



*O que motores elétricos, discos rígidos de computador, televisores, carros, fitas de videocassete e cartões de créditos têm em comum? Resposta: materiais magnéticos. Presentes em inúmeros utensílios da vida moderna – o famoso ‘ímã de geladeira’ talvez seja o caso mais emblemático –, esses materiais, por sua importância e complexidade, fazem com que as pesquisas sobre magnetismo sejam intensas na atualidade, com grandes avanços nas últimas duas décadas. Neste artigo, o leitor vai ser atraído para o vasto campo das aplicações dos materiais magnéticos, cujo mercado atual movimentou cifras que chegam a centenas de bilhões de dólares.*

**Marcelo Knobel**

*Instituto de Física Gleb Wataghin,  
Universidade Estadual  
de Campinas (SP)*

# Aplicações do



**Os fenômenos magnéticos** foram, talvez, os primeiros a despertar a curiosidade da humanidade sobre o interior da matéria. Os mais antigos relatos de experiências com a ‘força misteriosa’ da magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), o ímã natural, são atribuídos aos gregos e datam de 800 a.C. A primeira utilização prática do magnetismo foi a bússola, inventada pelos chineses na dinastia Han, em 200 d.C., e baseada na propriedade que uma agulha magnetizada tem de se orientar na direção do campo magnético terrestre. A bússola foi empregada em navegação pelos chineses em 900 d.C., mas só foi descoberta e usada pelo mundo ocidental a partir do século 15.

Os fenômenos magnéticos ganharam uma dimensão muito maior quatro séculos mais tarde, com a descoberta de sua relação com a eletricidade através dos trabalhos do dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851), do francês André Marie Ampère (1775-1836), do inglês Michael Faraday (1791-1867) e do norte-americano Joseph Henry (1797-1878), para citar alguns poucos exemplos. No final do século 19, diversos fenômenos já eram compreendidos e tinham inúmeras aplicações tecnológicas, das quais o motor e o gerador elétrico eram as mais importantes.

Apesar de séculos e séculos de investigações, o magnetismo em nível microscópico só foi compre-



# magnetismo



## Três categorias

Nas aplicações tradicionais, como em motores, geradores e transformadores, os materiais magnéticos são utilizados em três categorias principais: como ímãs permanentes – que têm a propriedade de criar um campo magnético constante – e como materiais magnéticos duros (ou permeáveis), que são magnetizados e desmagnetizados com facilidade e produzem um campo magnético muito maior ao que seria criado apenas por uma corrente enrolada na forma de espira.

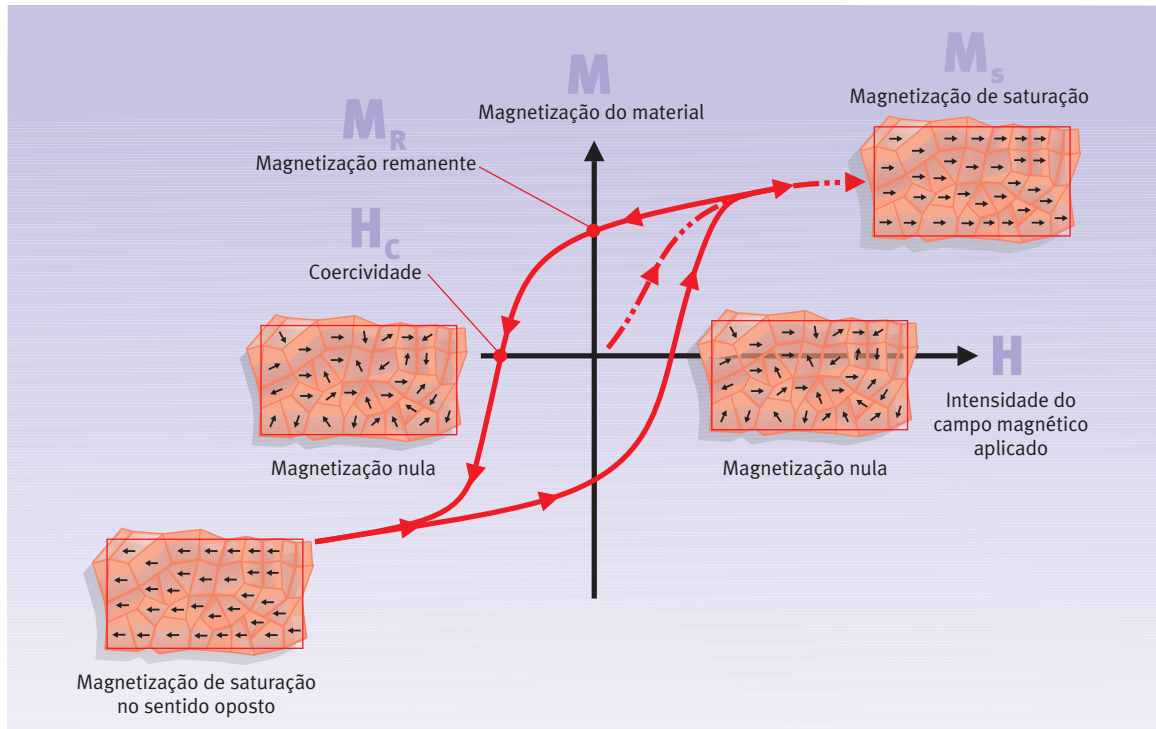
Sobre a terceira grande categoria de aplicação, a chamada gravação magnética, vale a pena se estender um pouco mais, pois ela adquiriu grande importância nas últimas décadas. Essa aplicação é baseada na propriedade que o cabeçote de gravação tem de gerar um campo magnético em resposta a uma corrente elétrica. Com esse campo, é possível alterar o estado de magnetização de um meio magnético próximo, o que possibilita armazenar nele a informação contida no sinal elétrico.

