

Materiais Magnéticos

Macios (soft)

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

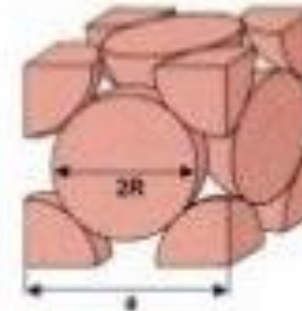
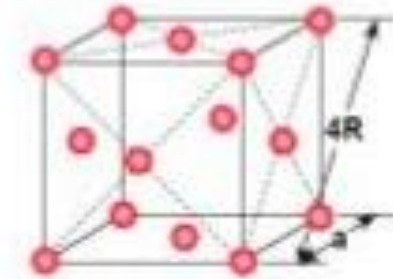
Materiais
Amorfos

Materiais
Nanocristalinos

Família do Fe-Ni

- ▶ Estrutura cfc.
- ▶ T_c próxima a T ambiente.
- ▶ Tem máxima M_s para $\sim 50\%$ de Ni
- ▶ Baixa resistividade >>> adição de Cr ou Mo.
- ▶ Fácil de conformar mecanicamente

Estrutura Cristalina Cúbica de Face Centrada (CFC)



$$a = \sqrt{2} \cdot 2R$$

a = parâmetro de rede
 R = raio atômico

- ▶ 4 átomos/c.u.
- ▶ N. C. = 12
- ▶ F.E. A. = 0.74
- ▶ Al, Cu, Au, Pb, Ni, Pt, Ag

Aplicações: Ligas com % Ni ~ 30 %

- ▶ M_s varia significativamente com a temperatura e é reversível.
- Medidores elétricos, medidores que têm bobina que se movem; tacógrafos; autôfalantes. → 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 °C → ligas de 38 – 40% Ni com 10% de Cr.

Aplicações: Ligas com % Ni ~ 50 %

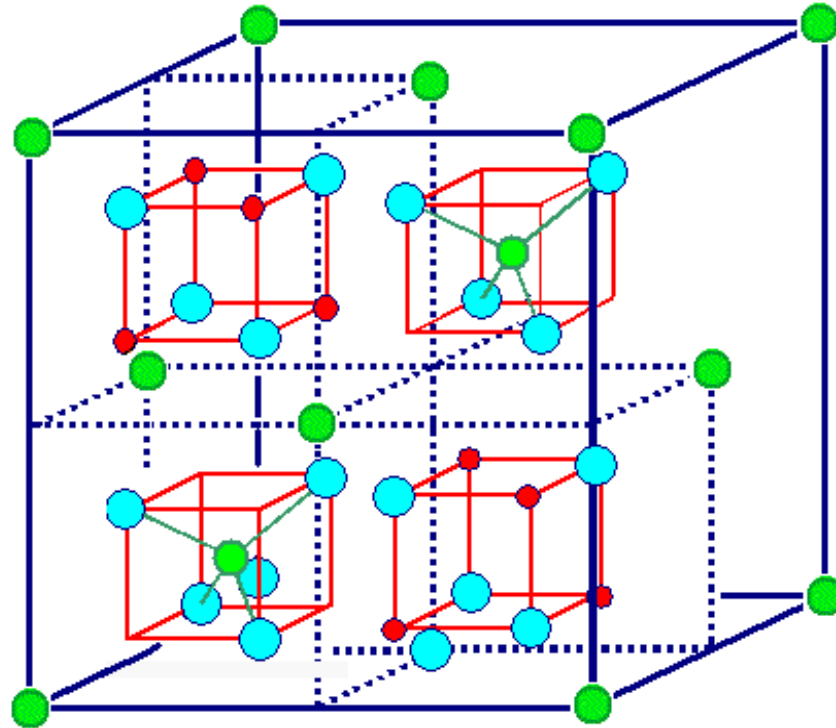
- ▶ Tem saturação de 1,6 T e alta permeabilidade, além de melhor resistência à corrosão que o Fe-Si.
- ▶ **48% Ni:** Tipo Anhyster; usados na forma maciça em relês e dispositivos de segurança.
 - As vezes em folhas finas em circuitos bobinados e motores de tamanho pequeno.
 - A linearidade da magnetização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

