic_materials/

Metglas[®] 2826MB

- *A base de ferro-níquel; saturação média*

▶ *APLICAÇÕES:*

- ▶ Sensores de campo
- ▶ Aplicações de blindagem
- ▶ Núcleos de alta frequência
- ▶ Sensores magnetomecânicos

▶ *BENEFÍCIOS:*

- ▶ Indução de saturação médio
- ▶ Baixa magnetostricção
- ▶ Maior resistência à corrosão
- ▶ Pode ser recozido para obter alta permeabilidade.

Metglas® 2605SA1 & 2605HB1M

- *A base de ferro; perdas do núcleo muito baixas*

▶ **APLICAÇÕES**

- Transformadores de distribuição e de potência
- Motores
- Indutores de alta frequência
- Transformadores de corrente
- Dispositivos que requerem alta permeabilidade e baixa perda em baixas frequências

▶ **BENEFÍCIOS:**

- Extrema baixa perda de núcleo
- Alta permeabilidade

Metglas® 2605S3A

A base de ferro; alta permeabilidade

▶ APLICAÇÕES:

- ▶ Transformadores de corrente
- ▶ Dispositivos de proteção de falta
- ▶ Núcleos de alta frequência

▶ BENEFÍCIOS:

- ▶ Baixa perda de núcleo em altas frequências (> 1 kHz)
- ▶ Alta temperatura de operação com a redução de densidade de fluxo mínimo
- ▶ Pode ser recozido: alta permeabilidade em baixas ou altas frequências

Metglas® 2705M

A base de cobalto; magnetostricção ~ 0

▶ APLICAÇÕES:

- ▶ Blindagem eletromagnética flexível
- ▶ Sensores magnéticos
- ▶ Núcleos de alta frequência
- ▶ Chaves magnéticas

▶ BENEFÍCIOS:

- ▶ Magnetostricção quase-nula
- ▶ Alta permeabilidade e ciclo BH quadrado sem recozimento
- ▶ Indução de saturação mediana

Metglas® 2714A

A base de cobalto; magnetostricção ~ 0

▶ APLICAÇÕES

- ▶ Fonte de alimentação de modo de comutação
- ▶ Amplificadores magnéticos
- ▶ Núcleos semicondutores de supressão de ruído
- ▶ Transformadores de alta frequência
- ▶ Alta sensibilidade para transformadores
- ▶ Sensores de corrente ultrasensíveis
- ▶ Blindagem
- ▶ Aplicações em sensores magnéticos

▶ BENEFÍCIOS

- ▶ Extrema baixa perda de núcleo
- ▶ Altíssima permeabilidade
- ▶ Baixa força coerciva
- ▶ Excelente resistência à corrosão

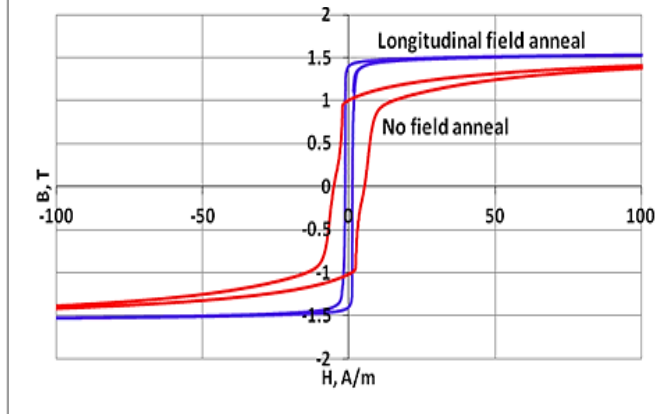
Propriedades Gerais e Características

	<i>2605SA1 & 2605HB1M</i>	<i>2826MB</i>	<i>2605S3A</i>	<i>2705M</i>	<i>2714A</i>
Indução de Saturação (T)					
Fundida	1.56	0.88	1.41	0.77	0.57
Permeabilidade DC Máxima (μ)					
Envelhecida	600.000	800.000	35.000	290.000	1.000.000
Fundida	45.000	> 50.000	> 20.000	---	> 80.000
Magnetostricção de saturação (ppm)	27	12	20	< 0.5	< 0.5
Resistividade Elétrica ($\mu\Omega$-cm)	130	138	138	136	142
Temperatura de Curie (°C)	395	353	358	365	225