A recuperação (ou a leitura) da informação gravada é realizada pelo processo inverso, denominado indução. Ou seja, a mídia magnetizada e em movimento sobre o cabeçote de leitura induz nele uma corrente elétrica. Hoje, além do fenômeno de indução, também são utilizados novos materiais estruturados artificialmente, formados por multicamadas magnéticas conhecidas como 'válvulas de *spin*'.

endido na primeira metade do século passado, após o advento da física quântica, que nasceu em 1900, com a hipótese do físico alemão Max Planck (1858-1947) dos *quanta* de energia, ou seja, a de que, na natureza, a energia é gerada e absorvida em diminutos pacotes – os *quanta* – e não como um fluxo contínuo, como se imaginava até então. Posteriormente, essa idéia levou ao desenvolvimento da chamada física quântica – teoria para os fenômenos do diminuto universo das entidades atômicas e moleculares – através dos trabalhos do físico alemão Albert Einstein (1879-1955), do dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), do alemão Werner Heisenberg (1901-1976), do britânico Paul Dirac (1902-1984), entre outros.

O século passado testemunhou um avanço impressionante no entendimento do fenômeno do magnetismo, e, conseqüentemente, suas aplicações se multiplicaram e foram substancialmente aprimoradas. Apesar desses avanços, ainda há muitas coisas por compreender.





**Figura 1.** O ciclo de histerese de um material magnético é obtido ao aplicar sobre ele um campo magnético e medir sua resposta (magnetização). O campo inicialmente é nulo e é aumentado gradativamente (linha tracejada), até o material não mudar mais sua magnetização com a aplicação de campo (magnetização de saturação). Depois, ele é reduzido até atingir o valor nulo novamente. Entretanto, após a aplicação do campo, geralmente o valor da magnetização não é o mesmo da magnetização inicial, sendo chamada magnetização remanente ( $M_R$ ) ou simplesmente remanência. O sentido do campo é, então, invertido e vai sendo aumentado mais uma vez. O campo reverso necessário para fazer com que a magnetização retorne ao valor nulo é conhecido como campo coercivo ou coercividade ( $H_C$ ). O campo continua sendo aumentado até, novamente, o material alcançar o valor de saturação no sentido inverso. O campo é posteriormente reduzido e invertido novamente, até fechar o ciclo

A gravação magnética é essencial para o funcionamento de gravadores de som e de vídeo, bem como de inúmeros equipamentos acionados por cartões magnéticos, como os caixas eletrônicos de banco.

## O ciclo de histerese

No século passado, ocorreu uma verdadeira revolução na compreensão das propriedades fundamentais dos materiais magnéticos. Com isso, tornou-se possível a produção de ligas cada vez melhores do ponto de vista das aplicações.

O que determina o enquadramento nas três categorias descritas acima é o ciclo de histerese do material. Esse ciclo é representado pelo gráfico da magnetização  $M$  do material em função do campo magnético externo aplicado  $H$  (figura 1). Em outras palavras, o ciclo de histerese mostra o quanto um material se magnetiza sob a influência de um campo magnético e o quanto de magnetização permanece nele depois que esse campo é desligado. Por exemplo, o ferro se magnetiza com um campo externo de baixa intensidade, mantendo uma mag-

netização relativamente baixa depois desse processo. Já as ligas de samário e cobalto (Sm-Co), por exemplo, precisam de campos muito intensos para ser totalmente magnetizadas, mas retêm muita magnetização quando o campo é desligado.

