

Materiais Magnéticos

A utilização dos aços como materiais ferromagnéticos só pode ser discutida com base em suas propriedades magnéticas. As suas propriedades mecânicas e químicas que têm constituído as características para a comparação dos materiais até aqui estudados, quase sempre podem ser ignoradas.

Costuma-se incluir no estudo dos aços para fins elétricos outros materiais com propriedades ferromagnéticas, que não contém ferro, e o assunto é sempre abordado sob o título mais geral de «Materiais Magnéticos».

A produção desses materiais representa 1 % da produção de ferro e aço, sendo portanto equivalente à dos aços inoxidáveis, ou dos produtos de metalurgia do pó, mas, por tratar-se de materiais para fins especializados, não se faz grande propaganda em torno de suas características, havendo mesmo certa reserva na divulgação, com caráter publicitário, de informações técnicas a respeito desses materiais.

A aplicação dos materiais magnéticos é das mais extensas no campo da indústria elétrica, exigindo-se características especiais tanto no caso de um pequeno motor para relógio elétrico, como no de um motor de grande potência para acionamento de um laminador, ou, no caso de um transformador de alta frequência para rádio comunicações, ou de alta potência para uma rede de distribuição de força. Particularmente nestes casos em que se lidam com potências extremamente baixas, ou extremamente altas, é que as exigências quanto às propriedades magnéticas e elétricas se tornam mais imperativas.

Até poucos anos atrás as companhias de equipamentos elétricos faziam seus produtos de um modo mais ou menos empírico, louvando-se apenas em sua experiência industrial. Com o atual desenvolvimento das aplicações desses materiais despertou-se o interesse dos pesquisadores, tanto no campo fundamental, como de novas aplicações, desenvolvendo-se o conhecimento das propriedades desses materiais, de modo a permitir a compreensão de certos fenômenos e a correlação entre magnetismo, composição química e estrutura.

Como o estudo dos materiais incluídos neste capítulo só poderá ser feito através de suas propriedades magnéticas é conveniente que se faça uma rápida recordação do significado físico dessas propriedades.

Magnetismo — O tratamento quantitativo dos fenômenos magnéticos originaram-se com a descoberta de Coulomb da lei de atração entre polos magnéticos. Daí se tornou possível definir a unidade de polo, ou massa magnética, como a massa magnética que provoca em uma massa idêntica, colocada à distância de 1 cm, uma força repulsiva de 1 dina.

Os fenômenos magnéticos na natureza são sempre dipolares, isto é, implicam na existência de dois polos com massas magnéticas contrárias, guardando entre si um certo afastamento.

O conceito de polo isolado só é utilizado com o objetivo de facilitar a compreensão da natureza dos campos magnéticos, cujo aspecto físico pode ser materializado se introduzirmos o conceito de linhas de força, que são linhas normais às superfícies equipotenciais que envolvem os polos magnéticos. Essas linhas representam os circuitos magnéticos que emanam ou convergem a um polo. Por definição considera-se que uma esfera de 1 cm de raio envolvendo um polo magnético unitário é penetrada por 4π linhas de força, portanto, cada centímetro quadrado da superfície dessa esfera é atravessado por uma linha de força.

Intensidade de um campo magnético, ou força magnetizante

Materializando-se o campo magnético com o conceito de linhas de força, a intensidade do campo corresponde ao número de linhas que atravessa a unidade de área normal à direção do campo.

A unidade de intensidade de campo magnético recebe o nome de oersted e corresponde à intensidade de um campo que exerce uma força de 1 dina, numa unidade de massa magnética nele colocada. Portanto, a 1 cm de um polo unitário a intensidade de um campo magnético é de 1 oersted.

Intensidade de magnetização e indução magnética

Define-se quantitativamente o magnetismo de uma substância, ou sua intensidade de magnetização, ou simplesmente, magnetização, pelo número de polos magnéticos unitários existentes por unidade de área numa seção do material.

Se o número de polos unitários na extremidade de uma barra de comprimento «l» for «m», e a área da seção for «α», a intensidade de magnetização «I» será dada pela relação: $I = m/\alpha$.

Demonstra-se que I representa também o momento magnético «M» por unidade de volume, pois:

$$M = ml$$

$$v = \alpha l \therefore l = \frac{v}{\alpha}$$

$$M = m \frac{v}{\alpha} = Iv \quad \text{ou} \quad I = \frac{M}{v}$$

Sabemos que um campo magnético pode também ser produzido por uma corrente elétrica. Se o condutor fôr enrolado em forma de anel ou em solenoide, a circulação de corrente gerará um campo magnético cuja intensidade será função da intensidade da corrente e do número de espiras. Esse campo magnético é designado pelo símbolo «H» e também pode ser medido em oersted. No caso particular de um solenoide longo, com «n» espiras por centímetro e percorrido por uma corrente de «i» amperes, a intensidade do campo no centro do solenoide será:

$$H = \frac{4 \pi ni}{10} \text{ oersted}$$

Se introduzirmos nesse solenoide um núcleo ferromagnético, o campo H induzirá no núcleo, linhas de magnetização, devido a natureza ferromagnética do material. Fisicamente isso corresponde a um alinhamento dos dipolos elementares do material, na direção do campo. Sendo o momento dos dipolos por unidade de volume igual à intensidade de magnetização I, haverá $4 \pi I$ linhas de força por unidade de área do polo magnético do núcleo. O fator 4π decorre do fato de que cada polo unitário produz um campo unitário em todos os pontos da superfície esférica de raio unitário que envolve o polo.

O número total de linhas de força no solenoide será agora igual a $H + 4 \pi I$, o que recebe o nome de indução magnética «B»

$$B = H + 4 \pi I$$

A indução magnética correspondente a uma linha de força por centímetro quadrado recebe o nome de 1 gauss. No sistema inglês ela é expressa em linhas por plegada quadrada e não tem um nome especial.

Intensidade de saturação

Quando todos os dipolos elementares do material magnético estiverem perfeitamente alinhados com o campo externo, a intensidade de magnetização atinge um valor máximo, recebendo o nome de intensidade de saturação I_s . Essa intensidade de saturação depende da composição química, das fases presentes na estrutura do material e de seu volume.

Permeabilidade

O valor da indução magnética por unidade de intensidade do campo recebe o nome de permeabilidade.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Como veremos adiante, nos materiais ferromagnéticos, B não é função linear de H, de modo que, a permeabilidade não é constante e depende da intensidade do campo magnetizante.

Suscetibilidade

É definida pela relação $K = \frac{I}{H}$, de modo que, está relacionada à permeabilidade, da seguinte maneira:

$$B = H + 4\pi I$$

dividindo por H:

$$\frac{B}{H} = 1 + 4\pi \frac{I}{H}$$

ou

$$\mu = 1 + 4\pi K$$

Propriedades magnéticas da matéria

Demonstra-se que tôdas as substâncias, em qualquer estado físico possuem propriedades magnéticas e podem ser classificadas numa das seguintes categorias: 1 — Materiais diamagnéticos; 2 — Materiais paramagnéticos e 3 — Materiais ferromagnéticos.

Si colocarmos diversas substâncias num campo magnético observaremos que algumas orientar-se-ão na direção do campo, ficando fortemente magnetizadas. Estas recebem o nome de ferromagnéticas. Outras se magnetizam fracamente, mas também se orientam paralelamente ao campo e são chamadas paramagnéticas e, finalmente, outras dispôr-se-ão normais ao campo, caso êste não seja uniforme, e são as diamagnéticas. Como os efeitos magnéticos nas substâncias dia e paramagnéticas são relativamente fracos, elas são consideradas como materiais não magnéticos.

O diamagnetismo é uma propriedade inerente a todos os materiais e só não é detectável na presença de efeitos paramagnéticos, ou ferromagnéticos, mais intensos.

Langevin demonstrou que a aplicação de um campo magnético num sistema de eletrons em movimento de translação induz um momento magnético que se opõe ao campo externo. A variação do momento induzido com o campo é a suscetibilidade diamagnética. Tanto a teoria de Langevin como as observações experimentais demonstram que essa suscetibilidade é independente da temperatura.

Nos elementos que possuem orbitas eletrônicas incompletas os momentos magnéticos resultantes dos movimentos de translação e de rotação dos eletrons podem não se compensarem e cada átomo no reticulado comportar-se-á como um dipolo magnético, com orientação a esmo. A aplicação de um campo magnético externo tenderá orientar êsses dipolos na direção do campo, o que constitui o efeito paramagnético. Nestas circunstâncias, explica-se a influência da temperatura neste efeito. No trata-

mento teórico do problema, Langevin calculou a relação entre o momento magnético induzido e a temperatura, obtendo resultado que se verifica com bôa aproximação pelas determinações experimentais.