Propriedades Físicas

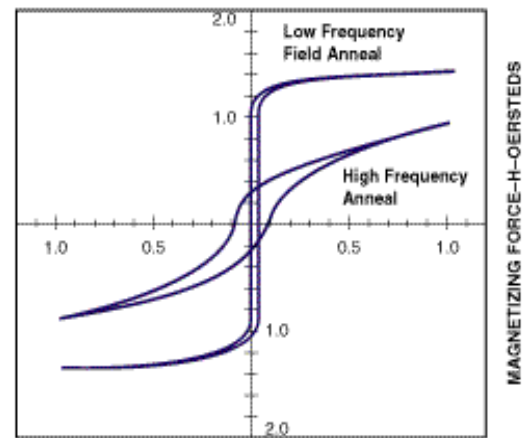
	<i>2605SA1 & 2605HB1M</i>	<i>2826MB</i>	<i>2605S3A</i>	<i>2705M</i>	<i>2714A</i>
Espessura (μm)	23	29	18	22	15
Larguras disponíveis					
Minima (mm)	5	2,5	2,5	2,5	2,5
Maxima (mm)	213	12,7	50	50	50
Densidade (g/cm^3)	7,18	7,90	7,29	7,80	7,59
Dureza Vicker's (carga de 50g)	900	740	860	880	960
Tensão de escoamento (GPa)	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Módulo Elástico (GPa)	100-110	100-110	100-110	100-110	100-110
Expansão térmica ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$)	7,6	11,7	6,7	12	12,7
Temperatura de cristalização ($^\circ\text{C}$)	510	410	535	520	550
Tempertura de serviço ($^\circ\text{C}$)	150	125	150	90	90

Metglas® Alloy 2605SA1

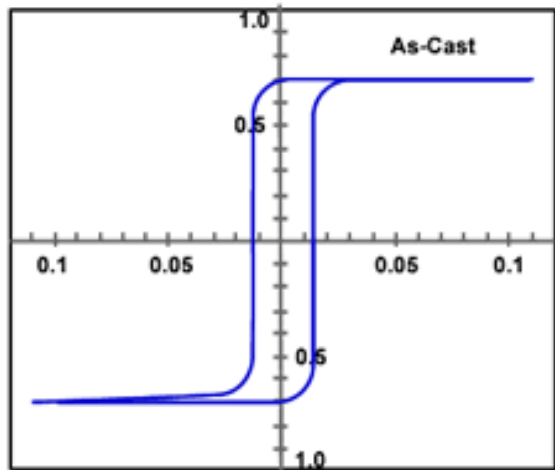


Base de Fe

Metglas® Alloy 2605S3A

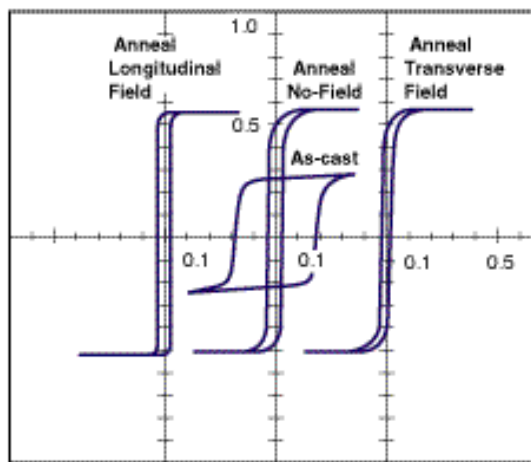


Metglas® Alloy 2705M



MAGNETIZING FORCE-H-OERSTEDS

Metglas® Alloy 2714A



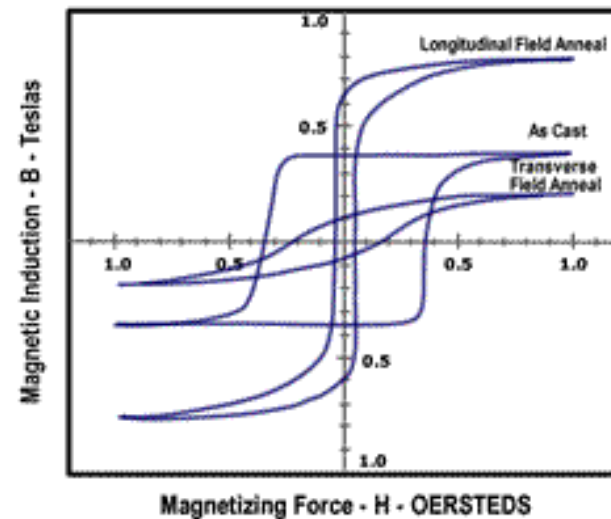
MAGNETIZING FORCE-H-OERSTEDS

Base de Co

0,05 Oe ~ 4 A/m

Base de Fe-Ni

Metglas® Alloy 2826MB



Magnetizing Force - H - OERSTEDS

Materials Nanocrystalinos

FINEMET

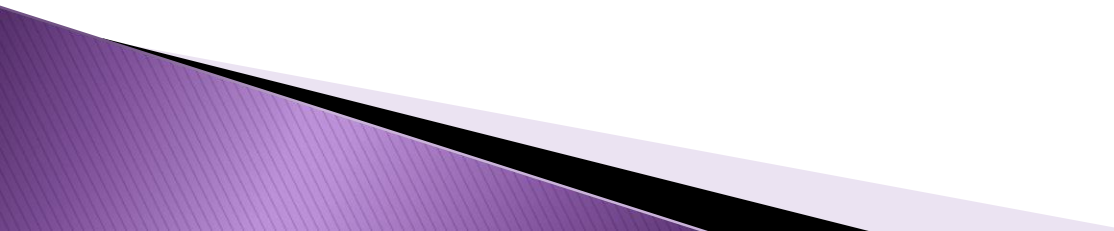
Yoshizawa et al. [1,2] (1988)