## Um bom ímã

Os ímãs permanentes são dispositivos usados para criar um campo magnético estável em uma dada região do espaço, sendo a mais antiga aplicação dos materiais magnéticos. Eles têm um papel importante na tecnologia moderna, sendo amplamente usados em dispositivos eletromagnéticos (motores, geradores etc.), dispositivos acústicos (alto-falantes, fones, agulhas magnéticas etc.), equipamentos médicos (sistemas de ressonância magnética nuclear, marca-passos etc.), instrumentos científicos, entre outros. Como exemplo, a figura 2 mostra a quantidade de ímãs que são utilizados em um carro moderno.

Como os ímãs são usados essencialmente para armazenar energia, seu mérito é definido como a



máxima energia magnética armazenada por unidade de volume. Essa grandeza – denominada produto energético máximo ( $BH_{max}$ ) – corresponde à área do maior retângulo que pode ser inscrito no segundo quadrante (superior, à esquerda) do ciclo de histerese, mostrado na figura 1.

Geralmente, um bom ímã é aquele que retém uma magnetização elevada depois que foi submetido a um campo magnético externo – preferencialmente, de baixa intensidade. Os físicos denominam coercividade o valor do campo magnético externo necessário para desmagnetizar um ímã. Assim, quanto maior a coercividade, melhor será o ímã permanente, pois isso indica que ele se desmagnetizará com mais dificuldade. Já a chamada magnetização remanente – ou, simplesmente, remanência – indica o quanto um material retém de magnetização, depois de ser submetido a um campo magnético externo.

Portanto, quanto mais largo e mais alto for o ciclo de histerese, melhor será o ímã permanente, pois ele terá coercividade e magnetização remanente elevadas. Alguns materiais, mesmo quando o campo magnético aplicado sobre eles é praticamente nulo, permanecem com magnetização elevada, gerando um campo magnético apreciável em torno deles. Esse é o caso dos ímãs convencionais que conhecemos – um dos exemplos são os chamados ‘ímãs de geladeira’, atualmente muito empregados no campo da publicidade.

## A descoberta recente

As ligas denominadas alnico foram descobertas em 1930 e são constituídas de ferro (Fe), níquel (Ni) e cobalto (Co) e dotadas de pequenas quantidades de alumínio (Al), cobre (Cu) e titânio (Ti) – a palavra alnico vem da aglutinação das siglas dos elementos químicos alumínio, níquel e cobalto. Essas ligas permitiram a fabricação de ímãs com produto energético de até 43 mil joules por metro cúbico de liga ( $BH_{max} = 43 \text{ kJ/m}^3$ ).

Outro material muito importante dessa classe é a liga de samário e cobalto (Sm-Co), que foi descoberta no início da década de 1960 e que possibilitou o surgimento, na década seguinte, de ímãs comercialmente disponíveis com produto energético em torno de  $150 \text{ kJ/m}^3$ . Como conseqüência do enorme progresso da tecnologia de materiais magnéticos, tivemos a descoberta recente, em 1983, de novos ímãs de neodímio, ferro e boro (Nd-Fe-B), cujo produto energético é de  $300 \text{ kJ/m}^3$ .

Com essa crescente evolução, centenas de aplicações tecnológicas – em especial, motores e alto-falantes – tiveram – e ainda têm – drástica redução de peso e tamanho, bem como grande aumento na eficiência. O mercado mundial de materiais magnéticos duros (ou permanentes) é da ordem de US\$ 1 bilhão ao ano, mas o mercado dos bens que deles dependem é dezenas de vezes mais elevado. ▶