Em alguns casos, como como por exemplo no do cobre, o paramagnetismo fraco dos eletrons das orbitas incompletas não contrabalança a contribuição diamagnética das orbitas internas,

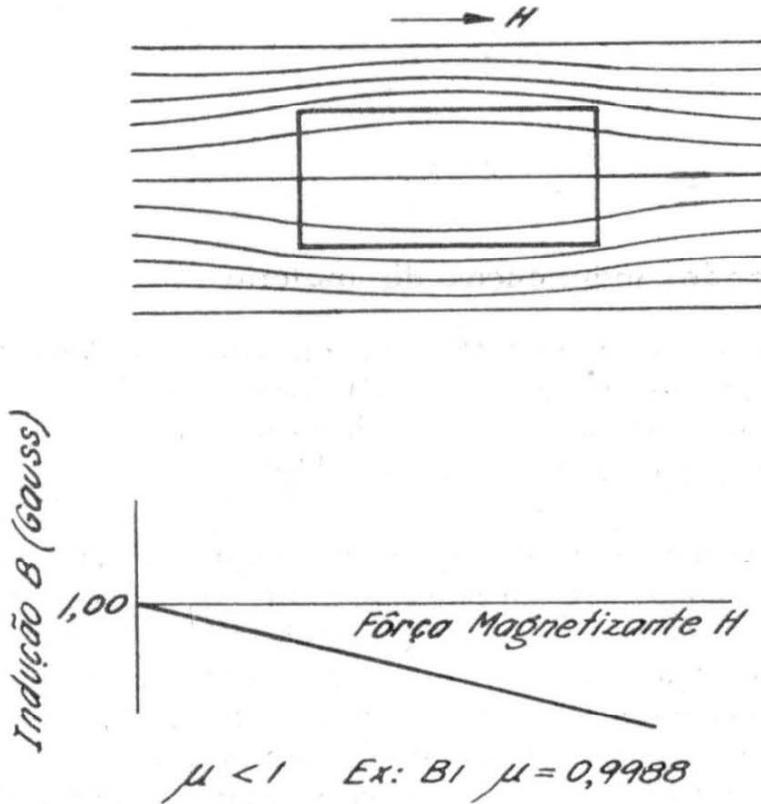
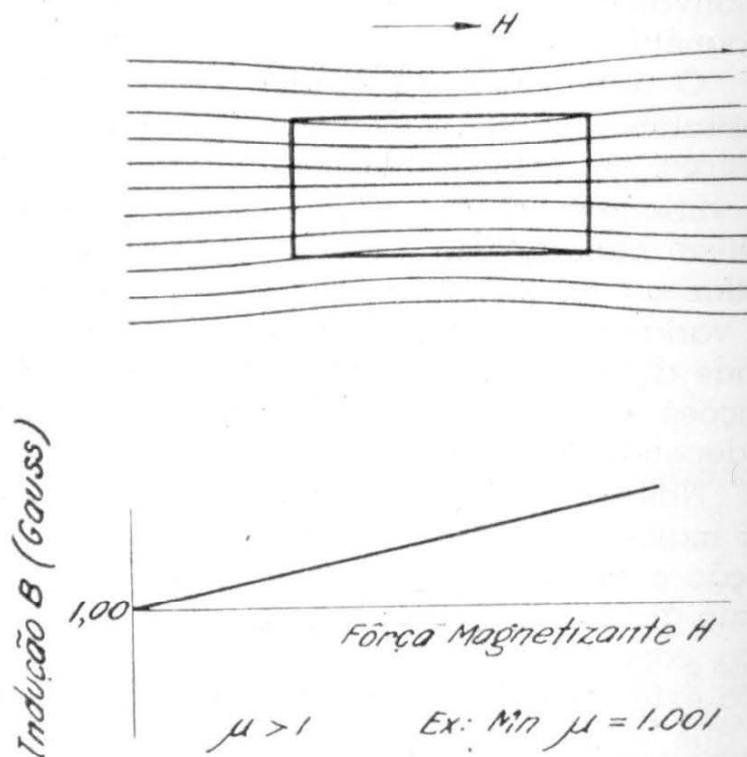


FIG. 62 — Distribuição das linhas de força na transição do ar, ou do vácuo, para um material diamagnético. Diagrama B vs. H para o mesmo material.

FIG. 63 — Distribuição das linhas de força na transição do ar, ou do vácuo, para um material paramagnético. Diagrama B vs. H para o mesmo material.



de modo que, o efeito resultante é diamagnético. As figuras n^{os} 62 e 63 esquematizam a distribuição das linhas de força nesses dois tipos de materiais.

Os materiais ferromagnéticos diferem dos paramagnéticos por possuírem uma permeabilidade que pode atingir valores milhares de vezes maiores que a dos materiais paramagnéticos, cuja permeabilidade é constante e pouco superior a 1. Além disso, a permeabilidade dos materiais ferromagnéticos depende da intensidade do campo magnetizante, como mostra a fig. 64.

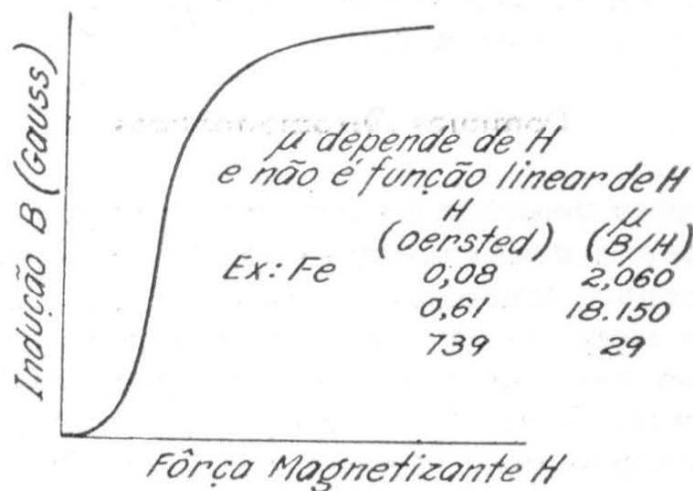
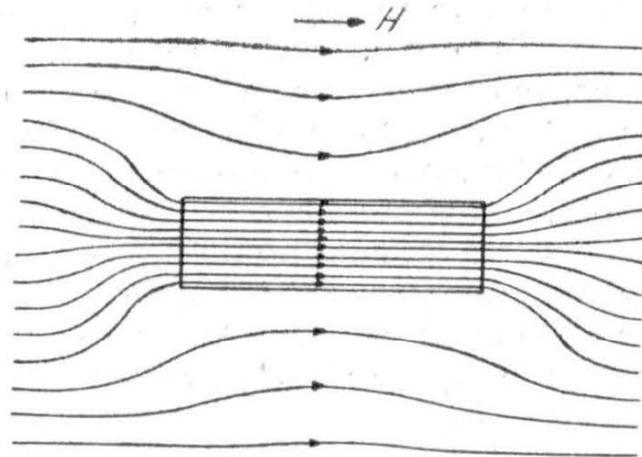


FIG. 64 — Distribuição das linhas de força na transição do ar, ou do vácuo, para um material ferromagnético. Diagrama B vs. H para o mesmo material.

Para a explicação do ferromagnetismo devemos levar em conta dois fenômenos importantes: 1) Que esse comportamento só se observa em 4 dos 92 elementos conhecidos, isto é, no ferro, cobalto, níquel e gadolínio; 2) Que o elevado momento magnético apresentado por esses elementos depende do campo magnetizante.

O estudo teórico do assunto levou à conclusão que o efeito ferromagnético depende do spin dos elétrons, de modo que, cada

eletron girando em torno de sí próprio comporta-se como no caso das substâncias paramagnéticas como um dipolo elementar. Estes podem ser orientados paralelos aos campos externos mas, normalmente não estão completamente orientados. O estado de mínima energia num sistema atômico dá-se quando um certo número desses imãs elementares estão orientados numa direção e um número equivalente, em sentido oposto. A propriedade ferromagnética se manifesta quando o número de spins eletrônicos (momento magnético devido ao spin) paralelos ao campo aplicado ultrapassa o número de antiparalelos.

O fato do ferromagnetismo só ser observado nos 4 elementos citados não é acidental. Esses elementos de transição são caracterizados por possuírem orbitas de alta densidade eletrônica, não saturadas (orbitas d e f), de modo que, tal equilíbrio não se verifica. A teoria moderna, baseada na mecânica quântica, estabelece que, em determinadas condições, o estado de mínima energia nessas orbitas ocorre quando há uma preponderância de spins paralelos sobre antiparalelos. Essas condições são: 1) Que o material esteja no estado sólido; 2) Que a relação entre as distâncias interatômicas e os raios das orbitas citadas esteja dentro de certos limites.

Aplicando essas condições a diversos elementos, Bethe e outros pesquisadores verificaram que elas são satisfeitas pelos quatro elementos ferromagnéticos.

Domínios ferromagnéticos

As condições descritas no paragrafo anterior, quando satisfeitas, permitem a interação entre os eletrons das orbitas 3 d, de átomos visinhos tendendo orientá-los magneticamente numa direção. Esse efeito se estende a pequenos volumes do cristal, delimitando no seu interior regiões da ordem de 10^{-9} cm³, chamadas domínios. Nessas condições cada cristal, ou grão, de um metal ferromagnético, mesmo na ausência de um campo magnetizante externo, se acha dividido em domínios ferromagnéticos, com as características de dipolos elementares. O estado macroscópico de desmagnetização é explicado como um resultado estatístico da orientação a esmo dos domínios ferromagnéticos.

Uma demonstração prática dessa teoria foi dada por Bitter, que obteve desenhos em superfícies polidas de cristais ferromagnéticos pela distribuição zonada de Fe₂O₃, em pó. Mais tarde, determinando-se as curvas de magnetização por métodos eletrônicos sensíveis, observou-se que elas apresentam discontinuidades durante a magnetização, que correspondem às que resultariam de mudanças de direção em domínios da ordem de grandeza dos propostos pela teoria.

Curva de magnetização

Uma curva de magnetização, como a que se vê na fig. 65, nos dá a variação da indução B , com a força magnetizante H .

Nessa figura, o trecho que parte da origem e atinge o ponto mais elevado da curva, corresponde a curva de magnetização e o ciclo fechado pela linha externa representa o ciclo de histerese, que decorre do fato dos fenômenos de magnetização não serem fenômenos reversíveis, pois, com a diminuição do campo H , B não diminui de acordo com a curva de magnetização.