- ▶ São materiais com composição típica de $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$.
- ▶ Produzidos por *melting spinning* seguido de TT em temperaturas ~ 500 a 600 °C \gg nanogrãos 5 - 20 nm.
- ▶ Matriz amorfa com grãos nanocristalinos.
- ▶ Cu (insolúvel) favorece a germinação dos grãos; Nb (Cr, V, Mo, Ta) inibe o crescimento deles

[1] [Appl. Phys. Lett. 86, 152513 \(2005\)](#)

[2] [Appl. Phys. Lett. 83, 2859, \(2003\)](#)

Nanopartículas Magnéticas

- ▶ Biosensores e Diagnósticos
 - ▶ Diagnóstico e Terapia
 - ▶ Engenharia de Tecidos
 - ▶ Aplicações Ambientais
 - ▶ Biofuncionalidade e Caracterizações
- 

Biosensores e Diagnósticos

❖ Várias Técnicas de detecção

- Partículas supermagnéticas ou magnéticas;
- Detecção por aglomeração (Micro NMR)
- Detecção por magnetoforeses (Migração devido a uma força magnética)
- Multidetecção em pequenos volumes.
 - Detecta : Ácidos nucleicos, Proteínas, Enzimas, Vírus, Pequena moléculas, Íons, Células
- Nanopartículas usadas como contraste de IRM: detecção de tecidos moles *in vivo*; fluídos magnéticos a base de Fe ou superparamagnéticos.

Diagnósticos e Terapias

❖ Diagnóstico de Câncer (in vivo)

- **In vivo:** diagnósticos feitos através da injeção de contrastes nos pacientes (IRM)
 - GastroMark® (ferumoxsil): oral para detecção gastrointestinal.
 - Feridex® (ferumoxide): injetável para detectar lesões no fígado.
 - Atualmente Gd quelatos: multifuncional >> contraste e entregadores de drogas (quimioterapia)
 - Recobrimento das partículas >>> biocompatibilidade >>> também para evitar aglomeração.

IRM - Imagem por ressonância magnética

- ▶ Spins dos prótons do hidrogênio alinham-se devido à aplicação de um campo magnético
- ▶ Pulso RF aplicado perpendicular ao campo magnético
- ▶ O momento magnético é perturbado e medido qdo volta ao estado inicial - relaxação
- ▶ Relaxação medida por bobinas do scanner: longitudinal (T1) e transversal (T2) são captadas para formar a imagem.
- ▶ Variações locais de T1 e T2 devido à variações químicas e físicas
- ▶ Nanopartículas SPIO melhoram contraste, diminuindo T1 e T2 >> diminuição devido a alta diferença de susceptibilidade magnética entre o meio e as partículas >>> nanopartículas de MnFe_2O_4

Diagnóstico de Câncer (in vitro)

- ❖ In vitro: diagnósticos feitos pelo movimento de partículas em campo magnético.
 - Simplifica o isolamento, extração e purificação de macromoléculas em amostras biologicamente complexas.
 - Recobrimento de partículas de Fe_3O_4 com "quantum dots" gera partículas fluorescentes >> ensaios imunológicos.
 - Determinação de sequencia de DNA
 - Determinação de células de tumor circulantes - metástase (sangue)

❖ Engenharia de tecidos

- Crescimento de tecidos sob substratos biodegradáveis porosos, onde a célula do próprio paciente é usada para induzir o crescimento do tecido a medida que o substrato desaparece → rejeição eliminada.
- A propriedade usada é de transdução mecânica - o controle pode ser feito remotamente, para influenciar a estrutura 3D
- As partículas magnéticas se ligam de alguma forma às células.
- A aplicação de campo causa atuação → estimula processos celulares (canal de íons, etc)
 - Ossos e cartilagens
 - Paredes de vasos e estrutura cardíaca
 - Pele
 - Pulmão
 - Olhos
 - Fígado
 - Tecidos nervosas

▶ Aplicações Ambientais

- Basicamente para a detecção e remoção de metais pesados
 - Alta superfície específica
- Despoluição
 - água: coliformes e vírus
 - Derramamentos de óleo
- Muitas etapas para a produção: partícula superparamagnética; recobrimento;

Biofuncionalização e Caracterização

- ▶ Partículas paramagnéticas são preferidas >>> não ficam magnetizadas depois de tirar o campo
- ▶ Óxidos de Fe com recobrimento:
 - polímeros dextran - causam deformidades nas células
 - Amido - estáveis por um ano em temperatura ambiente
- ▶ Nanopartículas entregadoras de drogas: fecham e se abrem por aquecimento resfriamento.