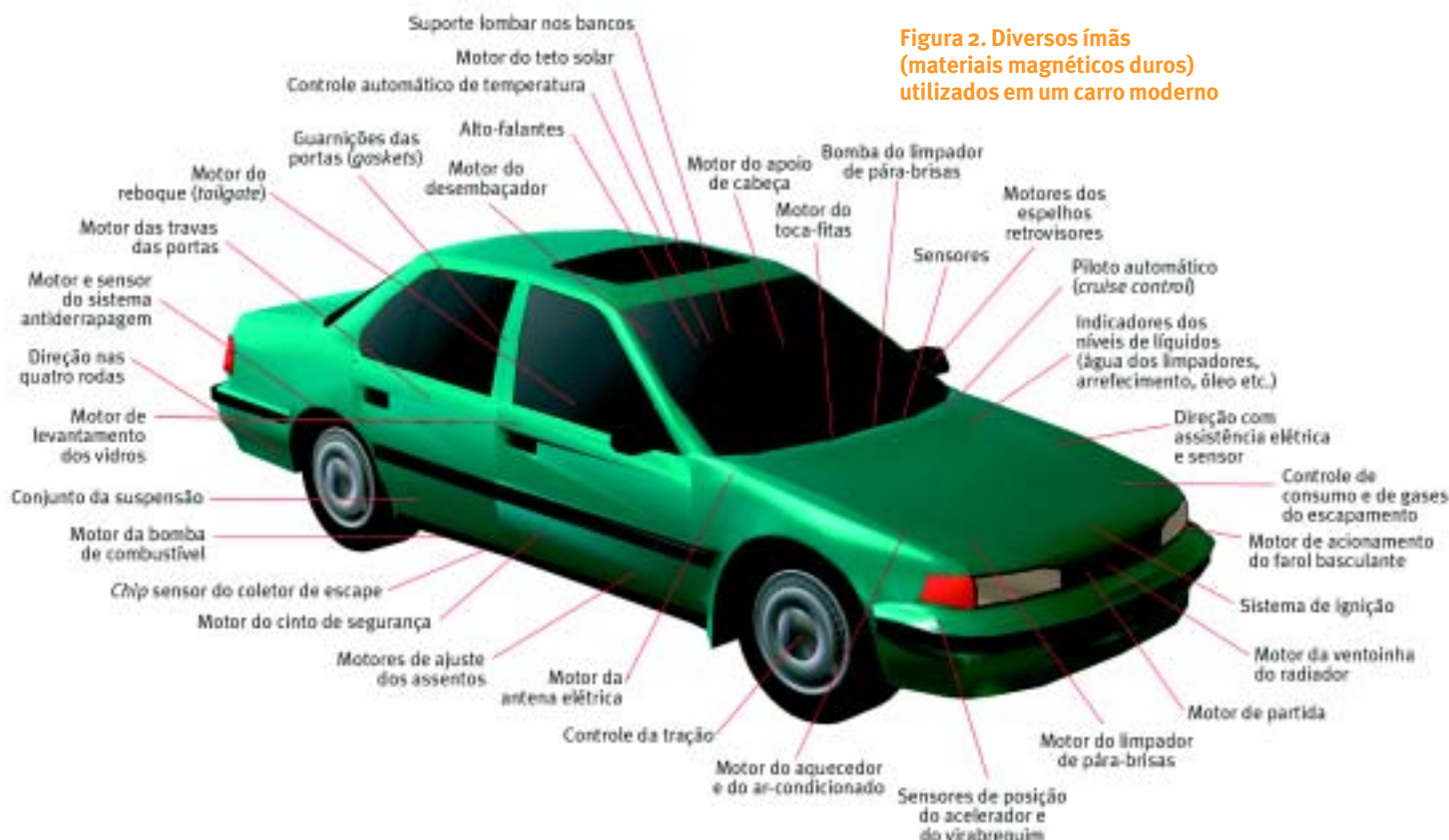
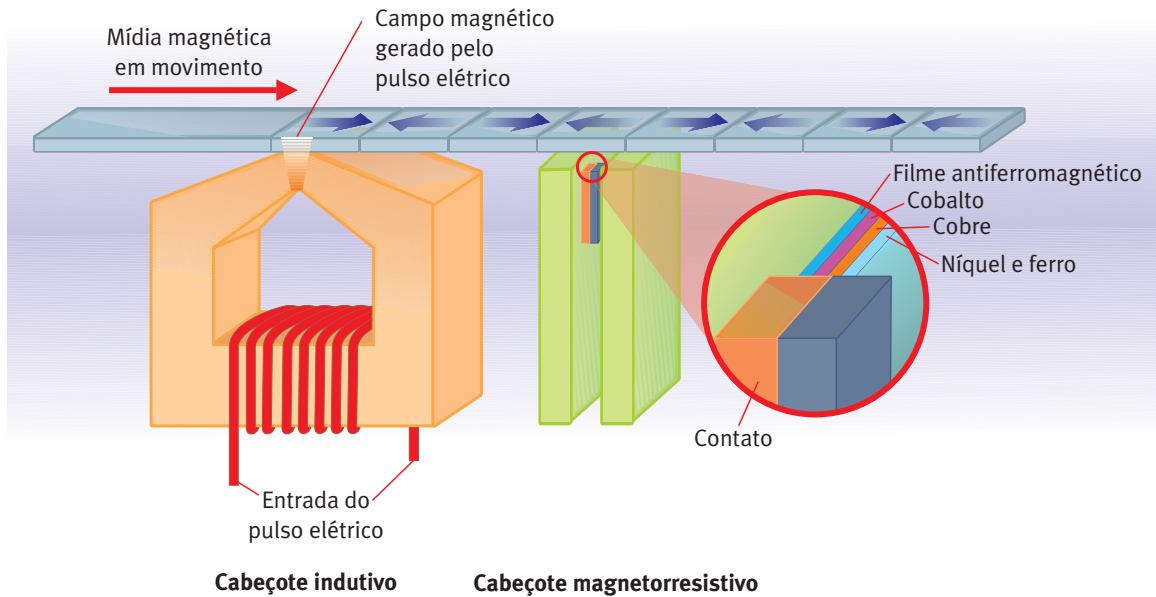