Família do Fe-Co

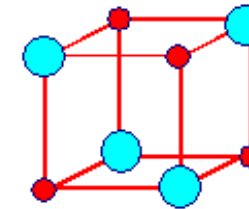
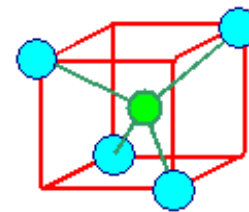
- ▶ **Grandes virtudes** → alto valor de M_s e T_c
- ▶ Transformação $\alpha \rightarrow \gamma$ em altas temperaturas $\sim 1100^\circ\text{C}$
- ▶ **Fe-35%Co** → maior valor de $\mu_0 M_s \rightarrow 2,45\text{T}$
- ▶ **Mas, cobalto é raro e caro.**
- ▶ **Permeabilidade menor que ligas Fe-Ni.**
- ▶ **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 – Estrutura Espinel Inversa

32 Sítios octaédricos – 16 ocupados



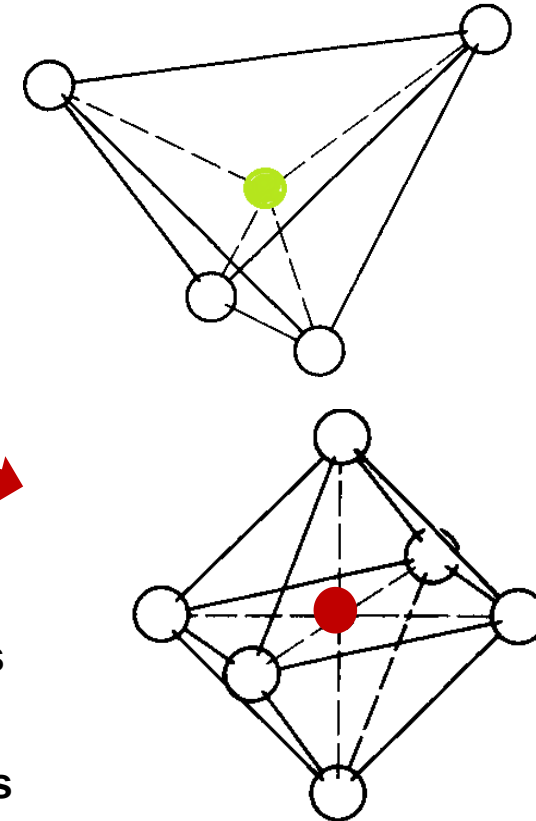
64 Sítios tetraédricos – 8 ocupados



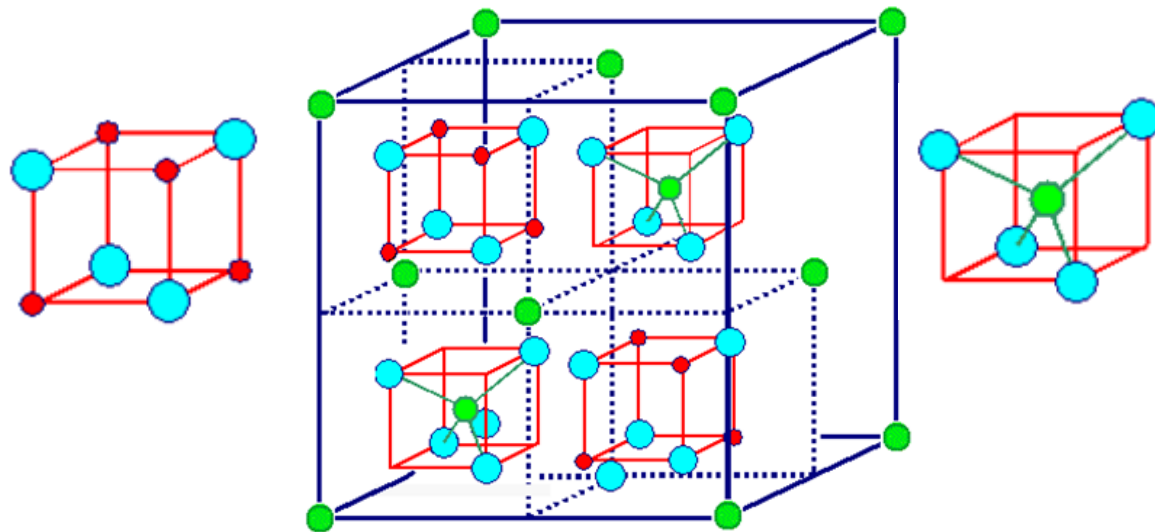
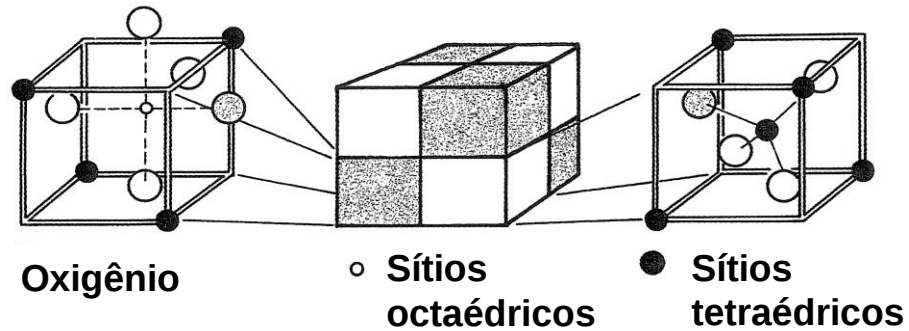
● Oxigênio

● A – Sítios Octaédricos
octahedral sites

● B – Sítios Tetrahédricos



Ferritas – Estrutura Espinel



32 Sítios octaédricos – 16 ocupados – 8 Fe^{+3} e 8 Fe^{+2}

64 Sítios tetraédricos – 8 ocupados – 8 Fe^{+3}

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

Íons dos sítios tetraédricos e octaédricos têm spin contrários

- MFe_2O_4 , onde M são íons que substituem os íons divalentes de Fe^{+2}

Ferrite	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Calculated μ_H	5	4	3	2	1	0
Measured μ_H	4.6	4.1	3.7	2.3	1.3	0

Ion	Electron Config- uration
Cr^{2+}	$3d^4$
Mn^{2+}	$3d^5$
Fe^{3+}	$3d^5$
Fe^{2+}	$3d^6$
Co^{2+}	$3d^7$
Ni^{2+}	$3d^8$
Cu^{2+}	$3d^9$
Zn^{2+}	$3d^{10}$

► **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 T 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.
- ▶ **Magnetostricção:** a base de Zn → 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 $f \sim 20$ kHz
- Indutores de média f (100 a 2 MHz): barras de antenas para transmissão de faixas de λ médios e longos.

λ = comprimentos de ondas
 f = frequência

► Transformadores

- Banda larga $\rightarrow$ 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





Ligas Amorphas

- ▶ Materiais metálicos solidificados rapidamente – *“melting spinning”*
- ▶ 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 $\rightarrow 30 - 100 \mu\text{m}$

