

Materiais Magnéticos Doces e Materiais Ferromagnéticos Amorfos

João Paulo Sinnecker

Instituto de Física - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Caixa Postal 68528 - 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ

jps@if.ufrj.br

Recebido em 15 de Janeiro, 2000. Aceito em 25 de Agosto, 2000

Será apresentada de forma geral, o que são os materiais magnéticos doces e suas principais aplicações. Será feita uma pequena revisão a respeito de materiais magnéticos em geral, e dos processos de magnetização básicos em materiais ferromagnéticos. Em seguida serão apontadas quais as características desejadas para um material magnético doce e algumas aplicações práticas para estes materiais. Por fim, será apresentado o tópico de materiais ferromagnéticos amorfos de uma forma geral incluindo os métodos de produção e suas principais características magnéticas.

I Introdução: Materiais magnéticos

O estudo e o desenvolvimento do magnetismo e dos materiais magnéticos são sem dúvida capítulos muito interessantes da Física. Existem relatos de utilização de materiais magnéticos naturais na região da Magnésia, Ásia Menor, há mais de 3500 anos. As pedras eram chamadas de *magnes lapis*, que significaria Pedra da Magnésia, hoje conhecida como magnetita, ou ainda Fe_3O_4 . Na Grécia antiga, Thales de Mileto afirmava que a interação entre a magnetita e o ferro, era conhecida desde antes de 600 anos antes de Cristo. Há evidências históricas do uso, por antigos chineses, de pedras de magnetita moldadas em uma forma ornamental de colher. Quando colocadas sobre superfícies planas, podiam ser usadas para indicar uma direção, ou seja, as primeiras bússolas (Fig. 1) [1].

Desde então, os materiais magnéticos vêm desempenhando um papel importante e contribuindo de forma vital na história das civilizações e no seu desenvolvimento tecnológico. Todas as substâncias, sejam elas sólidas, líquidas ou gasosas, mostram alguma característica magnética, em todas as temperaturas. Dessa forma, o magnetismo, é uma propriedade básica de qualquer material.

O magnetismo pode aparecer de diversas formas, e podemos classificar os materiais pela forma como estes respondem a um campo magnético aplicado, de

acordo sua susceptibilidade relativa¹, que pode variar entre 10^{-5} até 10^6 . Deste ponto de vista teremos a seguinte classificação básica: diamagnetismo ($\chi < 1$), paramagnetismo ($\chi \geq 1$), antiferromagnetismo, ferrimagnetismo e ferromagnetismo ($\chi \gg 1$). Neste texto vamos nos restringir aos materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos. Além do Fe, Co e Ni, os tradicionais ferromagnéticos, alguns elementos da série dos lantanídeos (Gd, Tb, Dy, Ho, Er e Tm) exibem comportamento ferromagnético em temperaturas da ordem de 20°C . Entretanto, a lista de materiais ferromagnéticos é muito grande uma vez que podemos formar um número ilimitado de soluções sólidas e compostos, contendo materiais ferromagnéticos e não magnéticos.

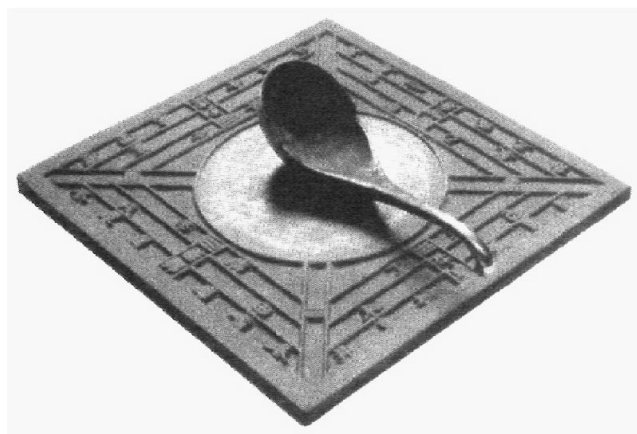


Figura 1. Bússola Chinesa Antiga (retirada da ref. 1).

¹A susceptibilidade é definida pela razão entre magnetização e campo aplicado: $\chi = M/H$. A susceptibilidade relativa é calculada em relação ao vácuo, e é adimensional.

II Materiais ferromagnéticos duros e moles

Os materiais ferromagnéticos possuem uma característica marcante que é conhecida como magnetização espontânea, ou seja, eles apresentam uma magnetização não nula, mesmo na ausência de campo externo aplicado. Em geral podemos classifica-los em dois grupos: materiais ferromagnéticos duros (ímãs) e materiais ferromagnéticos moles ou doces. Geralmente esta classificação está associada à resposta magnética do material a um campo aplicado. Uma das propriedades que é utilizada para separar dois tipos de ferromagnetismo é a coercividade, ou seja, o campo necessário para levar a magnetização do material a zero. Embora não exista uma linha divisória definida de maneira clara, assume-se que materiais ferromagnéticos que possuem uma coercividade alta sejam duros, e aqueles que possuem coercividade baixa sejam classificados de moles ou doces. Em geral, um material com uma coercividade maior que 10^4 A/m é duro, e um outro que tenha coercividade menor que 500 A/m é doce. Coercividades desde $\sim 10^{-1}$ A/m até $\sim 10^6$ A/m podem ser encontradas e algumas teorias foram desenvolvidas para explicar estas diferenças e o comportamento magnético nos materiais que as exibem. De uma forma grosseira, podemos dividir estas teorias em dois grupos. Um primeiro grupo trata do estudo em materiais compostos por pequenas partículas, ou materiais granulares, e não é o tema de interesse aqui. O segundo grupo engloba os materiais conhecidos como “massivos” (em inglês, *bulk materials*). As teorias para este grupo de materiais dependem muito de como as propriedades intrínsecas do material variam com a estrutura, por exemplo, com tensões internas, defeitos e inclusões não magnéticas, etc. Como resultado é difícil encontrar teorias que descrevam de forma quantitativa as propriedades magnéticas de um material, dando uma descrição qualitativa razoável. Estas teorias são relativamente adequadas para descrição dos materiais ferromagnéticos doces.