Figura 2. Diversos ímãs (materiais magnéticos duros) utilizados em um carro moderno

ADAPTADO DE DRIVING FORCE: THE NATURAL MAGIC OF MAGNETS, DE JAMES D. LIVINGSTON, HARVARD UNIVERSITY PRESS (BOSTON, EUA, 1997)



**Figura 3.** Ilustração de um processo de gravação e leitura magnética, utilizando, comparativamente, um cabeçote indutivo convencional (à esquerda) e um cabeçote magnetorresistivo com tecnologia moderna. Para gravar uma informação, ambos os sistemas contêm um cabeçote indutivo, onde um pulso elétrico, contendo a informação a ser gravada, é transformado em campo magnético, que, por sua vez, altera a magnetização da mídia. No caso convencional, a leitura é feita pelo mesmo cabeçote, transformando em sinais elétricos os campos magnéticos variáveis que são detectados. Já nos sistemas mais modernos, existe o segundo cabeçote, baseado no princípio da magnetorresistência, que é muito mais sensível para detectar uma região magnetizada – ou seja, a informação gravada –, pois esta causa nele uma alteração de sua resistência elétrica. O processo pelo qual funciona o cabeçote magnetorresistivo permite que esse dispositivo seja miniaturizado, mantendo uma ótima sensibilidade, o que leva à leitura de áreas cada vez menores da mídia e, conseqüentemente, um aumento considerável na densidade superficial de *bits* que podem ser gravados por unidade de área

## Doces, suaves ou moles

Por outro lado, um ciclo de histerese muito estreito indica um bom material magnético doce – também chamado permeável, suave ou mole. Esses materiais são caracterizados por uma baixa coercividade – ou seja, se desmagnetizam com facilidade – e alta permeabilidade magnética – isto é, retêm uma magnetização elevada a partir de um campo aplicado de baixa intensidade. Bons exemplos de materiais magnéticos doces – além de ligas clássicas como permalloy e mumetal – são as ligas ferromagnéticas amorfas (materiais sem estrutura definida, como o vidro, por exemplo, só que metálicos). Essas ligas, também descobertas na década de 1960, podem ser produzidas na forma de fitas, fios, filmes e, mais recentemente, até como estruturas maciças.

Podem-se separar os materiais magnéticos amorfos em duas categorias: ligas à base de ferro e ligas à base de cobalto. As primeiras podem reter uma maior magnetização quando submetidas a um campo magnético externo, mas perdem essa magnetização a temperaturas mais baixas que as ligas de

cobalto. Assim, cada categoria de liga encontra um nicho de aplicação específico. É interessante notar, entretanto, que, formando ligas à base de ferro e cobalto, é possível encontrar composições com ótimas propriedades, quando se adicionam em torno de 5% de cobalto e 70% de ferro, bem como silício e boro. Com isso, obtêm-se os melhores magnetos doces – ou seja, aqueles que respondem muito fortemente à aplicação de campo magnético, mantendo uma coercividade muito baixa, em torno de 10 vezes menor que o campo magnético terrestre.

Materiais magnéticos doces, incluindo os amorfos, são utilizados em motores, geradores e transformadores, economizando bilhões de dólares todos os anos, pois ajudam a diminuir perdas energéticas na produção e distribuição de eletricidade. É também crescente o uso desses materiais como sensores magnéticos, que têm um mercado estimado em torno de US\$ 1 bilhão ao ano. Assim, como no caso dos ímãs permanentes, esse mercado é multiplicado por um fator elevado, se considerarmos os diferentes dispositivos que dependem desses materiais e também a economia de energia decorrente de seu uso em aplicações práticas.

## Onde a nanotecnologia é realidade

Finalmente, há uma terceira classe, a dos materiais magnéticos usados em gravação magnética, que têm ciclos de histerese intermediários, suficientemente largos para serem estáveis em uma dada temperatura, mas nem tão estáveis para que não seja possível magnetizá-los novamente pelo cabeçote de gravação. O mercado mundial em gravação magnética é estimado em torno de US\$ 100 bilhões por ano e vem se expandindo a uma taxa próxima a 17% ao ano.