Video sobre Melting Spinning



Cast the material in

As fitas sendo “espirradas” da roda de cobre





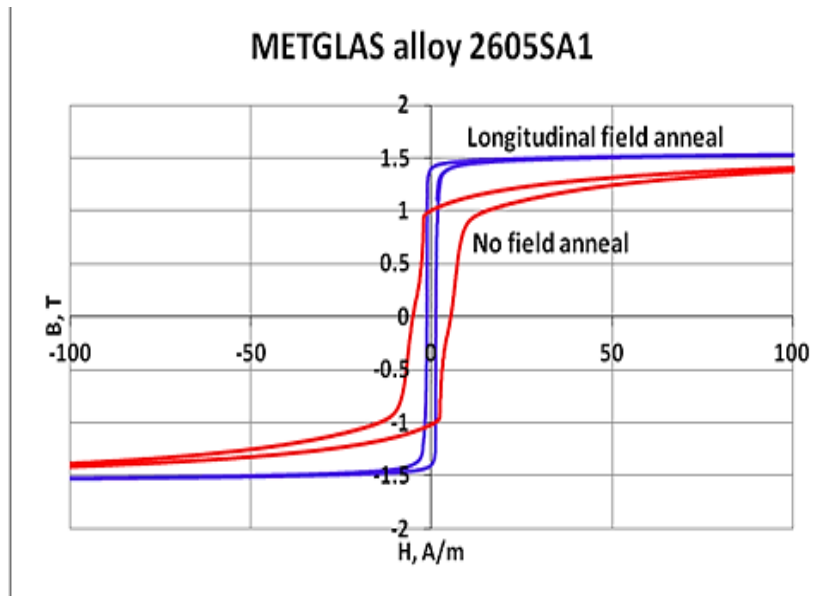
Propriedades Gerais e Características

	2605SA1 & 2605HB1M	2826MB	2605S3A	2705M	2714A
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