Para podermos fazer uma análise de quais tipos de materiais podem ser classificados como doces, e para entendermos suas principais características no que se refere às propriedades magnéticas, devemos ter em mente como ocorrem os processos de magnetização. A Física dos processos de magnetização e das propriedades magnéticas intrínsecas é basicamente a mesma para todos os materiais, duros ou doces, mas a classificação se dará de acordo com a intensidade dos fenômenos e propriedades observados.

III Processos de magnetização em materiais ferromagnéticos massivos

A grande maioria dos materiais ferromagnéticos massivos é doce, embora alguns deles tenham coercividades da ordem de até 8000 A/m. As características magnéticas do material estão intimamente ligadas à maneira como ele responde a um campo magnético aplicado, ou seja, aos processos de magnetização.

Os processos de magnetização em materiais ferromagnéticos estão intimamente ligados à estrutura magnética que existe dentro do material. Entendemos por estrutura magnética a descrição da forma como a magnetização está distribuída pelo volume do material. Embora se saiba que materiais ferromagnéticos exibem magnetização espontânea, se encontram na natureza materiais ferromagnéticos que se apresentam em um estado completamente desmagnetizado. A explicação para este fato foi dada por Weiss em 1929 [2], com a introdução do conceito de domínios magnéticos. Segundo Weiss, o interior de uma material ferromagnético pode estar dividido em várias regiões magnetizadas. Em cada região destas, a intensidade da magnetização é a mesma, mas as direções podem ser diferentes. Cada região destas é chamada de domínio magnético. A Fig. 2a ilustra a idéia de domínios magnéticos. Como podemos perceber, existe uma fronteira entre dois domínios adjacentes. Nesta fronteira, a magnetização não muda de forma brusca², mas de forma suave, envolvendo vários momentos magnéticos. Esta fronteira é chamada de parede de domínio, e suas representação é mostrada na Fig. 2b. Quando dois domínios adjacentes têm direções opostas de magnetização, a parede que os divide é chamada de parede de 180° conforme ilustra a Fig. 2c.

Os processos de magnetização em materiais ferromagnéticos podem ocorrer basicamente de duas formas. Por deslocamento das paredes de domínios magnéticos e/ou por rotação da magnetização local dentro dos domínios. As mudanças na magnetização em ambos os casos dependem fortemente de imperfeições no material. Diversos modelos têm sido propostos e aplicados para calcular quantidades tais como a coercividade, a permeabilidade inicial, a remanência, etc.

²É possível mostrar que a energia necessária para que ocorra uma mudança brusca de direção de magnetização envolvendo apenas dois momentos magnéticos é muito grande comparada à energia necessária para que ocorra uma mudança suave, envolvendo mais de um momento magnético.

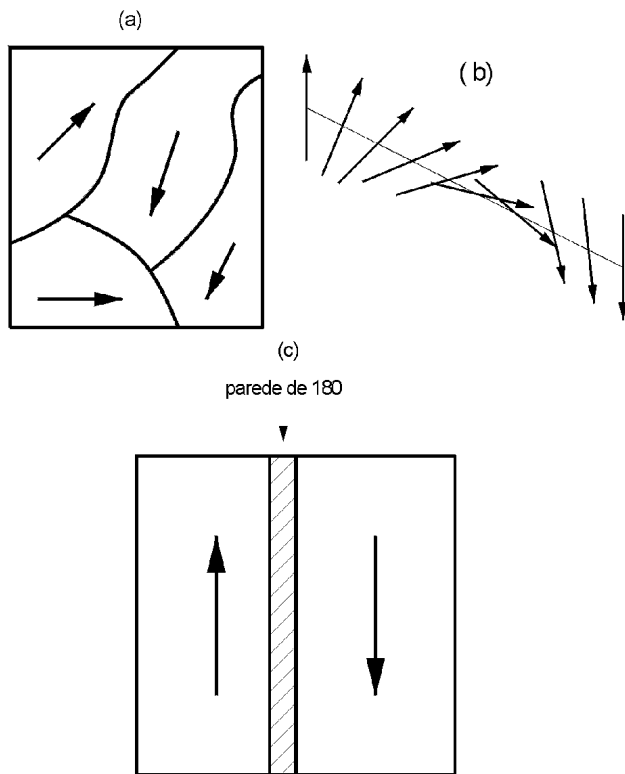


Figura 2. (a) Esquema de um material ferromagnético exibindo uma estrutura de domínios magnéticos. (b) Esquema de uma parede de domínio. (c) Esquema ilustrando uma parede de 180° .

A magnetização do material será sempre determinada pelo balanço dos diversos tipos de energia, tais como a energia magnetostática, associada à criação de pólos magnéticos na superfície e que se reduz à medida que aparecem domínios magnéticos, a energia das paredes de domínio que está associada às diferentes configurações dos momentos magnéticos ao longo do volume da parede, a energia de anisotropia, que está associada às direções preferenciais das magnetizações locais, etc. Estes termos de energia afetam o número e a posição dos domínios e as direções das magnetizações locais, e, portanto a magnetização total do material.

Em um monocristal ferromagnético sem nenhuma imperfeição, um campo magnético aplicado ao material pode levar as paredes de domínio existentes a se deslocar através do material sem encontrar nenhuma resistência. Portanto a intensidade do campo necessária para causar o movimento pode ser muito pequena, e no caso de uma parede de 180° a alteração da magnetização muito grande. Assim, esperam-se coercividades muito pequenas, e permeabilidades e susceptibilidades muito grandes.