O coeficiente angular das retas traçadas da origem a pontos da curva de magnetização representa a permeabilidade do material, na correspondente intensidade do campo magnetizante, ou da indução B . Pelo desenvolvimento da curva de magnetização do ferro puro pode-se vêr que a permeabilidade varia com o

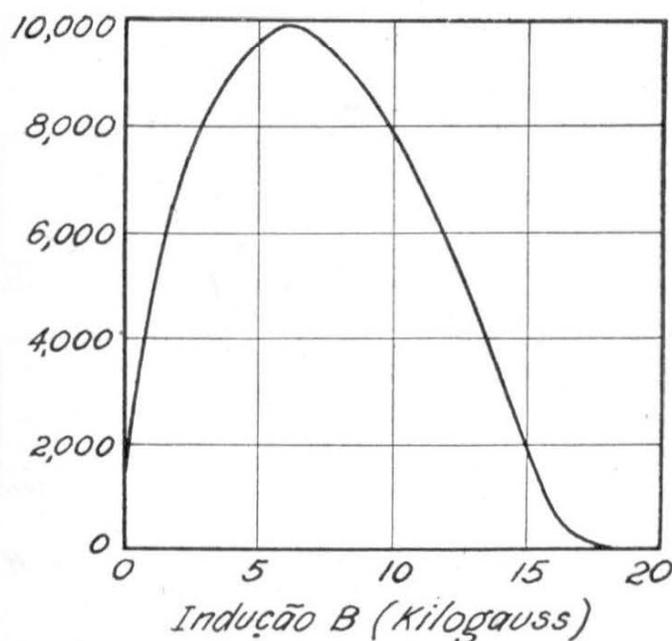


FIG. 66 — Relação entre a permeabilidade e a indução magnética do ferro puro. (Stanley)

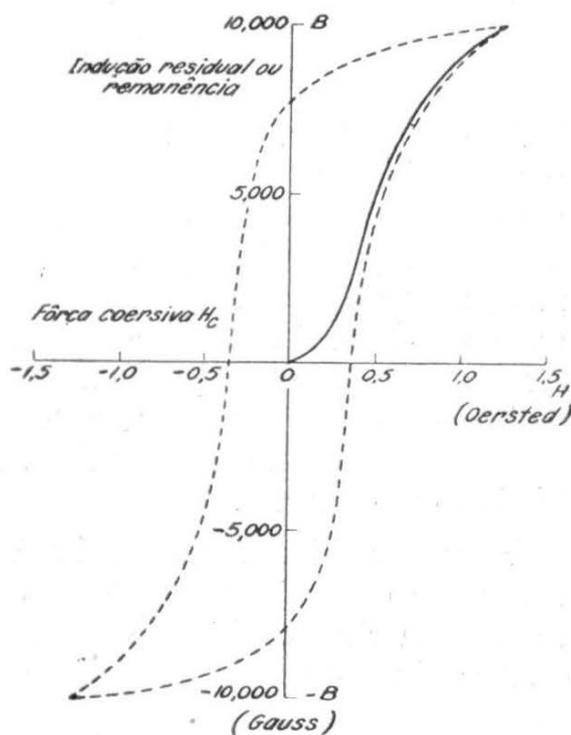


FIG. 65 — Curva de magnetização e ciclo de histerese do ferro.

campo magnetizante de um modo não linear, passando por um máximo, que corresponde à tangente tirada da origem ao cotovelo da curva. A figura 66 nos mostra, ainda no caso do ferro puro, a variação da permeabilidade μ com a indução B .

Como B está relacionado a H pela expressão

$$B = H + 4\pi I$$

B cresce ilimitadamente com H .

Se em lugar de B traçarmos uma curva de magnetização locando $B-H$ vs. H à parte superior dessa curva tenderá assintoticamente para um valor máximo de $B-H$. Esse valor máximo está relacionado à intensidade de saturação I_s , pela expressão:

$$(B-H)_{\max} = 4 \pi I_s$$

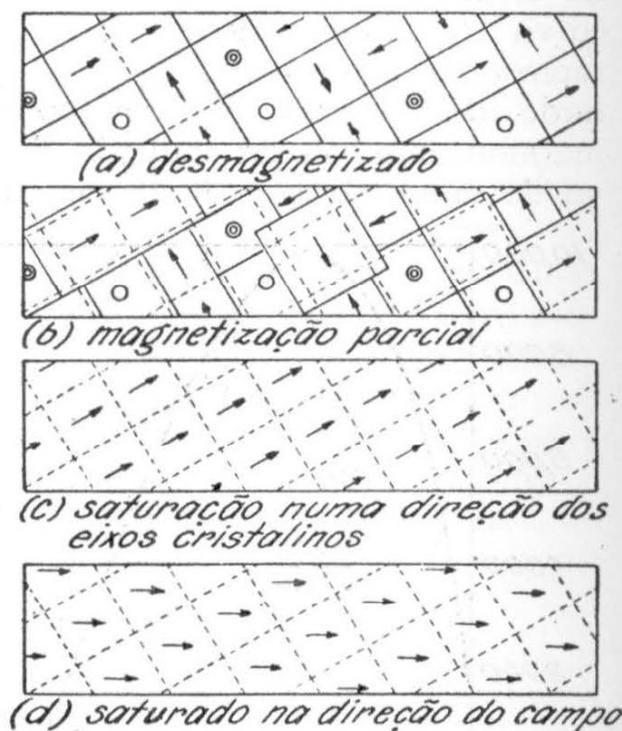
Voltando à curva da figura 65, com a eliminação do campo H o valor de B não volta a zero, mas, se reduz a um valor que recebe o nome de indução residual, ou remanência. Essa remanência representa a magnetização retida pelo material. Se em seguida aplicarmos um campo de sentido oposto, o valor da magnetização residual decrescerá progressivamente até zero. O valor do campo desmagnetizante que anula a magnetização residual recebe o nome de força coerciva. Para campos desmagnetizantes mais intensos o ciclo se repete de modo análogo e simétrico ao descrito.

A irreversibilidade dos fenômenos de magnetização exige um consumo de energia para que um dado volume de material percorra um ciclo de histerese. Essa energia é dissipada na forma de calor durante a orientação dos domínios ferromagnéticos e está relacionada à área do ciclo de histerese. No caso de campos continuamente alternantes, como os que ocorrem nos transformadores, a cada ciclo da tensão corresponderá uma perda proporcional a área do ciclo de histerese do material do núcleo. Por outro lado, as variações do fluxo magnético geram no núcleo correntes elétricas que também se dissipam na forma de calor e que recebem o nome de correntes de Foucault.

A soma da perda devido à histerese com a perda devido às correntes de Foucault recebe no nome de perda do núcleo e constitui uma característica importante para a classificação dos materiais para núcleos de transformadores.

Características das curvas de magnetização

Na parte inicial das curvas de magnetização os fenômenos são praticamente reversíveis e B varia de um modo aproximadamente linear



X Eixos do cristal → H

FIG. 67 — Mudança na orientação dos domínios ferromagnéticos de um cristal durante o processo de magnetização. (Bozorth)

com H . Nessa região os domínios com orientação favorável, em relação ao campo magnetizante, crescem às expensas dos domínios vizinhos desfavoravelmente orientados, pelo movimento de seus contornos, mantendo sua orientação com relação aos eixos cristalográficos. Vêr fig. 67.

A parte média da curva é a região onde as perdas por histerese ocorrem. Aqui a magnetização é irreversível e resulta de mudanças bruscas na orientação dos domínios, associadas ainda a movimentos dos contornos. O cotovelo da curva corresponde a orientação de todos os domínios paralelamente aos eixos cristalográficos que mais se aproximam da direção do campo. Na parte superior da curva, onde a magnetização tende à saturação, o fenômeno é novamente reversível. Ele resulta da progressiva orientação dos domínios no sentido do campo.

Anisotropia dos materiais magnéticos

De um modo geral observa-se que nos materiais policristalinos a suscetibilidade magnética é idêntica em tôdas as direções. Se considerarmos porém um cristal isolado veremos que êle apresenta maior ou menor tendência para magnetizar-se de acôrdo com determinadas direções cristalográficas. As figuras 68 e 69 ilustram esta afirmação. No caso do ferro, (fig. 68), as direções $[100]$ são as de maior suscetibilidade, ao passo que para o níquel as direções $[111]$ são as mais favoráveis.

Essa particularidade não teria importância prática se certos materiais magnéticos, como as ligas Fe-Si, não manifestassem

orientações preferenciais. Certos metais e ligas metálicas quando encruados por laminação até determinadas percentagens de redução, ao se recristalizarem, por recozimento, desenvolvem os novos grãos com seus eixos cristalográficos em orientações preferenciais. Nessas condições o comportamento anisotrópico dos cristais individuais e a orientação preferencial desses cristais

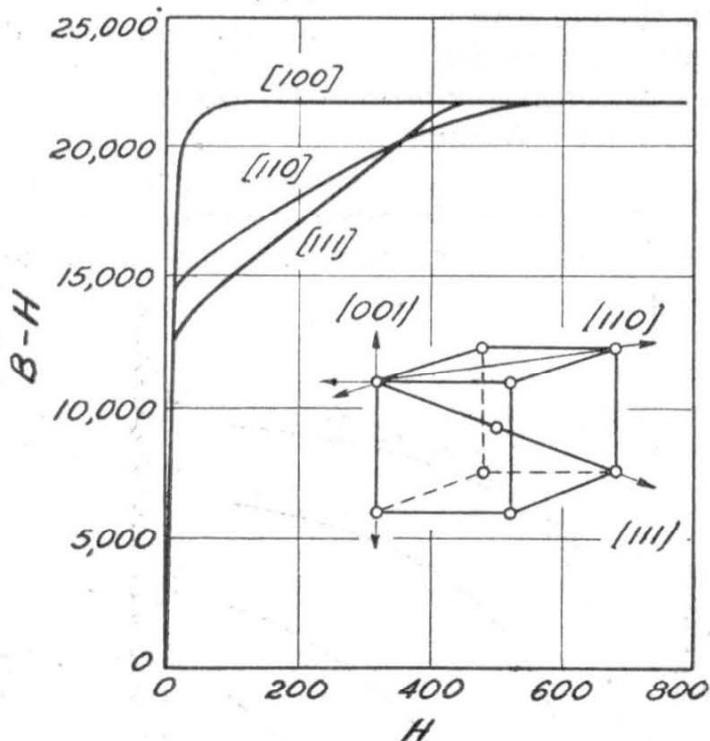


FIG. 68 — Anisotropia magnética de um cristal de ferro. (Bozorth)

podem proporcionar a um produto melhores propriedades magnéticas em determinadas direções. É o caso das chapas Hipersil, (Fe com 3,25% de Si), para transformadores.