Base de Fe-Ni

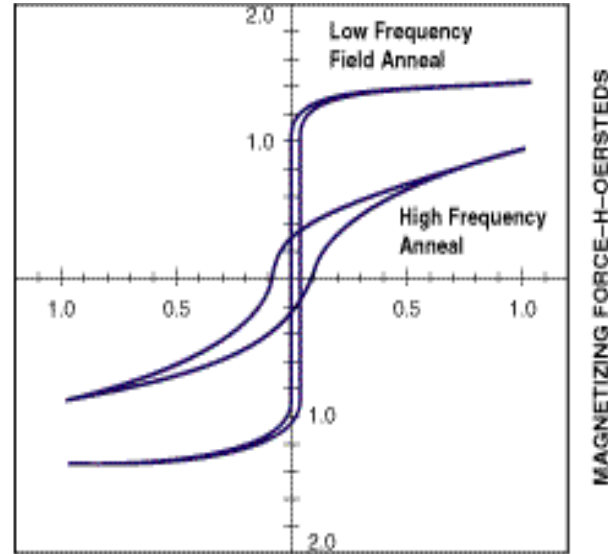
Metglas® Alloy 2605S3A

Metglas® Alloy 2605SA1



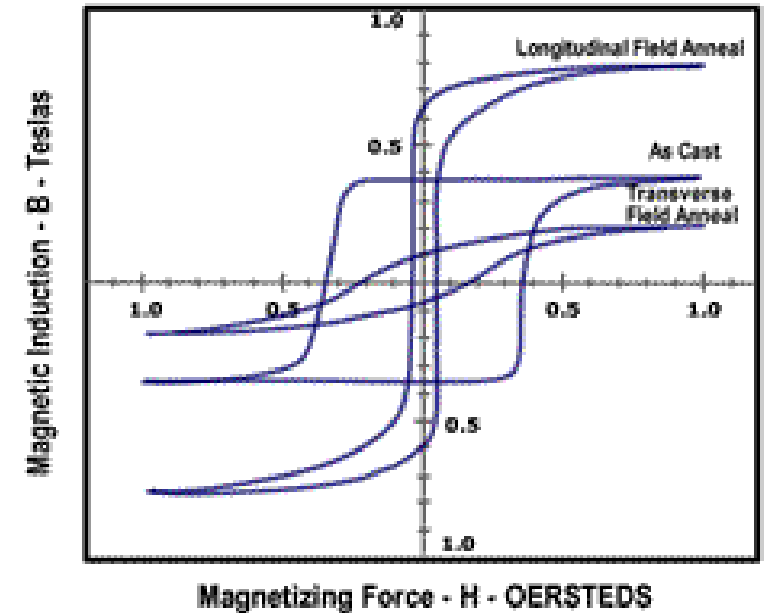
Tratamento térmico sob campo magnético

0,05 Oe ~ 4 A/m



Tratamento térmico sob campo magnético em alta frequência e baixa frequência

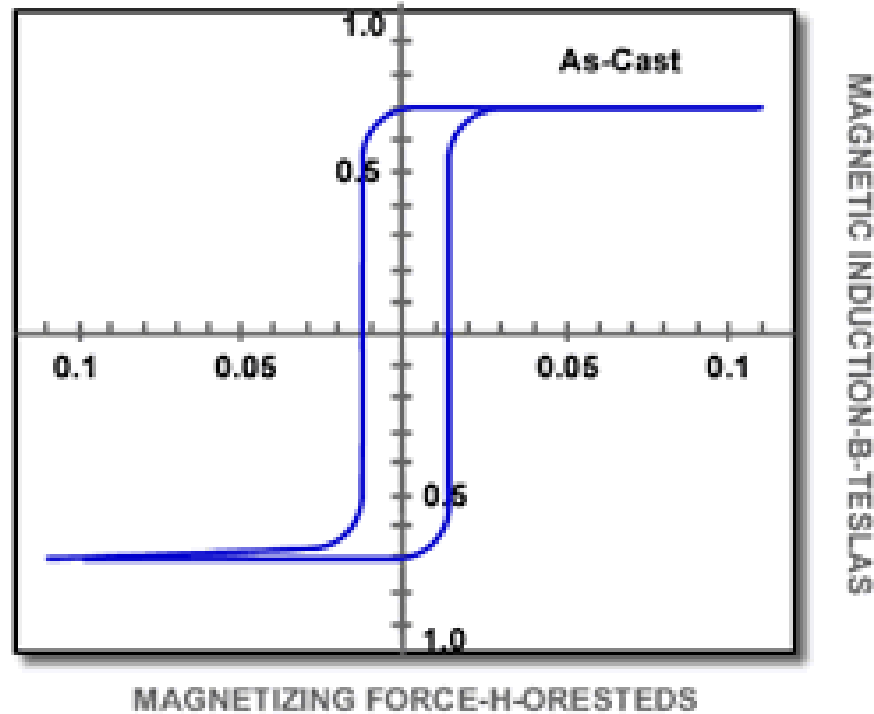
Metglas® Alloy 2826MB



Tratamento térmico sob campo magnético Transversal e longitudinal

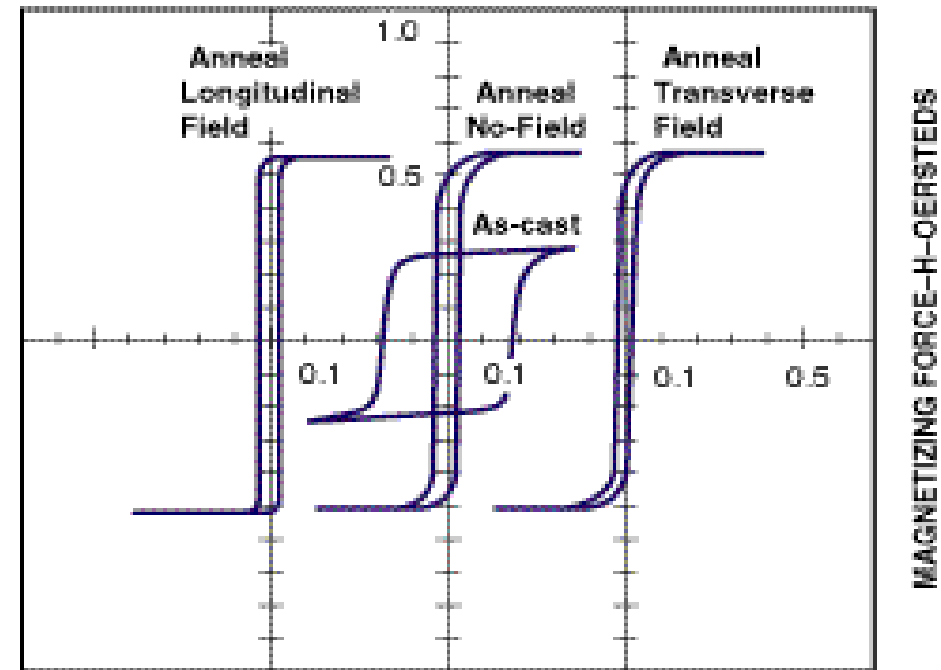
Base de Co

Metglas® Alloy 2705M



0,05 Oe ~ 4 A/m

Metglas® Alloy 2714A



Materiais Nanocristalinos

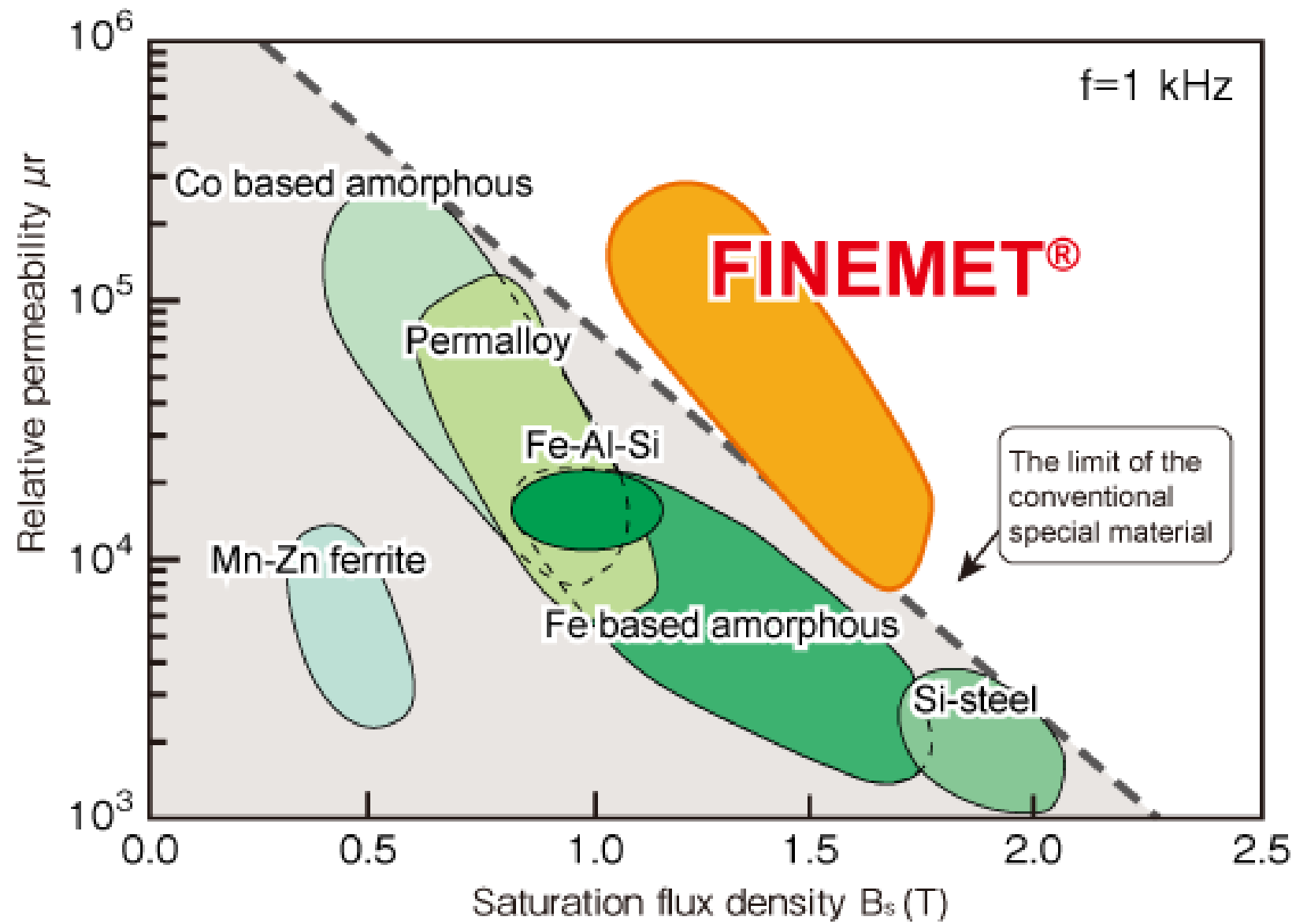
FINEMET