Entretanto até os monocristais podem possuir imperfeições de algum tipo, e isso leva a um bloqueio parcial das paredes de domínio e conseqüentemente a uma diminuição da permeabilidade e a um aumento da co-

ercividade. Este efeito é ainda maior em se tratando de materiais policristalinos, onde as fronteiras de grão são um obstáculo a mais para o movimento das paredes. Dependendo das imperfeições, a energia total dependerá da localização das paredes.

Vamos supor que a energia total F_{wt} varie com a posição, conforme mostra a Fig. 2. Quando o campo aplicado é nulo, a parede estará localizada onde a energia possui algum mínimo, por exemplo o ponto O. Quando um campo é aplicado, a energia total por unidade de volume se altera e a parede se desloca de forma que a energia seja balanceada. No caso mostrado na Fig. 2, o movimento entre os pontos O e A é reversível, uma vez que ao diminuir o campo aplicado, a parede tende a retornar a seu ponto inicial. Uma vez que a parede atinge o ponto A, a parede se moverá espontaneamente até a posição E, e o movimento passa a ser irreversível uma vez que um decréscimo em campo fará com que a parede se desloque para o ponto D. No trecho EF o movimento é novamente reversível, e assim por diante.

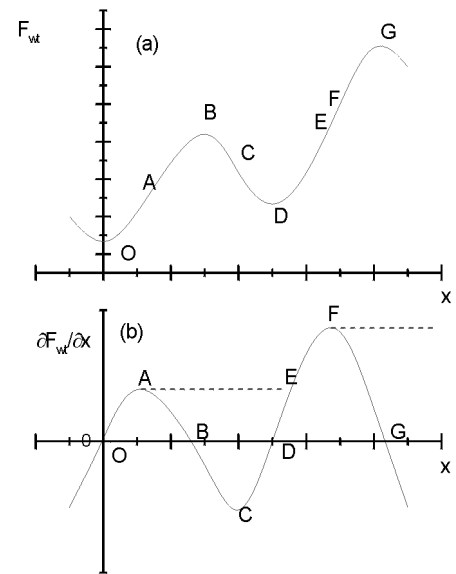


Figura 3. Energia total em função da posição (a). Primeira derivada da Energia total em função da posição (b).

Este modelo simples mostra como as diversas partes de uma curva de magnetização podem estar relacionadas com o movimento de paredes de domínio. A permeabilidade inicial é determinada pela intensidade da variação da energia total, dF_{wt}/dx , perto da origem. A coercividade é uma grandeza relacionada com a possibilidade de se ultrapassar as barreiras de energia e portanto depende dos valores máximos de dF_{wt}/dx . Qualquer irreversibilidade no processo de deslocamento leva a uma curva histerética. A remanência é conseqüência do movimento entre os mínimos de energia

com a aplicação e remoção dos campos magnéticos. O comportamento de um material, que possui muitas paredes de domínio, é uma média do comportamento de cada uma delas com o campo aplicado.

A coercividade é determinada conhecendo-se a energia F_{wt} . Isso não é uma tarefa trivial uma vez que para conhecer uma expressão para esta energia, é necessário conhecer a natureza das imperfeições no material e sua distribuição pelo mesmo. Estas imperfeições podem ter várias origens. Por exemplo, as tensões dentro do material podem variar em função da posição devido aos métodos de produção (isso ocorre com os materiais amorfos, como veremos mais adiante), e localmente podem ter valores muito diferentes da média geral.

A presença de inclusões ou impurezas não magnéticas também é um tipo de imperfeição. A anisotropia do material também é um ponto importante nos processos de magnetização uma vez que ela determina as direções de fácil magnetização local. Anisotropias podem ter várias origens, tais como tensões mecânicas (anisotropia magnetoelástica, relacionadas à constante de magnetostricção λ^3), arranjo cristalino (anisotropia magnetocristalina). A geometria do material também pode influir no processo de magnetização. Certas geometrias favorecem o aparecimento de cargas na superfície. Isso acarreta em um aumento da energia total no material. Este excesso de energia pode ser compensado com o aparecimento de domínios perto da superfície, conhecidos como domínios de fechamento. Os domínios de fechamento que podem ter um comportamento, com campo aplicado, diferente dos outros domínios no material, o que causa uma anisotropia devido à forma (anisotropia de forma).

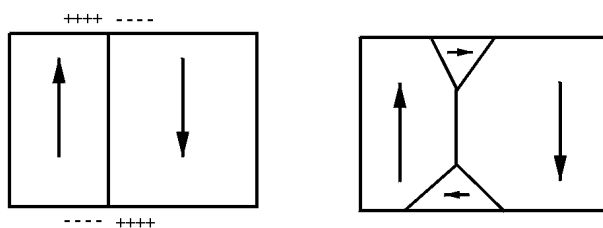


Figura 4. Aparecimento de cargas superficiais e os domínios de fechamento para minimizar a energia total.

Em certas condições, e devido a imperfeições, um campo aplicado pode gerar o aparecimento de novos domínios por nucleação. Para a maioria dos materiais, o campo necessário para nuclear um domínio é menor que o campo necessário para mover uma parede. Em materiais em cujo campo de nucleação é maior que o para provocar movimentos de paredes, a curva de histerese é retangular, como ocorre em fios magnéticos amorfos, que veremos adiante.

Uma maneira de estudar os processos de magnetização em um material ferromagnético é submeter-lo a um campo externo variável, e acompanhar o comportamento da magnetização total do material à medida que o campo aplicado se altera. Podemos então traçar uma curva de magnetização em função do campo. Esta curva será uma somatória de todos os processos reversíveis e irreversíveis de magnetização que vão ocorrendo à medida que o campo varia. Na Fig. 5a temos um exemplo de como seria uma curva onde dominam processos reversíveis. Na Fig. 5b temos um exemplo do que ocorre quando há processos irreversíveis. A curva mostrada em 5b é uma curva de histerese e decorre de perdas energéticas durante o processo de magnetização. A área da histerese está relacionada a estas perdas. Materiais com “pouca histerese” (com pouca área de histerese) exibem poucas perdas durante o processo de magnetização.