Efeito de inclusões, fissuras e constituintes não magnéticas

A força magnetizante efetiva H_{ef} , é constituída por duas parcelas: H_f que representa a intensidade do campo externo e H_d que representa os campos desmagnetizantes. Assim:

$$H_{ef} = H_f - H_d$$

Os campos desmagnetizantes são os campos que se formam nos entreferros naturais, ou resultantes de trincas internas e nas inclusões e constituintes não magnéticas.

O aumento desses defeitos, ou desses constituintes, diminui a força magnetizante efetiva e isso altera a curva de magnetização, como mostra a fig. 70.

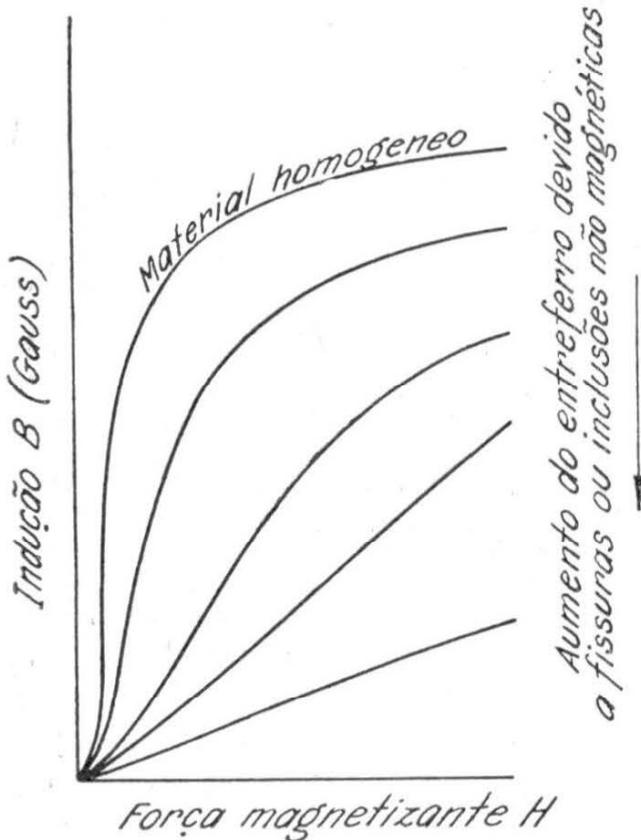


FIG. 70 — Influência da concentração de fissuras, ou inclusões, na curva B vs. H de um material ferromagnético. (Stanley)

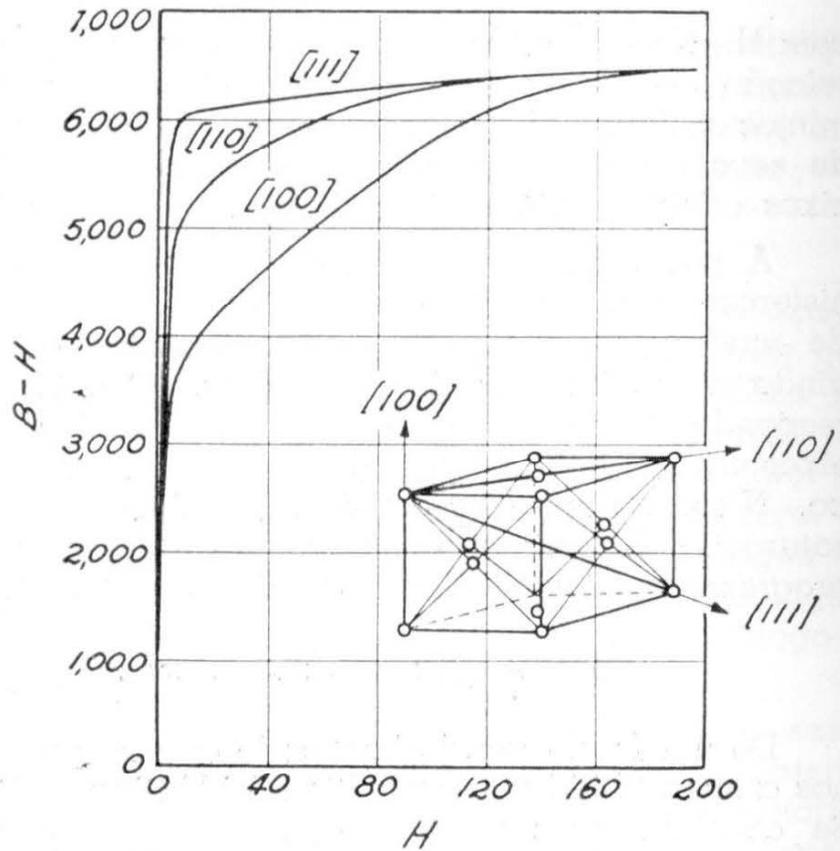


FIG. 69 — Anisotropia magnética de um cristal de níquel. (Bozorth)

Influência de temperatura nas propriedades ferromagnéticas — Ponto Curie

Opondo-se as forças ordenadoras das interações atômicas, que promovem a formação dos domínios ferromagnéticos, existem as forças provocadas pela agitação térmica, que podem causar o desaparecimento desses domínios. Como estas aumentam com a temperatura, há para todos os materiais ferromagnéticos níveis de temperatura acima dos quais o efeito dispersivo da agitação térmica anula a tendência orientadora das forças de interação atômica, de modo que, o material perde suas propriedades ferromagnéticas. Essa temperatura de transição recebe o nome de Ponto Curie.

Resfriando-se o material abaixo do ponto Curie suas características ferromagnéticas são recuperadas. A fig. 71 mostra a variação da intensidade de saturação do ferro com a temperatura.

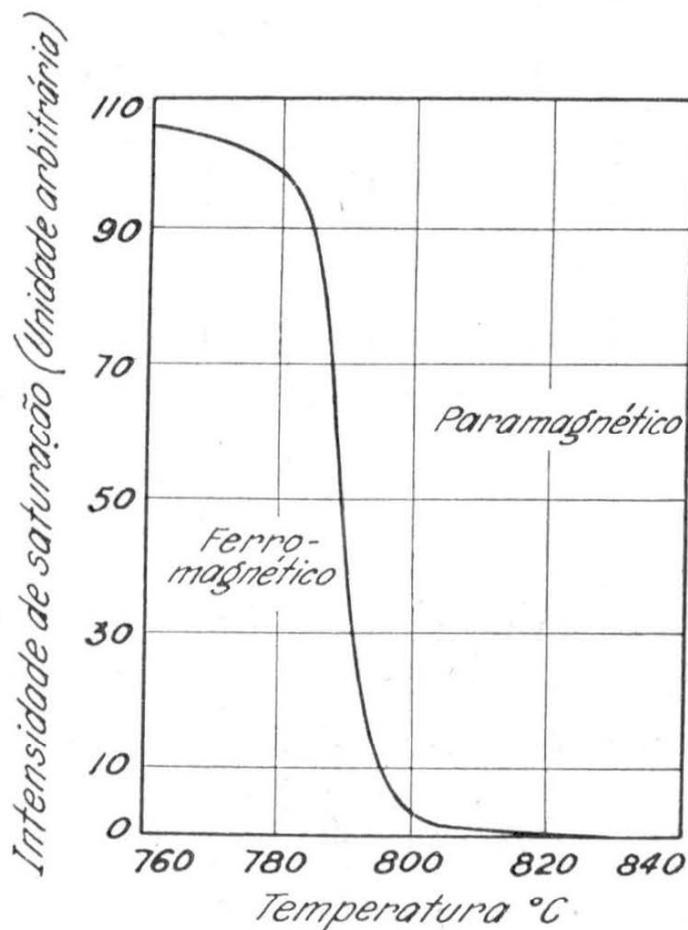


FIG. 71 — Perda das propriedades ferromagnéticas do ferro, no aquecimento. (Stanley)

Magnetoestricção

A magnetoestricção abrange tôdas as mudanças de dimensões que sofrem os materiais ferromagnéticos quando submetidos a campos magnetizantes. Esse fenômeno recebe várias denominações, como por exemplo, efeito Joule, quando se trata da variação do comprimento da peça, em campos transversais; efeito Barrett, quando é a variação do volume e efeito Wiedemann,

quando as variações de dimensões devido a campos radiais provocam movimentos de torção.

A fig. 72 mostra a variação do efeito Joule nas ligas Fe-Ni para diferentes fôrças magnetizantes.