Nessa classe, estão as fitas de gravação de vídeo, de cassete, bem como disquetes e discos rígidos de computador. Esses meios são basicamente formados por um suporte físico (plástico ou alumínio) e por um filme magnético, sendo que para estes usam-se, geralmente, óxidos de ferro, platina e cromo. Para incrementar a coercividade, é adicionado cobalto.

Grandes volumes de informação são armazenados nessa mídia magnética na forma de *bits* binários de informação. Essa informação armazena-se em pequenas regiões magnéticas, que permanecem magnetizadas em um sentido – representando o zero – ou em outro – representando o um. Dizemos, então, que o vetor momento magnético – pode-se imaginá-lo como uma diminuta agulha de bússola – de cada região aponta em um sentido ou em outro no plano do filme. O sentido desse vetor mede-se com um cabeçote de leitura ultra-sensível, cuja tecnologia também tem evoluído muito nos últimos anos.

Com o contínuo avanço da tecnologia e a crescente demanda do mercado, as indústrias buscam, cada vez mais, miniaturizar os equipamentos e aumentar a densidade de informação de um disco rígido, isto é, aumentar a quantidade de informação armazenada por unidade de área. Atinge-se esse objetivo ao diminuir o tamanho efetivo dos *bits*, ou seja, diminuindo a área que se mantém magnetizada em um dado sentido, indicando 0 ou 1. E a indústria de gravação magnética tem feito isso há 40 anos, nos quais conseguiram-se avanços significativos.

Na década de 1960, a densidade de gravação já atingia a ordem de alguns mil *bits* por  $\text{cm}^2$  (*kbits/cm}^2*). Em 2003, alguns discos disponíveis no mercado já apresentavam densidades de 5 bilhões de *bits* por  $\text{cm}^2$  (*Gbits/cm}^2*), um aumento total de aproximada-

mente 9 milhões de vezes. Nos últimos anos, o setor empresarial nessa área tem conseguido o feito impressionante de dobrar a capacidade dos discos rígidos a cada nove ou 10 meses. E esse feito decorre de uma melhoria de todo o sistema de gravação e leitura, incluindo a parte mecânica, a parte eletrônica e a parte de leitura e gravação.

Conforme exemplificada na situação da gravação magnética, a sofisticação no desenvolvimento de materiais magnéticos é tanta que já podem ser controladas estruturas em escala nanoscópica (milionésima parte do milímetro). Nessa área, a nanociência já é uma realidade, e a tecnologia está rapidamente atingindo as dimensões nanométricas.

As propriedades físicas dos materiais mudam quando as dimensões típicas das estruturas envolvidas são da ordem dos nanômetros. É assim que novas propriedades, com importantes aplicações tecnológicas, aparecem nesses materiais nanoestruturados.

## Gigante da resistência

O princípio da gravação e leitura magnética é relativamente simples. Na gravação magnética convencional, um cabeçote magnético indutivo é usado para ‘escrever’ a informação em um meio de gravação magnética (fita ou disco). Esse meio se move com relação ao cabeçote, e assim os *bits* (regiões magnetizadas em sentidos opostos) são gravados ao aplicar pulsos de correntes positivas ou negativas à bobina que faz parte do cabeçote – para nossos propósitos aqui, podemos imaginar a bobina como um fio metálico enrolado.

O mesmo cabeçote pode ser utilizado para ler a informação, pois o movimento das regiões magnetizadas da mídia sobre ele induz pequeníssimas correntes na bobina sensora. Essas correntes são detectadas após uma cuidadosa amplificação e processamento. O sinal obtido está diretamente relacionado com a velocidade relativa do cabeçote e com o tamanho do *bit* (figura 3).

A descoberta de um fenômeno que ficou conhecido como magnetorresistência gigante, em 1988, sacudiu os meios acadêmicos e tecnológicos. Usando estruturas formadas por sanduíches de ferro ‘recheados’ com uma camada de três átomos de cromo, os pesquisadores mediram a resistência elétrica do sistema, para diferentes campos magnéticos aplicados. ▶