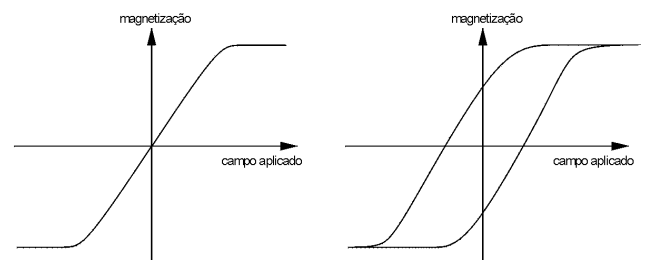


Figura 5. (a) curva de magnetização predominantemente reversível. (b) curva de magnetização onde há processos irreversíveis caracterizando a formação de uma histerese.

IV Materiais magnéticos doces

A grande maioria dos materiais magnéticos é utilizada em aplicações tais como núcleos de transformadores, motores, geradores, etc. Para tais aplicações é desejável que um material tenha:

- alta magnetização de saturação
- baixa coercividade
- alta permeabilidade inicial
- baixas perdas energéticas por histerese

Estas em geral são as características típicas desejadas de um material ferromagnético doce. As propriedades intrínsecas de um material ferromagnético doce podem ser descritas utilizando os modelos descritos até aqui, pelo menos de forma qualitativa. O conhecimento destes princípios também podem ajudar no projeto de novos materiais que terão um comportamento magnético tipicamente doce. De acordo com o que foi discutido até agora, podemos ter uma idéia geral de que tipo de material teria estas propriedades.

³A magnetostricção é uma propriedade que será explicada mais adiante. Para maiores detalhes consulte a referência.

Altas magnetizações de saturação podem ser obtidas se utilizarmos metais com alto momento magnético, tais como ferro ou ligas de ferro-cobalto. As outras propriedades podem ser obtidas se de alguma maneira pudermos impor uma alta mobilidade de paredes de domínio. Isso pode ser obtido reduzindo os defeitos tais como inclusões, cavidades, fronteiras de grão, tensões internas, etc. Inclusões podem ser reduzidas removendo-se impurezas. Tensões internas de origem mecânica podem ser reduzidas por tratamentos térmicos adequados. A escolha de materiais de baixa anisotropia cristalina (K_1), baixa magnetostricção (λ). Valores baixos de K_1 ajudam a reduzir o efeito de inclusões no movimento de paredes, e baixas magnetostricções reduzem o efeito das tensões internas.

As características de um material magnético doce podem ser melhoradas através de tratamentos metalúrgicos. Duas das mais importantes técnicas metalúrgicas neste sentido são a de orientação de grão e a de tratamentos termo-magnéticos (em inglês, *magnetic annealings*). Na orientação de grão, o material é submetido a um processo de laminação a frio. Este procedimento faz com que os grão do material se alinhem e se tornem orientados ao longo de uma direção preferencial. Se um campo é aplicado nesta direção, as curvas de histerese são praticamente retangulares, com uma permeabilidade bastante alta, coercividade baixa e baixas perdas por histerese. No tratamento termo-magnético, o material é submetido a altas temperaturas na presença de campos magnéticos. Isso também leva a indução de uma anisotropia uniaxial que resulta numa curva de histerese retangular, com altas permeabilidades e baixas perdas.

V Tipos de materiais doces

Ferro:

O ferro possui uma magnetização de saturação relativamente alta e por ser abundante (aproximadamente 3.3% da crosta terrestre é composta de Fe) é muito barato sendo altamente utilizado em materiais ferromagnéticos doces.

O Fe comercialmente disponível alcança permeabilidades relativas máximas da ordem de 5×10^3 e coercividades da ordem de 70 A/m. Após tratamentos adequados estas propriedades podem ser melhoradas. As grandes desvantagens do uso do Fe são sua baixa resistividade elétrica e alta maleabilidade. A baixa resistividade é ruim para aplicações em altas frequências por causa de correntes induzidas ou *eddy currents* decor-

rentes da lei de Faraday. Embora o Co e o Ni também sejam ferromagnéticos como o Fe, seu uso em larga escala comercial é inibido pelos altos custos.

Ligas de Fe-Si:

Os grandes substitutos do Fe puro são as ligas de Fe-Si, que vêm sendo utilizadas desde o início do século 20 em núcleos de transformadores de potência. Este tipo de transformadores opera entre frequências baixas e moderadas e ligam os consumidores (casas, indústrias) às fontes geradores (usinas). A utilização de materiais com histerese implica em perdas de energia no transformador.

A adição de Si ao Fe diminui a magnetização de saturação um pouco mas por outro lado reduz a anisotropia magnetocristalina e a magnetostricção, e aumenta a resistividade consideravelmente. A presença do Si também torna mais fácil a tarefa de redução de inclusões e o aumento dos grãos por tratamentos metalúrgicos. Uma das ligas mais utilizadas comercialmente é a com 3% de Si, conhecida pelo nome de Hypersil. A Fig. 3⁴ mostra as curvas de histerese obtidas para Fe puro e para um Fe₉₇Si₃ de grão orientado [3]:

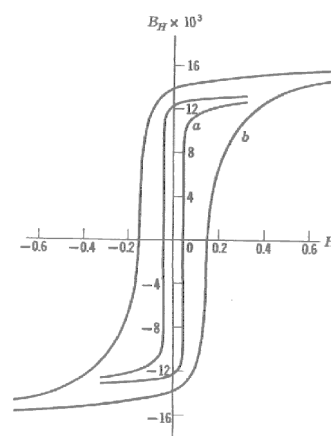


Figura 6. Curvas de histerese para Fe puro (a) e Fe₉₇Si₃ - Hypersil (b). (retirada da ref. 3).