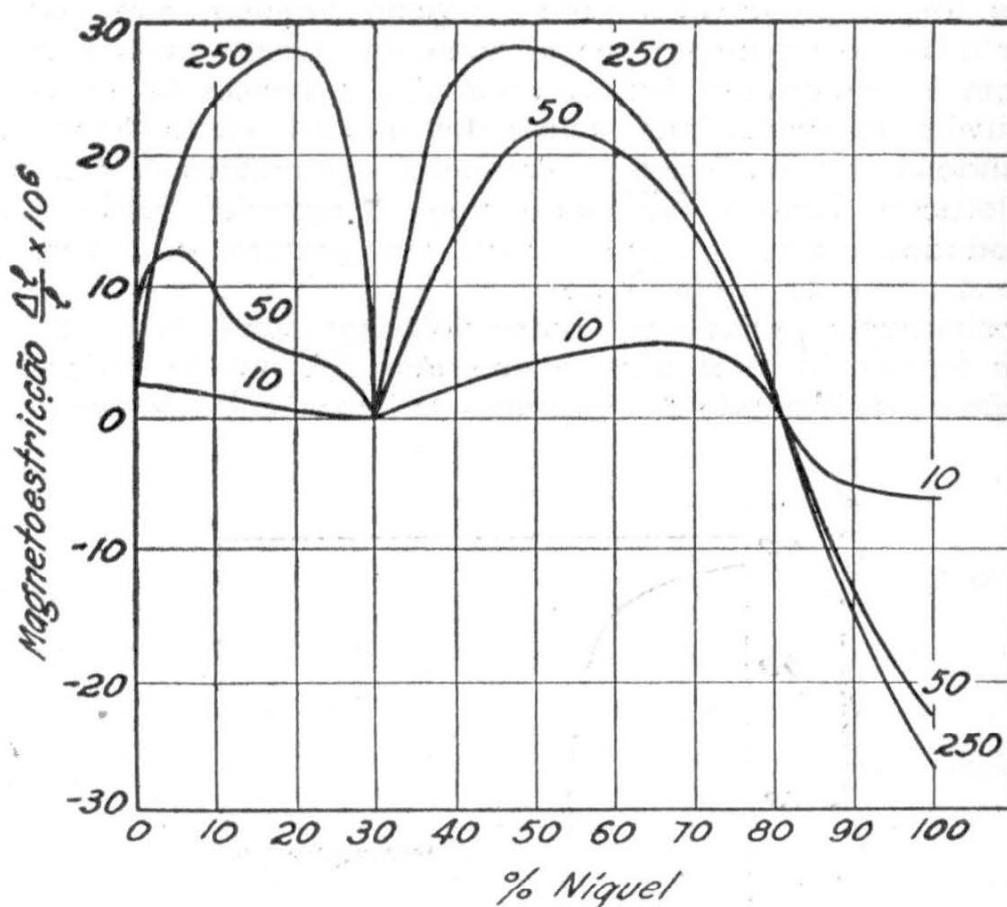


FIG. 72 — Magnetoestricção no sistema Fe-Ni. (Stanley)

Os materiais que se alongam quando submetidos a um campo magnético possuem uma magnetoestricção positiva. Nestes materiais a permeabilidade aumenta devido às deformações elásticas.

Tais materiais têm tido aplicação em eletrônica, na fabricação de osciladores e filtros. No campo da tecnologia sua aplicação mais interessante é para transformar energia elétrica de frequência ultrasônica em pulsações mecânicas com a mesma frequência como, por exemplo, nas máquinas perfuradoras para materiais extremamente duros, onde tais dispositivos são utilizados para impulsionar partículas de abrasivo contra o material a ser perfurado.

Metais e ligas para indústria elétrica

Costuma-se dividir os materiais magnéticos para indústria elétrica em dois grupos:

- 1) Materiais de alta permeabilidade e baixa fôrça coerciva, ou materiais magneticamente moles;
- 2) Materiais de alta fôrça coerciva, magneticamente duros,

ou imãs permanentes. Neste grupo, a permeabilidade não é uma característica importante.

As designações, magneticamente mole, ou duro, apesar de não se destinarem a descrever a dureza mecânica desses materiais, mas, sua resistência à desmagnetização, de um modo geral, também representa seu comportamento mecânico.

Na parte de aços para fins magnéticos, denominaremos ferro, ou ligas de ferro, aos materiais magneticamente moles, nos quais o carbono existente ocorre mais como impureza do que como elemento de liga.

As ligas de ferro para imãs permanentes que possuem teores mais elevados de carbono são denominados aços.

Materiais magneticamente moles

Este é o grupo mais importante dos materiais magnéticos. Trata-se de materiais que necessitam ter alta intensidade de saturação, alta permeabilidade e uma força coerciva bem pequena. A remanência pode ser baixa, ou alta, conforme o tipo de aplicação. Por exemplo, num «relay» sensível, de desligamento rápido, necessitamos um material de baixa remanência, para reduzir o agarramento quando se corta o campo magnetizante.

Nas aplicações em corrente alternada necessitamos ligas de baixa histerese e de alta resistividade para diminuirmos a perda do núcleo.

Ferro, níquel e cobalto

Dentre os materiais magneticamente moles devemos estudar em primeiro lugar os três elementos ferromagnéticos mais comuns: Ferro, níquel e cobalto.

O ferro quimicamente puro é o que apresenta melhores características magnéticas, mas seu preço é muito elevado para as aplicações normais. Para substituí-lo, usam-se os aços extra-doces, que, apesar de inferiores, dão resultados satisfatórios.

O Ni e o Co são elementos menos ferromagnéticos do que o Fe e de preço mais elevado.

A tabela seguinte nos dá a variação da indução B com a força magnetizante H para êsses 3 elementos.

| H (oersted) | B (gauss) | | |
|----------------|-----------|-------|-------|
| | Fe | Ni | Co |
| 20 | 15.500 | 5.100 | 1.200 |
| 40 | 16.200 | 5.500 | 2.800 |
| 60 | 16.800 | 5.700 | 4.400 |
| 80 | 17.300 | 5.800 | 6.000 |
| 100 | 17.700 | 5.900 | 6.800 |
| 120 | 17.900 | 6.000 | 7.500 |

O ferro é indicado para quase tôdas as aplicações em corrente contínua. Para corrente alternada não é indicado, pois

possue baixa resistividade ($10 \mu \text{ ohm-cm}$), de modo que, as perdas por correntes de Foucault são elevadas.

Ligas ferro-silício

Estas são as ligas de maior consumo na indústria de produtos elétricos.

As adições de silício ao ferro aumentam consideravelmente sua resistividade, como mostra a figura 73, portanto, diminuem a perda do núcleo. O silício diminui a intensidade de saturação do ferro, mas não afeta apreciavelmente a permeabilidade e a perda por histerese.

Do ponto de vista das propriedades mecânicas, observa-se

que o silício acima de certos teores torna o material frágil e difícil de ser trabalhado. Esse comportamento, como se vê na

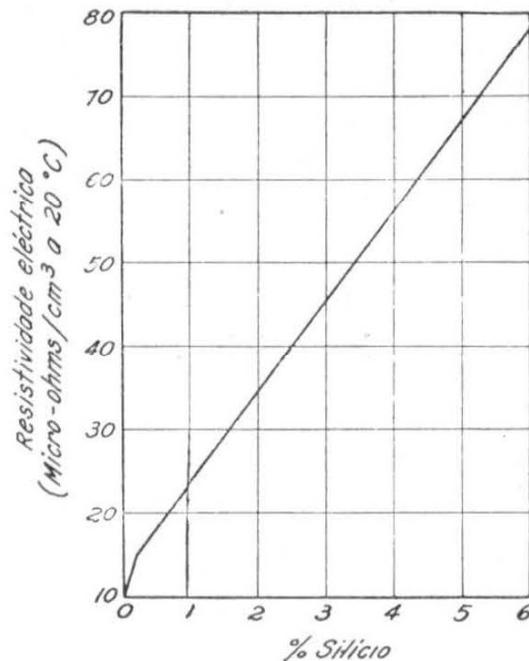


FIG. 73 — Efeito do silício na resistividade do ferro. (Stanley)

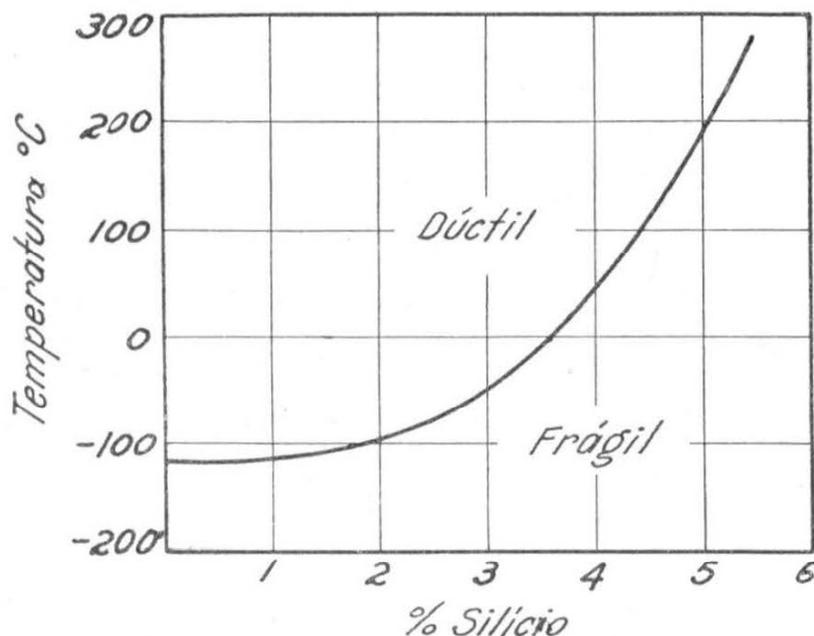


FIG. 74 — Efeito da percentagem de silício e da temperatura no comportamento dúctil, ou frágil, das ligas Fe-Si. A curva foi determinada por um dobramento e endireitamento completo. (Stanley)

fig. 74, depende da temperatura. Para cada composição existe uma temperatura mínima necessária para o trabalho mecânico. Por exemplo, para temperatura ambiente o referido gráfico nos mostra que o teor máximo de silício é de 3,5 %.

Uma das ligas mais importantes desta categoria é o Hipersil, com 3,25 % de Si. As ligas Fe-Si, com silício até esse teor apresentam a anisotropia magnética ferro puro, de modo que, com seqüências de encruamentos críticos por laminação e recristalização controlada, a maioria dos grãos fica com um plano (110) no plano de laminação e com uma direção [100] na direção de laminação.

A curva de magnetização do Hipersil aproxima-se bastante da de um anel quadrado, cortado de um cristal único de Fe-Si (3,9 % Si), com um lado paralelo à direção [100].