## MISSÃO: OTIMIZAR PROPRIEDADES

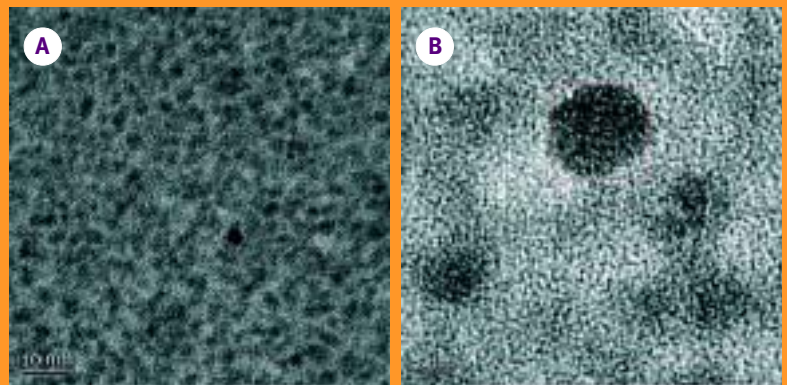
O objetivo dos pesquisadores é conceber novas idéias, processos e modelos que eventualmente tenham aplicações futuras. Dado o número limitado de pesquisadores trabalhando na área no Brasil e o envolvimento incipiente da indústria nacional, torna-se difícil para o país competir no campo das aplicações. A alternativa encontra-

da por alguns pesquisadores – como os do grupo do LMBT, da Unicamp – é trabalhar no estágio imediatamente anterior ao das aplicações. A principal missão do grupo é aperfeiçoar as propriedades dos nanomagnetos, a partir do entendimento de fenômenos observados.

Esse esforço exige o cumprimento de diversas fases. A primeira, obvia-

mente, é a concepção da idéia. Em seguida, surge a etapa da produção dos materiais e, posteriormente, vem a caracterização estrutural dos nanomagnetos. Para isso, são usados recursos como a microscopia eletrônica, a difração de raios X e a luz síncrotron – esta última é a radiação eletromagnética emitida por elétrons energéticos em um acelerador de partículas. Na seqüência, os pesquisadores, geralmente, submetem os materiais a um tratamento térmico

Figura 4. Em (A) e (B) são mostradas as dimensões em nanômetros (nm) de nanopartículas de cobalto. Em (C), estão dois ciclos de histerese obtidos para o sistema  $\text{Co}_{0.3}(\text{SiO}_2)_{0.70}$  em baixa (azul) e alta temperatura (preto). A curva em preto mostra a ausência de coercividade e remanência quando o sistema se encontra no estado superparamagnético. Em (D), uma medida de magnetização em função da temperatura. O comportamento é característico de um sistema superparamagnético. Esses resultados foram obtidos no Laboratório de Materiais e Baixas Temperaturas, da Universidade Estadual de Campinas (SP), e as fotografias no Laboratório de Microscopia Eletrônica, do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, também em Campinas



Quando as camadas de fora, ou seja, as camadas ferromagnéticas (de ferro) do sanduíche estão com alinhamento magnético contrário um ao outro, o dispositivo tem resistência elétrica alta. Entretanto, quando o alinhamento é paralelo – gerado pelo campo magnético externo –, a resistência é menor, da ordem da metade (50%) da configuração anterior. A surpresa residiu no fato de que, até então, uma variação máxima de cerca de 3% era conhecida e, portanto, o fenômeno ganhou o adjetivo ‘gigante’.

Apesar de ser uma descoberta de apenas 16 anos, o fenômeno, hoje, já é utilizado na enorme maioria dos cabeçotes de leitura dos discos rígidos de computadores (figura 3), e toda uma nova área da física, conhecida como eletrônica de *spin* (ou spintrônica), tem se desenvolvido a partir dessa descoberta, que foi realizada no laboratório de Albert Fert, em Orsay (França), e contou com a colaboração de um pesquisador brasileiro, Mário Baibich, atualmente pesquisador do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

De fato, a descoberta da magnetorresistência gigante rapidamente entusiasmou a indústria da

informática, cuja sobrevivência depende de ler campos magnéticos muito pequenos nos discos rígidos. Ter um efeito maior significava poder ler coisas menores e com mais precisão. Assim, após essa descoberta, uma nova tecnologia tem crescido continuamente nestes últimos anos. São os chamados cabeçotes ativos, quase sempre baseados no fenômeno da magnetorresistência.

Um cabeçote magnetorresistivo pode detectar um *bit* de informação ao passar por ele, pois este mudaria sua resistência elétrica pela presença do campo magnético. Além disso, os cabeçotes magnetorresistivos não precisam ter uma geometria complicada e podem ajudar a aumentar a densidade de informação contida nos discos magnéticos atuais, pois são capazes de ler as informações mesmo em maior densidade.