Ligas de Fe-Ni

Um dos materiais doces mais conhecidos é o chamado Permalloy, que são ligas de Níquel-Ferro (Ni-Fe). Estas ligas têm uma estrutura fcc para conteúdos de Ni entre 35 e 100%. A liga com 50%Ni-50%Fe é a de maior magnetização de saturação, é bastante dúctil e têm uma resistividade elétrica bastante elevada. A liga de maior interesse entretanto é a de 78% Ni. Nesta composição, a liga apresenta uma baixa magnetostricção e uma baixa anisotropia magnetocristalina. Com tratamentos térmicos adequados, a liga pode chegar a ter uma permeabilidade relativa da ordem de 10^5 e coercividades pequenas da ordem de 4 A/m.

⁴A Fig. 3 está em unidades cgs, pois retirada da ref. 3, que não adota o SI. O campo portanto é mostrado em Oe. Cada Oe vale $10^3/4\pi$ A/m.

A adição de outros elementos às ligas de FeNi pode trazer algumas vantagens adicionais como aumento da resistividade e ductilidade. Um exemplo bastante conhecido é a liga $Ni_{76}Fe_5Cu_5Cr_2$, conhecida como MU-

METAL. Outros tipos de combinações podem levar a outros materiais magnéticos doces. Ligas de FeCo, FeAl, NiCo, etc. A tabela 1 mostra alguns materiais doces e suas propriedades magnéticas típicas.

Tabela 1: Dados para Materiais Ferromagnéticos Doces Típicos (ref. 3)

Material	Observações	Composição* μ_I^5	μ_{max}^6	H_c [A/m]	M_S [T]	
Ferro	Comercial	Fe ₉₉	200	6000	72	2.16
Ferro	Puro	Fe _{99.9}	25000	350000	0.8	2.16
FeSi		Fe ₉₆ Si ₄	1200	6500	40	1.95
FeSi	Hypersil	Fe ₉₇ Si ₃	9000	40000	12	2.01
50 Permalloy	Hypernik	Ni ₅₀ Fe ₅₀		100 000	4	1.60
78 Permalloy		Ni ₇₈ Fe ₂₂	4000	100000	4	1.05
Mumetal		Ni ₇₅ Fe ₁₈ Cu ₅ Cr ₂	20000	100000	4	0.75
Supermalloy		Ni ₇₉ Fe ₁₅ Mo ₅ Mn ₂	90000	10 ⁶		0.32
Permendur		Fe ₅₀ Co ₅₀	500	6000	16	2.4
FeCoV		Fe ₄₉ Co ₄₉ V ₂		100000	16	2.3
Perminvar	Tratamento Termomagnético	Fe ₃₄ Ni ₄₃ Co ₂₃		400000	2.4	1.5
Fe-Si-Al	Pó	Fe ₈₅ Si _{9.5} Al _{5.5}	35000	120000	2.4	1.2

Ferritas

A grande dificuldade do uso de materiais em altas frequências é a indução de correntes parasitas ou *eddy currents*. Uma solução natural para este problema é a redução do volume por onde tais correntes possam circular. Neste sentido, justapor finas chapas de material magnético doce é uma solução. Entretanto o uso de materiais com alta resistividade é ainda melhor. As ferritas, compostos contendo FeO, são a opção ideal para uso em transformadores de alta frequência, transformadores de pulso, etc. Dependendo da aplicação, podem ser utilizadas ferritas de diferentes composições, tais como as de MnFeO e ZnFeO. Estes materiais, que são ferrimagnéticos, podem alcançar resistividades da ordem de $10^3 - 10^7 \Omega m$ e as correntes induzidas são muito diminuídas. A presença de Fe garante uma magnetização de saturação relativamente alta, o que é desejável em aplicações como transformadores.

VI Aplicações de materiais magnéticos doces

Materiais magnéticos doces podem ser utilizados, como já mencionamos antes, numa grande variedade de aplicações que em geral necessitam de altas permeabilidades, baixas perdas em altas frequências.

Indução eletromagnética:

Geradores, motores e transformadores se baseiam nos princípios físicos da lei de Faraday- Lenz. Segundo

esta lei, quando o fluxo magnético é alterado em um circuito, uma força eletromotriz é induzida nele de tal forma que:

$$\epsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -A \left(\frac{dB}{dt} \right) \tag{1}$$

onde A é a área do núcleo na qual a indução magnética B está confinada. As propriedades essenciais deste núcleo devem ser baixas perdas, altas permeabilidades e altas magnetizações de saturação.

Blindagem Magnética:

Quando um material magnético na forma de esfera ou cilindro oco é colocado em um campo magnético **H**, o campo induz pólos magnéticos na superfície do material e a magnetização superficial resultante produz um campo **H'** dentro que se opõe ao campo **H**. A intensidade do campo **H'** é reduzida por um fator μ que é justamente a permeabilidade relativa do material utilizado:

$$\mathbf{H}' \propto \frac{\mathbf{H}}{\mu} \tag{2}$$

Portanto materiais com alta permeabilidade relativa μ podem blindar o campo magnético. Chapas de MU-METAL são amplamente utilizadas nesse sentido, embora tenham um uso limitado a baixos campos em vista do seu campo coercitivo reduzido.

Materiais magnetostritivos

Em diversos materiais ferromagnéticos observa-se que a aplicação de um campo magnético induz uma deformação mecânica no material. De forma similar, a aplicação de deformações mecânicas a sistemas magnéticos, pode induzir a uma alteração de propriedades como a permeabilidade e a coercividade. Estes efeitos são denominados de magnetostritivos.