A tabela seguinte enumera alguns tipos de ligas Fe-Si, fabricados na forma de chapas.

| Tipo | Si (%) | Resistividade ($\mu\Omega$ -cm) | Perda do núcleo (W/kg) 60 ciclos B=10.000 gauss Espessura : 0,35 mm | Emprego |
|--------------------|--------|-------------------------------------|---|---------|
| «Campo» | 0,25 | 15 | — | (1) |
| «Armadura» | 0,5 | 17 | 2,86 | (2) |
| «Eletrico» | 1,0 | 27 | 2,57 | (3) |
| «Motor» | 2,5 | 40 | 2,22 | (4) |
| «Dinamo» | 3,0 | 50 | 1,80 | (5) |
| «Hipersil» | 3,25 | 50 | 0,66 | (6) |
| «Transformador 72» | 3,8 | 57 | 1,58 | (7) |
| «Transformador 68» | 4,0 | 58 | 1,43 | (7) |
| «Transformador 58» | 4,2 | 59 | 1,28 | (7) |
| «Transformador 52» | 4,5 | 60 | 1,14 | (7) |

- 1) Motores fracionários de baixo custo para uso intermitente.
- 2) Motores fracionários e peças polares e outros circuitos magnéticos de alta permeabilidade.
- 3) Motores e geradores de melhor qualidade. Transformadores pequenos para uso intermitente, relays e reatores.
- 4) Motores e geradores de eficiência média. Transformadores pequenos e reatores.
- 5) Motores e geradores de alta eficiência e tamanho médio. Transformadores de uso intermitente, reatores, medidores elétricos, peças polares laminadas.
- 6) Transformadores de alta eficiência para redes de distribuição.
- 7) Todos os tipos de transformadores para redes de distribuição e máquinas elétricas de alta eficiência.

Ligas ferro-níquel

Este é o segundo grupo importante de ligas de alta permeabilidade, a base de ferro.

A fig. 75 mostra a variação da intensidade de saturação nas ligas Fe-Ni em função da composição. Acima de 50% de níquel temos materiais com propriedades magnéticas diversas embora mantenham alta permeabilidade e baixa perda. Estes materiais são indicados para instrumentos que operam com uma baixa densidade de fluxo.

As ligas comerciais Hipernik e Permalloy cobrem as faixas de composição em torno de 50 e 78 % de níquel, respectivamente.

Os Hiperniks possuem uma intensidade de saturação da ordem de 16.000 gauss e os Permalloys da ordem de 11.000 gauss.

Acima de 33 % de níquel a resistividade dessas ligas diminui continuamente de 85 para 16 $\mu\text{ohm-cm}$. Esse fato associado à sensibilidade das propriedades magnéticas dessas ligas aos tratamentos térmicos, devido às reações ordem-desordem correspondentes à composição FeNi_3 (78 % Ni), possibilitam obter propriedades magnéticas interessantes, como o ciclo de histerese retangular da fig. 76, que resulta de um resfriamento em campo magnético, através do ponto Curie.

Em composições em torno de 81 % de níquel acredita-se que ocorra uma quantidade crítica de reação ordem-desordem, que anula a magnetoestricção (fig. 72) e a anisotropia magnética, dando materiais policristalinos de alta permeabilidade.

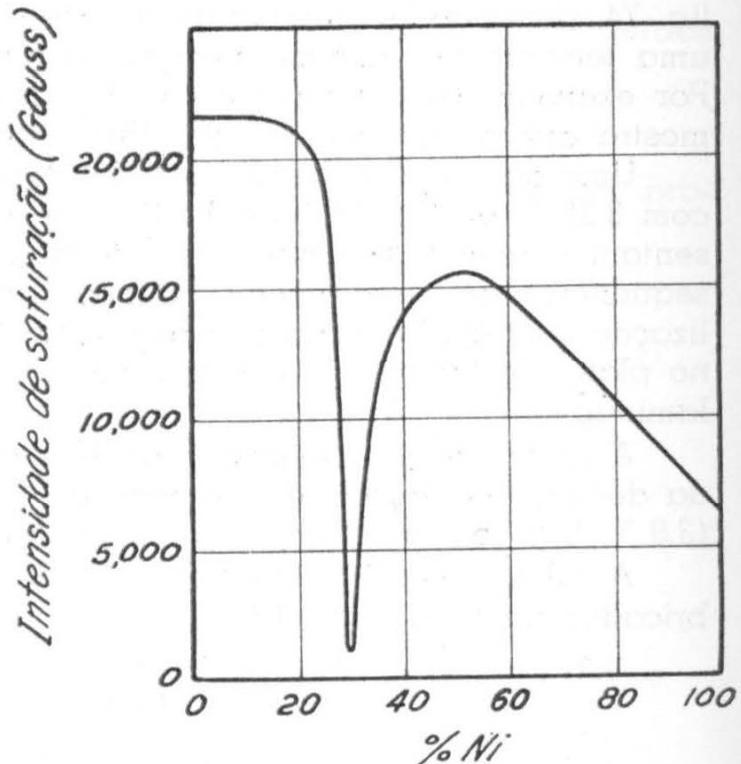


FIG. 75 — Variação da intensidade de saturação no sistema Fe-Ni, na temperatura ambiente. (Stanley)

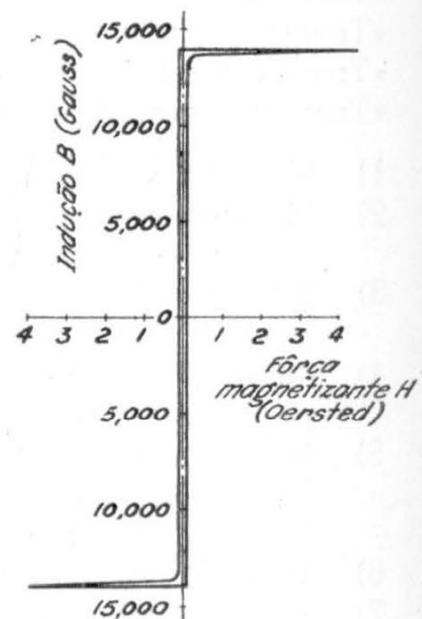


FIG. 76 — Ciclo de histerese do Permalloy (65 % Ni), recozido num campo magnético. (Bozorth)

As adições de cromo, molibdênio e cobre diminuem as velocidades críticas exigidas nessa transformação o que favorece a utilização prática dessas ligas. O carbono, o oxigênio e o enxôfre têm efeito contrário.

Outra particularidade importante deste sistema é que quase tôdas as ligas são bastante ducteis, não existindo portanto problemas na estampagem, ou corte, desses materiais.

Dentre as ligas Fe-Ni importantes temos as seguintes:

- 1) Permalloy 45 Fe=54% Ni=45%
- 2) Hipernik Fe=50% Ni=50%
- 3) Permalloy 78 Fe=21% Ni=78%
- 4) Permalloy 4-79 Fe=16% Ni=79% Mo=4%
- 5) Mumetal Fe=18% Ni=75% Cr=2% Cu=5%
- 6) Supermalloy Fe=15% Ni=79% Mo=5%

Suas propriedades são as seguintes:

| Liga | Permeabilidade | | Saturação | Resistividade |
|------|----------------|---------|-------------|-------------------------|
| | Inicial | Máxima | $4 \pi I_s$ | $\mu\Omega\text{---cm}$ |
| 1 | 2.500 | 25.000 | 16.000 | 50 |
| 2 | 4.000 | 80.000 | 16.000 | 35 |
| 3 | 8.000 | 100.000 | 10.000 | 16 |
| 4 | 20.000 | 80.000 | 8.700 | 57 |
| 5 | 20.000 | 110.000 | 7.200 | 60 |
| 6 | 100.000 | 800.000 | 8.000 | 60 |

Ligas ferro-cobalto

O sistema Fe-Co é o que apresenta maior intensidade de saturação, com valores de $4 \pi I_s$ da ordem de 24.200 gauss. Esse valor de B-H para o ferro é de 21.600, para a liga Fe-Si (1%) é de 21.000 e para o Fe-Si (4-5%) de 19.000.

Essa característica associada aos valores da indução B, na faixa de H=10 a 400 oersteds, possibilita reduções da ordem de 20% no pêso das máquinas elétricas.

Essa propriedade se manifesta em torno de 40% de cobalto, o que restringe a aplicação dessas ligas devido ao elevado custo desse metal.

Existem dois tipos comerciais :

Hiperco com 35 % de cobalto.

Permendur com 50 % de cobalto.

A figura 79 mostra as curvas de magnetização dessas ligas.

Materiais com permeabilidade constante

Os equipamentos telefônicos e radiofônicos exigem materiais com permeabilidade constante para evitar distorções na forma das ondas.

Para isso empregam-se materiais cuja permeabilidade não varia com o campo magnetizante, se este fôr mantido dentro de certos limites.

Essa propriedade pode ser conseguida a custa de tratamentos térmicos, deformações plásticas, densidade de fases não magnéticas, ou entreferros, em certas composições químicas. A aplicação de temperaturas elevadas de recozimento, esforços de tração, ou resfriamentos em campos magnéticos destrói essa permeabilidade constante.

E' ainda no sistema Fe-Ni que encontramos a maioria dos materiais com essa característica. Por exemplo, as ligas Conpernick, com 40-60 % de Ni, dão permeabilidade constante em densidades de fluxo até de 100 gauss, quando encruadas e recozidas entre 500 e 800° C.