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 >>> 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 superparamagnéticas ou magnéticas;
- Detecção por aglomeração (Micro NMR)
- Detecção por magneto-forese (Migração devido a uma força magnética)
- Multi-detecção 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 gastro-intestinal.**
 - **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 nuclear

- ✓ 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 quando volta ao estado inicial – relaxação
 - Relaxação medida por bobinas do scanner: longitudinal (T1) e transversal (T2) são captadas para formar as imagens.
 - Variações locais de T1 e T2 devido à variações químicas e físicas
 - Nanopartículas SPIO melhoram contraste, diminuindo T1 e T2 → diminuição devido à 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

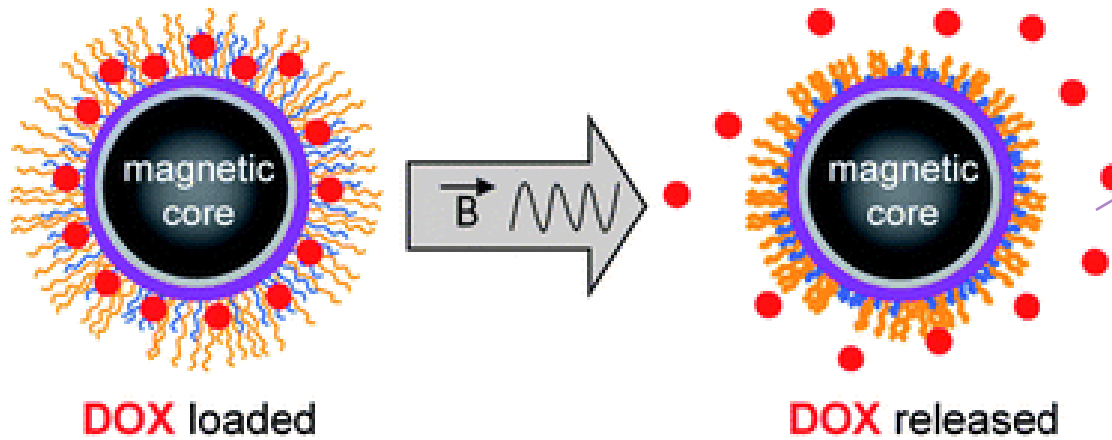
- **As partículas magnéticas se ligam de alguma forma às células.**
- **A aplicação de campo causa atuação → estimula processos celulares (canal de íons, etc)**
 - **Ossos e cartilagens; Paredes de vasos e estrutura cardíaca; Pele; Pulmão; Olhos; Fígado; Tecidos nervosas**

► 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.**



Sinha R, Kim GJ, Nie S, Shin DM: [Nanotechnology in cancer therapeutics: Bioconjugated nanoparticles for drug delivery](#). Mol Cancer Ther. 2006, 5:1909-17.