Embora os efeitos magnetostritivos sejam em geral pequenos, materiais com altas permeabilidades associados a altas constantes de magnetostricção podem ser utilizados para construção de transdutores que são usados para gerar ondas sonoras ou para sensores de tensão mecânica.

Aplicações não lineares

Várias aplicações de materiais magnéticos doces utilizam algumas propriedades não lineares. Uma destas propriedades é a curva de histerese retangular, já mencionada anteriormente. Estes materiais podem ser utilizados em memórias, conversores d.c., amplificadores magnéticos. Outra aplicação importante, que envolve o uso de ferritas, é o uso dos fenômenos de ressonância na faixa de frequência das microondas.

Materiais ferromagnéticos amorfos

Como vimos até aqui, materiais ferromagnéticos tem propriedades doces ótimas quando os processos de magnetização ocorrem de modo a gerar altas permeabilidades e baixas coercividades. Na grande maioria dos materiais cristalinos doces, os termos de anisotropia dominam os processos de magnetização, sendo que o termo magnetocristalino, associado à estrutura cristalina é um dos termos dominantes. Materiais que possuem um termo energia magnetocristalina baixo, com certeza são doces. Uma classe de materiais onde a anisotropia cristalina é praticamente inexistente é a dos vidros metálicos, ou materiais metálicos amorfos.

Já são quase trinta anos desde que a primeiro material metálico amorfo, um “vidro metálico”, foi produzido por um resfriamento rápido de uma fase líquida por Klement, Willens e Duwez [4]. Tal fato abriu uma série de novos campos de pesquisas, não só em ligas e fases amorfas, que em alguns casos possuem uma combinação única de propriedades, mas também em muitos outros materiais. Estes últimos incluem materiais como os que possuem micro estruturas e soluções sólidas com solubilidade estendida [5], e que exibem excelentes propriedades mecânicas e físicas. Outra classe de materiais são os de fases cristalinas metaestáveis e os materiais nanofásicos e nanocristalinos [6], nos quais se observa uma melhora em diversas propriedades, comparadas às

obtidas nas mesmas ligas em seu estado micro cristalino.

Os materiais metálicos amorfos não existem na natureza, já que para sua obtenção são necessárias taxas de resfriamento da ordem de 10^6 K/s. Tais taxas altíssimas de resfriamento podem ser obtidas por uma série de técnicas:

- A partir de fase líquida: por *Melt Spinner*
- A partir de vapor: por *Sputtering*

Há ainda um terceiro método conhecido como *Mechanical Alloying*, em que se parte de fases sólidas dos elementos e se produz uma moagem mecânica de alta energia, obtendo-se como produto final um pó amorfo. Sem dúvida, a técnica mais utilizada é a de resfriamento a partir de fase líquida. Normalmente, ejeta-se uma liga metálica fundida por indução a altas frequências sobre uma roda de cobre que gira em alta velocidade. Desta forma é possível obter um material metálico em forma de fita em estado amorfo, ou seja, uma ausência de ordem estrutural de longo alcance. A Fig. 4 mostra o esquema [7] de um *melt spinner*, o equipamento mais usado para a produção de fitas metálicas amorfas, e algumas fotos do processo de fabricação

Propriedades Magnéticas Básicas:

Embora se entenda por material amorfo algo que não possui uma estrutura ou ordenamento atômico, os metais amorfos apresentam uma desordem somente de longo alcance. A curto alcance a estrutura atômica de um vidro metálico é muito semelhante à de um material cristalino (o que explica o seu comportamento ferromagnético). Como resultado do desordenamento de longo alcance, não há uma anisotropia magnetocristalina que possa influenciar os processos de magnetização. Este fato isolado serviu de motivação para o desenvolvimento destes tipos de materiais como excelentes ferromagnetos doces. Fitas e fios amorfos baseados em ligas de metais de transição 3d com metalóides (por exemplo, $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$) exibem baixas coercitividades, chegando a valores da ordem de 0.1 A/m, e altas permeabilidades, da ordem de 10^6 . A Fig. 5 mostra curvas de histerese típica de materiais amorfos em diversas formas onde se pode observar uma coercividade muito baixa e uma permeabilidade muito alta. Nota-se que dependendo do processo de fabricação, a forma das curvas de histerese muda. Uma vez que o termo de anisotropia magnetocristalina não é importante, o que leva a estas diferenças é a anisotropia magnetoelástica. Diferentes métodos de produção geram diferentes volumes e distribuições de tensões internas, da ordem de centenas de MPa, que, através de acoplamentos magnetoelásticos,

gera diferentes direções de fácil magnetização e anisotropias consideráveis. Conseqüentemente são observados diferentes comportamentos magnéticos. Mesmo as-

sim, ligas amorfas magnéticas possuem coercividades extremamente baixas, e altíssimas permeabilidades.