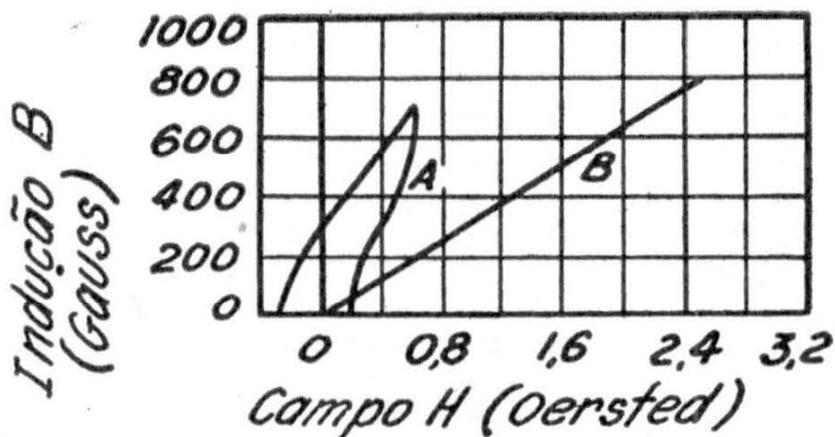


FIG. 77 — Ciclos de histerese do Perminvar (30% Fe, 45% Ni e 25% Co), temperado ao ar (A) e recozido (B). (Bozorth)

O Perminvar (fig. 77) que é uma liga com 30 % de Fe, 45 % de Ni e 25 % de Co, quando recozida 25 horas a 425°, dá a curva de magnetização representada por (B) na referida figura.

Adicionando-se 3-4 % de alumínio e 10-15 % de cobre às ligas com 40-50 % de Ni e encruando-se até 90 % de redução,

obtem-se o Isoperm (fig. 78). Um recozimento a 1.000° depois de um encruamento prévio tem influência nos resultados obtidos no encruamento final, o que leva a crer que o mecanismo do qual decorre essa permeabilidade constante seja um processo de precipitação, ativada pelo encruamento final.

Ainda na categoria de materiais de permeabilidade constante temos os núcleos de pós de materiais magnéticos aglomerados com materiais isolantes. Obtém-se por esse método materiais com permeabilidade controlada e com alta resistividade, adequados ao emprego em alta frequência. Neste caso pode-se utilizar materiais os mais diversos, pois, o aglomerante não metálico, que constitui a fase contínua do compactado, vai modificar

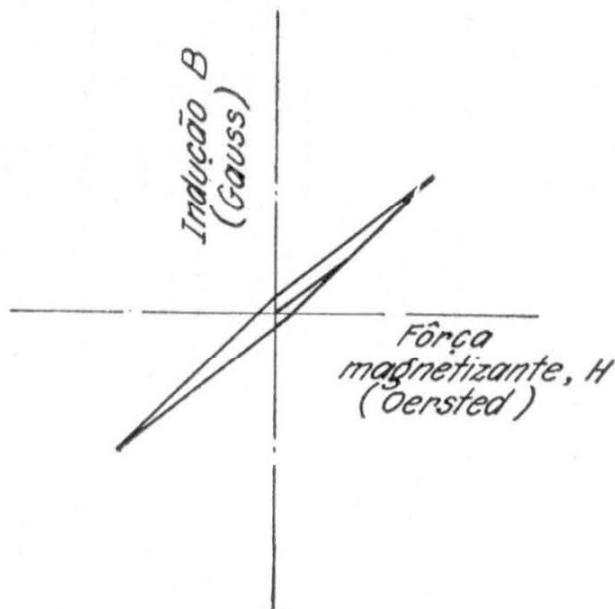


FIG. 78 — Ciclo de histese do Isoperm.

a curva de magnetização, como mostra a fig. 70. Permeabilidades de 20 a 80 podem ser obtidos em núcleos para aparelhos telefônicos e de 5 a 20 para rádio frequência, com variação com o campo magnetizante inferior a 10 %.

Materiais para ímãs permanentes

Este grupo é constituído pelos materiais magneticamente duros, isto é, com alta remanência e alta força coerciva. Embora a maioria destes materiais sejam mecanicamente duros não há necessariamente uma correlação entre a dureza mecânica e a resistência à desmagnetização, pois existem materiais cuja força coerciva aumenta com a diminuição da dureza.

Nos aços, o estado de tensões internas resultantes de deformações elásticas do reticulado favorece as propriedades magnéticas exigidas nos ímãs permanentes. Desse modo, os materiais temperados, ou os que são suscetíveis de endurecerem por precipitação, dão melhores resultados que no estado recozido.

O critério para avaliação de um ímã permanente é o produto $(BH)_{\max}$ obtido de sua curva de desmagnetização. Esse produto é proporcional à máxima energia magnética, no entreferro, por unidade de volume do material.

Nas diversas aplicações desses materiais as condições de eficiência máxima decorrem de projetos que garantam densidades de fluxo correspondentes ao produto $(BH)_{\max}$.

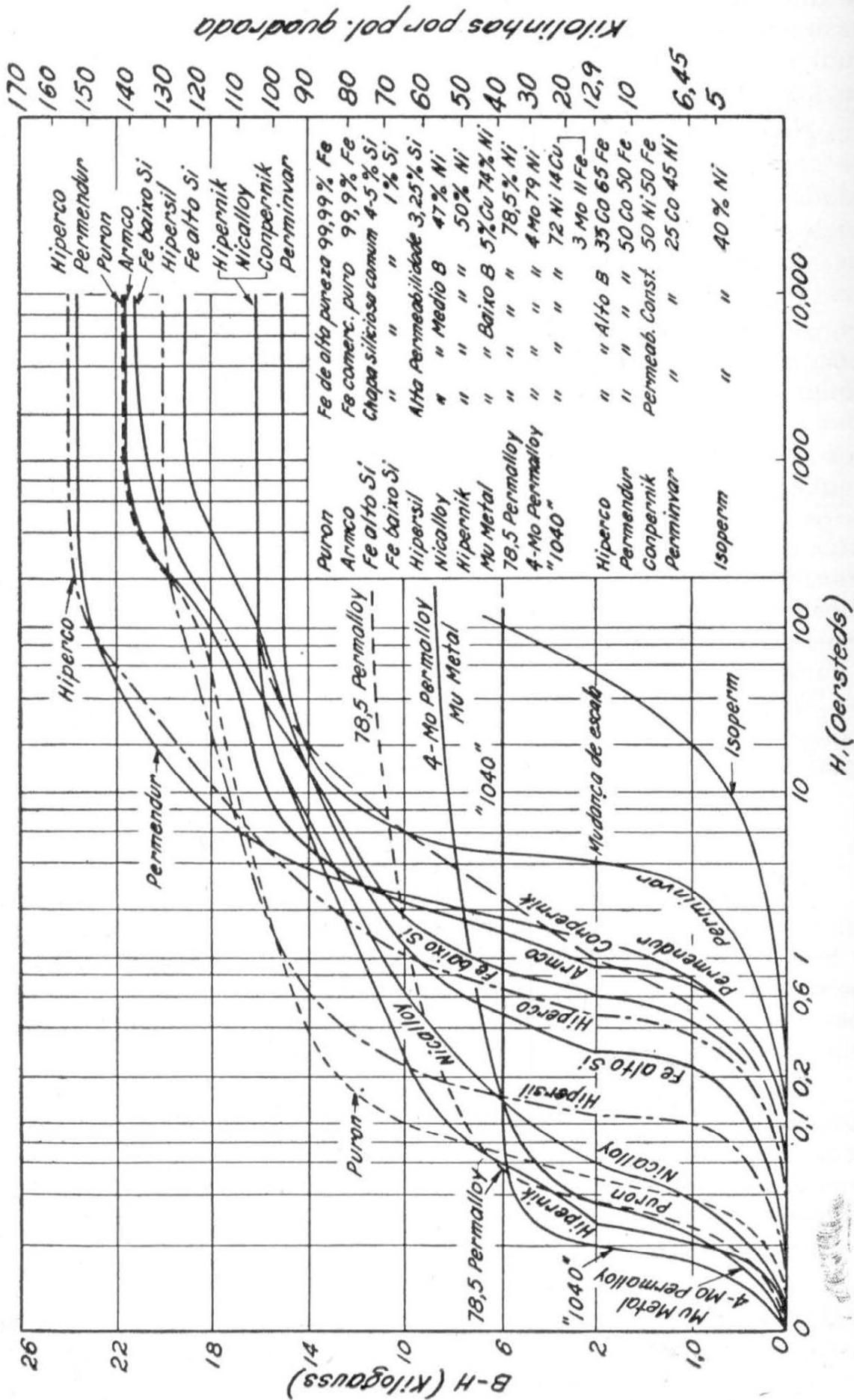


FIG. 79 — Curvas de magnetização de diversos materiais de alta permeabilidade. (ASM — Metals Handbook)

A retenção do estado de magnetização depende dos seguintes fatores: a) Temperatura; b) Vibrações; c) Campos magnéticos externos; d) Produção de novos polos.

A temperatura é uma das causas mais freqüentes da perda de magnetização. Os aços ao cobalto e ao cromo perdem seu magnetismo a 100° e os alnicos a 300° C.

Ímãs de aços martensíticos

Os aços com 1 % de carbono, temperados apresentam como constituinte metalográfico, a martensita, que é uma solução sólida metaestável de carbono em um reticulado tetragonal de ferro, fortemente deformado.

Dentre os aços comuns, os que possuem essa estrutura são os que apresentam melhores propriedades para ímãs permanentes, isto é, um produto $(BH)_{\max}$ mais elevado.

O alívio desse estado de tensões, ou por diminuição do teor de carbono, ou por um revenido, diminui o produto B.H. Por outro lado, a adição de elementos de liga que formem carbonetos estáveis que atuem como centros de deformação do reticulado melhora as propriedades magnéticas.

Temos assim os aços com 5-6 % de tungstenio que dão $(B.H)_{\max} = 0,34 \times 10^6$, portanto superior ao do aço comum com 1,14 % de carbono que somente atinge a $0,18 \times 10^6$.

O cromo pode substituir o tungstenio e um aço com 5 % de cromo e 1 % de carbono, temperado em óleo nos dá $(B.H)_{\max} = 0,28 \times 10^6$.