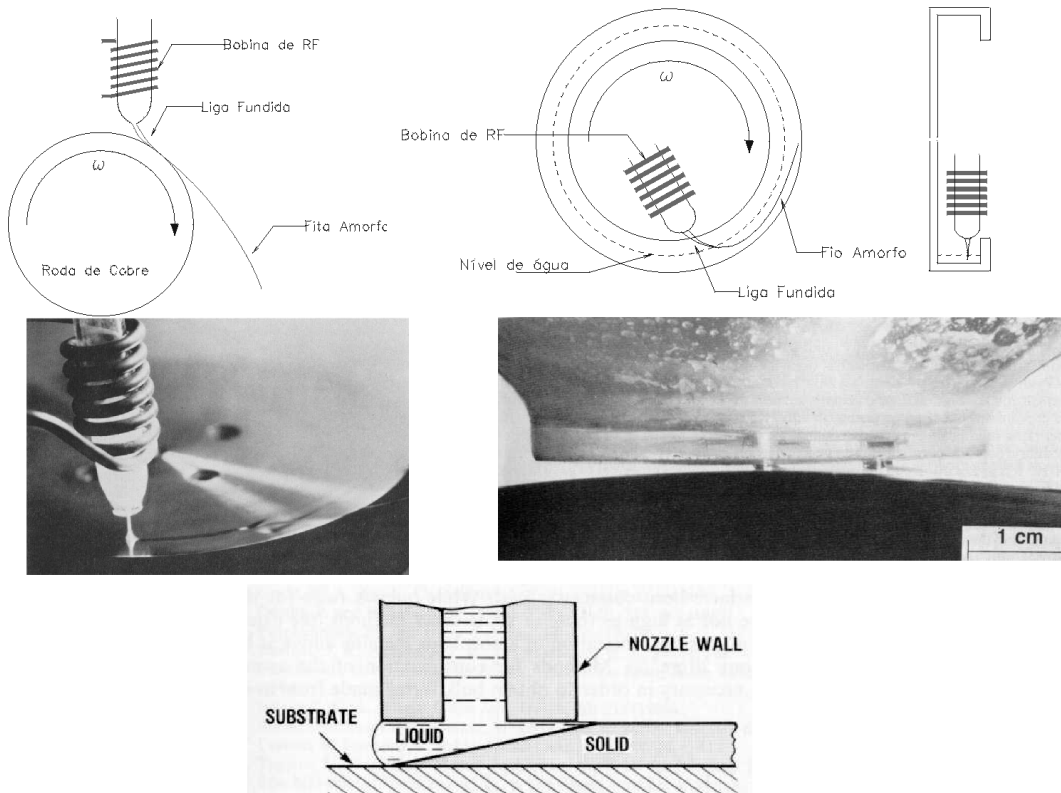


Figura 7. Diagrama esquemático de um melt spinner para a produção de fitas amorfas (acima/esquerda) e diagrama esquemático de um melt spinner para a produção de fios amorfos(acima/direita). Produção de uma liga metálica amorfa (centro direita) e detalhe da ejeção de material fundido durante o processo de fabricação (centro esquerda). Diagrama esquemático do processo de solidificação sobre a roda de cobre (abaixo). (diagramas retirados da ref. 6 e figuras retiradas da ref. 4.)

A Fig. 6 mostra a coercividade medida em função de tensões aplicadas em duas fitas amorfas de mesma composição, mas que foram produzidas com taxas de resfriamento diferentes (variando a velocidade da roda de cobre). As tensões mecânicas induzidas durante o processo de fabricação são portanto diferentes e o comportamento magnético também é diferente [8,9]. Na amostra A, produzida com maior taxa de resfriamento, podemos notar um mínimo da região de 100 MPa. As tensões aplicadas agem no sentido de compensar as tensões internas. Com isso, existe uma redução das anisotropias de tensão e a amostra se torna mais doce, com uma coercividade bem baixa. A amostra C, produzida com taxas de resfriamento mais baixas, possui um mínimo em regiões de mais baixas tensões, indicando um volume menor de tensões na amostra (cerca de 50 MPa). A linha cheia representa um ajuste feito a partir de um modelo para a coercividade que considera o deslocamento de paredes de domínio pelo material [10-12].

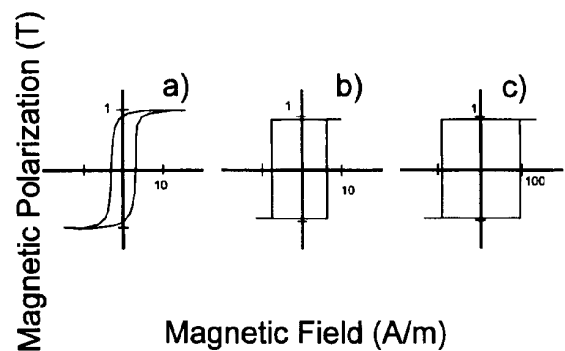


Figura 8. Curvas de magnetização medidas em fitas (a), fios (b) e microfios amorfos. (retirada da ref. 11).

Na Fig. 5-b, a curva mostra um comportamento retangular, indicando um processo de magnetização caracterizado por um salto. A magnetização assume apenas dois valores possíveis, e a mudança de um valor a outro se dá de forma brusca e rápida. Este comportamento, conhecido como bi-estabilidade, é tipicamente observado em alguns tipos de fios amorfos, que possuem

uma estrutura de domínios particular. Numa visão simplificada, considera-se que a estrutura de domínios destes fios é composta de um núcleo central magnetizado na direção longitudinal do fio, e uma casca externa magnetizada perpendicularmente ao eixo longitudinal, como mostra a Fig. 7. Esta estrutura é induzida pelas tensões internas que se formam no processo de fabricação, onde a frente de solidificação caminha da superfície até o centro. Uma característica de fios bi-estáveis é a impossibilidade de se atingir um estado desmagnetizado. O estudo de propriedades magnéticas de fios amorfos também tem sido um tópico de grande interesse. Devido ao seu processo de produção distinto, fios amorfos apresentam um série de propriedades magnéticas interessantes com processos de magnetização peculiares. Isso, além de propiciar estudos importantes a nível de magnetismo básico, os torna candidatos fortes para diversas aplicações tecnológicas de alto impacto, tais como sensores magnéticos dos mais diversos tipos [13].