No grupo dos aços martensíticos os que apresentam melhores características são os aços cobalto. Uma análise típica é 35 % Co, 2 % Cr, 4 % W e 0,9 % C. Esse material temperado de 950° em óleo dá um $(B.H)_{\max} = 1,0 \times 10^6$.

Ligas endurecíveis por precipitação

O estado de tensões internas necessário para que uma matriz de ferro α apresente uma remanência e uma força coerciva alta pode ser provocado pela precipitação de uma fase diferente da matriz. Por exemplo, as ligas binárias Fe-W, com 28 % de W, precipitam a fase Fe_3W_2 , quando solubilizadas a 1.430°, temperadas, forem em seguida envelhecidas a 760°. Obtem-se assim um $(B.H)_{\max} = 1,02 \times 10^6$.

Outras ligas, sem carbono, como mostra a tabela seguinte dão melhores resultados que os aços com elementos de liga.

| Liga | H _c | B _r | (B.H) _{max} |
|----------------------------|----------------|----------------|-----------------------|
| 1) Fe—Mo—Co | 250 | 10.500 | 1,1 × 10 ⁶ |
| 2) Fe—W—Co | 149 | 9.600 | 1,4 × 10 ⁶ |
| 3) Fe—Mo | 219 | 7.000 | 1,5 × 10 ⁶ |
| 4) Fe—Co—Ni—Ti | 920 | 6.350 | 2,0 × 10 ⁶ |
| 1) 17% Mo e 12% Co | | | |
| 2) 27% W e 24% Co | | | |
| 3) 23,4% Mo | | | |
| 4) 30% Co, 16% Ni e 12% Ti | | | |

Tôdas necessitam de tratamentos térmicos.

Ainda no grupo de ligas precipitáveis, temos os Alnicos, descobertos por Mishima e Honda em 1932.

Estas são ligas de ferro contendo alumínio, níquel, cobalto e outros elementos que, depois de solubilizadas, por um tratamento de homogeneização a 1.200°, temperadas e envelhecidas a 650°, precipitam um ou mais componentes. O início dessa precipitação produz severas deformações no reticulado, aumentando apreciavelmente a força coerciva.

Todos os alnicos são duros, frágeis e dificilmente usináveis. São normalmente fundidos na forma definitiva, ou produzidos por metalurgia do pó.

A tabela seguinte apresenta as propriedades magnéticas dessas ligas.

| Liga | Composição % | H _c | B _r | (B.H) _{max} |
|------------|------------------------------|----------------|----------------|------------------------|
| Alnico I | 12Al, 20Ni, 5Co | 440 | 7.280 | 1,4 × 10 ⁶ |
| Alnico II | 10Al, 17Ni, 12,5Co, 6Cu | 564 | 7.280 | 1,65 × 10 ⁶ |
| Alnico III | 12Al, 25Ni | 475 | 6.800 | 1,38 × 10 ⁶ |
| Alnico IV | 12Al, 28Ni, 5Co | 670 | 5.570 | 1,3 × 10 ⁶ |
| Alnico V | 8Al, 14Ni, 24Co, 3Cu | 575 | 12.000 | 4,5 × 10 ⁶ |
| Alnico VI | 8Al, 15Ni, 24Co, 3Cu, 1,25Ti | 750 | 10.000 | 3,5 × 10 ⁶ |
| Alnico VII | 6Al, 18Ni, 35Co, 8Ti | 950 | 5.800 | 1,5 × 10 ⁶ |

As curvas de desmagnetização de algumas dessas ligas e os produtos B.H são apresentados na fig. 80.

Vê-se que suas propriedades são bem superiores às dos materiais até aqui estudadas, o que explica sua popularidade entre os materiais para imãs permanentes.

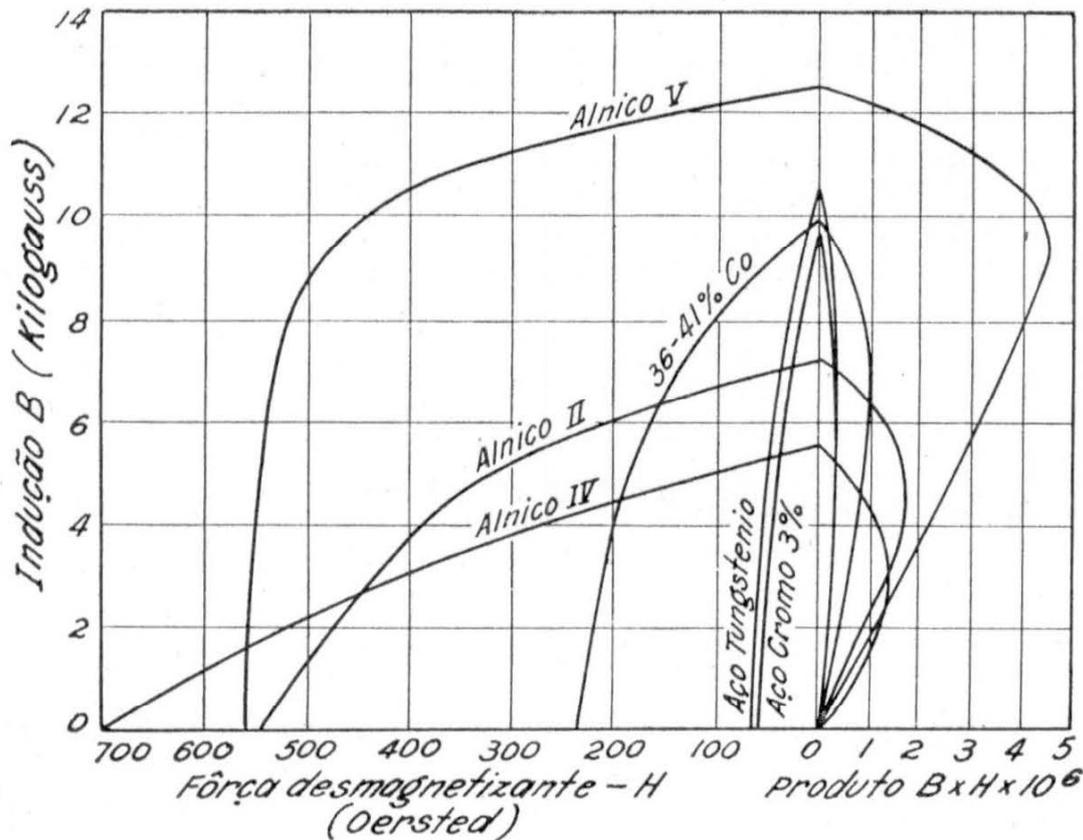


FIG. 80 — Curvas de desmagnetização e produto $B.H$ de diversos materiais para ímãs permanentes. (Stanley)

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- 1 — AMERICAN SOCIETY FOR METALS — Metals Handbook — Ed. 1948 — USA.
- 2 — SAMANS, C.H. — Engineering Metals and Their Alloys — The MacMillan Co., New York, 1949.
- 3 — GILLET, H.W. — The Behavior of Engineering Metals — John Wiley & Sons, Inc. — New York, 1951.
- 4 — BRICK, R.M. and PHILLIPS, A. — Structure and Properties of Alloys — McGraw-Hill Book Co., Inc. — New York, 1949.
- 5 — COLPAERT, H. — Metalografia macrográfica e micrográfica dos produtos siderúrgicos comuns — Boletim n° 40 — Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, Julho de 1951.
- 6 — SISCO, F.T. — Modern Metallurgy for Engineers — Pitman Publishing Corp. New York, 1951.
- 7 — MEHL, R.F. — Metalurgia do Ferro e do Aço — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1944.
- 8 — BAIN, E.C. — Functions of the Alloying Elements in Steel — American Society for Metals — Cleveland, 1943.
- 9 — GROSSMANN, M.A. — Principles of Heat Treatment — American Society for Metals — Cleveland, 1940.
- 10 — BULLENS, D.K. — Steel and its Heat Treatment — Vol. I, II e III John Wiley & Sons Inc. — New York, 1949.

- 11 — AMERICAN SOCIETY FOR METALS — Hardenability of Alloy Steels — Cleveland, 1939.
- 12 — UNITED STATES STEEL CO. — Atlas of Isothermal Transformation Diagrams — Pittsburgh, 1951.
- 13 — AMERICAN FOUNDRYMEN'S ASSOCIATION — Cast Metals Handbook — Ed. 1944 — USA.
- 14 — WOLDMAN, NORMAN E. — Materials Engineering of Metal Products — Reinhold Publishing Corp. New York, 1949.
- 15 — FRENCH, H.J. — Alloy Constructional Steels — American Society for Metals — Cleveland, 1942.
- 16 — CAMP, J.M. and FRANCIS, C.B. — The Making Shaping and Treating of Steel — Carnegie Illinois Steel Corp. — Pittsburgh.
- 17 — DUMOND, T.C. — Engineering Materials Manual-Reinhold Publishing Corp. — New York, 1951.
- 18 — AMERICAN SOCIETY FOR METALS — National Emergency Steels — Cleveland, 1948.
- 19 — GILL, J.P. — Tool Steels — American Society for Metals, Cleveland, 1944.
- 20 — VANADIUM-ALLOYS STEEL CO. — Tool Steels — Catalog n° 48 — Latrobe, 1948.
- 21 — THUM, E.E. — The Book of Stainless Steels — American Society for Metals — Cleveland, 1935.
- 22 — ZAPFFE, C.A. — Stainless Steels — American Society for Metals — Cleveland, 1949.
- 23 — STANLEY, J.K. — Metallurgy and Magnetism — American Society for Metals — Cleveland, 1949.
- 24 — BOZORTH, R.M. — Ferromagnetism — D. van Nostrand Company, Inc. — New York, 1955.
- 25 — UNITED STATES STEEL — USS Electrical Steel Sheets — Engineering Manual N° 3 — 1949.