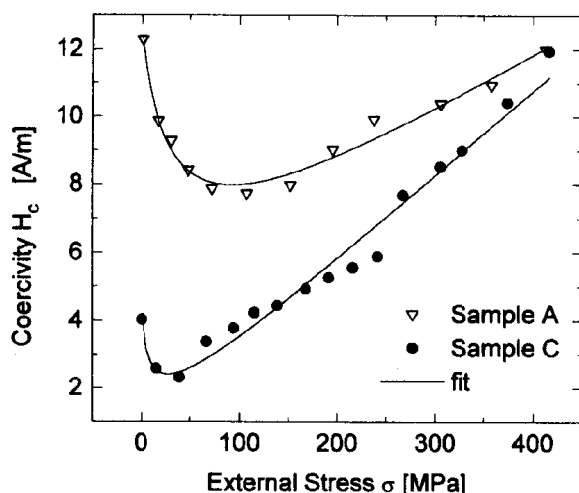


Figura 9. Coercividade em função de tensões externas em fitas amorfos de composição $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ produzidas com diferentes taxas de resfriamento. A taxa de resfriamento é maior na fita A. A linha cheia representa um ajuste considerando um modelo para a coercividade que leva em conta os deslocamentos de paredes de domínios. (retirada da ref. 8).

A estrutura é determinada pela distribuição de tensões internas. Em (a) temos um fio de magnetostrição positiva. Em (b) a magnetostrição é negativa. (retirada da ref. 11) Ainda como consequência da ausência de uma ordem estrutural de longo alcance, as ligas metálicas amorfos apresentam uma alta resistividade elétrica (tipicamente, da ordem de $1.5\mu\Omega m$) quando comparada a ligas de Fe-Si, (tipicamente, da ordem de $0.5\mu\Omega m$), o que resulta em baixas correntes induzidas, e baixas perdas de potência. Este tipo de material tem sido produzido, inclusive em escala industrial, para aplicação em transformadores de potência.

Trabalhos de desenvolvimento destes materiais têm sido feitos, principalmente pelos produtores comerciais como a *Allied Corporation* nos Estados Unidos, e a *Vacuum-schemelze GmbH*, na Alemanha. As propriedades magnéticas doces intrínsecas destes materiais indicam que estes podem ser utilizados numa vasta gama de transformadores, incluindo os de alta frequência e os de unidades de compressão de pulsos.

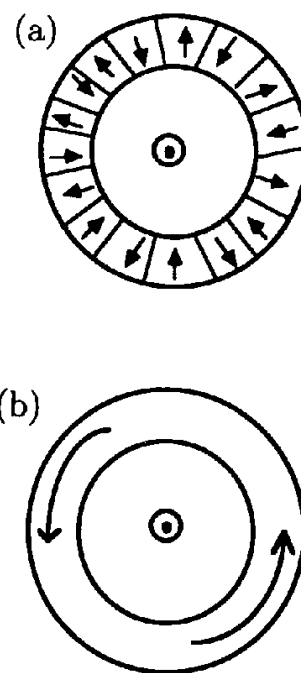


Figura 10. Diagrama esquemático da seção reta de fios amorfos mostrando uma visão da estrutura de domínios.

Além das propriedades magnéticas ótimas já descritas até aqui, materiais ferromagnéticos doces, e em especial os materiais amorfos, exibem o que se conhece por magnetoimpedância [14]. Há atualmente um volume muito grande de publicações a respeito da magnetoimpedância. Este fenômeno tem atraído a atenção da comunidade científica por sua possível aplicação no campo de gravações e leituras magnéticas. O estudo das relações entre os processos de magnetização em materiais ferromagnéticos e a magnetoimpedância [15] tem sido uma constante nas recentes publicações, estudos que surgem tanto do ponto de vista experimental, em medidas com diferentes tipos de materiais ferromagnéticos (amorfos, nanocristalinos, filmes finos, eletrodepositados, etc), ou em trabalhos puramente teóricos onde se tenta uma descrição exata do fenômeno baseando-se em abordagens eletromagnéticas clássicas.

Referências

- [1] Chih-Wen Chen, *Magnetism and Metalurgy of Soft Magnetic Materials*, Dover Publications, Inc., New York, (1986), 1.
- [2] P. Weiss, *J. Phys.*, **6**, 661 (1907).
- [3] A.H. Morrish, *The physical Principles of Magnetism*, John Willey & Sons, New York, (1965), 411.
- [4] K. Klement, R.H. Willens and P. Duwez, *Nature*, **187**, 869 (1970).
- [5] R.W. Cochrane and J.O. Ström-Olsen, eds, *Proc. 6th Int. Conf. On Rapidly Quenched Materials*, 3 vol., 1989, Amsterdam - Elsevier.
- [6] Y. Yoshisawa, S. Oguma, K. Yamauchi, *Journal of Applied Physics*, **64**, 6044 (1988).
- [7] J.P. Sinnecker, Tese de Doutorado - UNICAMP, 1995.
- [8] M. Knobel, J.P. Sinnecker, R. Sato Turtelli, H.R. Rechemberg and R. Grössinger, *Journal of Applied Physics*, **73**(10), 6603 (1993).
- [9] J.P. Sinnecker, R. Grössinger, R. Sato Turtelli, G. Exel, G. Greifeneder, and C. Kuss, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **133**, 20 (1994).
- [10] R. Sato Turtelli, J.P. Sinnecker, R. Grössinger and M. Vázquez, *Journal of Applied Physics*, **78**(4), 2590 (1995).
- [11] Ch. Polak, R. Grössinger, J.P. Sinnecker, M. Knobel, R. Sato Turtelli and C. Kuss, *Magnetoelastic Effects and Applications*, edited by L. Lanotte, Elsevier, (1993), 261.
- [12] Ch. Polak, J.P. Sinnecker, R. Grössinger, M. Knobel, R. Sato Turtelli and C. Kuss, *Journal of Applied Physics*, **73**(10), 5727 (1993).
- [13] M. Vázquez and A. Hernando, *Journal of Physics D: Appl. Phys.*, **29**, 939 (1996).
- [14] J.P. Sinnecker, M. Knobel, M.L. Sartorelli, J. Schonmacker and F.C.S. Silva, *Journal de Physique IV*, 8-PR2, (1999), 186.
- [15] M. Vázquez, J.P. Sinnecker, G.V. Kurlyandskaya, (invited) *Material Science Forum*, 302-303, (1999), 209.