## Como um minúsculo ímã

Entre os sistemas nanoestruturados, encontram-se também os conhecidos por granulares, que são formados por nanopartículas (NPs) magnéticas dispersas em um meio sólido – os chamados sólidos

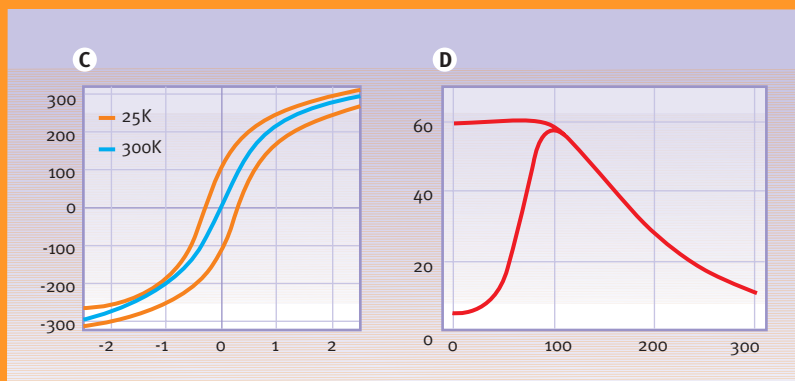
co que tem por finalidade estabilizar ou otimizar suas propriedades físicas (magnéticas e elétricas).

Por fim, investigam-se essas propriedades e a conexão entre elas. Ao realizar todo esse estudo, surgem, naturalmente, comportamentos que não podem ser explicados. As respostas a essas dúvidas exigirão outras teorias e modelos. E assim a ciência avança.

Um exemplo das pesquisas realizadas no LMBT vem a seguir. A

figura 4A mostra uma fotografia obtida em um microscópio eletrônico de transmissão referente à nanoestrutura de um sistema com 30% de cobalto em uma matriz amorfa de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). A fórmula para essa nanoestrutura é  $(\text{Co}_{0,3}(\text{SiO}_2)_{70})$ . É possível obter informações até sobre a cristalinidade da partícula – que tem alguns nanômetros de diâmetro – através de fotografias de alta resolução, como a da figura 4B.

A figura 4C mostra dois ciclos de histerese obtidos para o sistema  $\text{Co}_{0,3}(\text{SiO}_2)_{70}$ , em baixa e alta temperatura, onde também pode ser vista a ausência de coercividade e remanência quando o sistema se encontra no estado superparamagnético (alta temperatura). A figura 4D apresenta uma medida de magnetização em função da temperatura. Note que, após aproximadamente 100 K, ambas as curvas – uma correspondente à amostra submetida a um campo magnético e a outra não – seguem a mesma trajetória. Com base nessas curvas, é possível realizar diversos estudos básicos e inclusive determinar a distribuição de tamanhos de partículas que compõem o sistema investigado, mesmo antes de tirar qualquer fotografia através de microscopia eletrônica.



granulares – ou líquido – os fluidos magnéticos.

Cada um desses grãos nanoscópicos pode ser imaginado como um minúsculo ímã. Dependendo do tamanho da partícula, a direção de sua magnetização pode sofrer rotação pela elevação da temperatura. Dizemos, então, que a partícula se encontra no estado superparamagnético.

Existem vários tipos de sistemas granulares dependendo de sua formação. Por exemplo, os sólidos podem ser formados por partículas de ferro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni) ou ferro-silício (Fe-Si) em uma matriz que pode ser metálica – como prata (Ag) ou cobre (Cu) –, isolante – óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) ou óxido de alumínio ( $\text{AlO}_2$ ) – ou ainda uma liga ferromagnética amorfa. Esses são os tipos de sistemas que estão sendo estudados por um grupo do Laboratório de Materiais e Baixas Temperaturas (LMBT) do Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), no estado de São Paulo (ver ‘Missão: otimizar propriedades’).

É importante estudar o comportamento de sistemas granulares para poder entender melhor seus mecanismos básicos dos processos de magnetização e, assim, tentar otimizar as aplicações em dispositivos.

## Fluidos magnéticos

Arranjos de partículas mais controlados e mais complexos podem ser obtidos em solução, por reação química. Essas NPs podem ser manipuladas posteriormente para formação de arranjos mais complexos. Nesses sistemas, é possível modificar, de modo preciso e independente, as propriedades individuais da fase nanométrica, ao mudar tanto detalhes na síntese química quanto propriedades coletivas ao incorporar as NPs em diferentes meios.

Em particular, para os fluidos magnéticos ou ferrofluidos, existe uma grande variedade de opções de sua produção. Portanto, não é por acaso que esses sistemas têm sido estudados com vários propósitos tanto no campo científico quanto tecnológico. Entre esses estudos, o uso de fluidos magnéticos biocompatíveis como vetores de droga é um exemplo muito interessante – o termo biocompatível pode ser entendido como uma substância que não causa efeitos colaterais significativos no organismo em que é introduzido.

O propósito dessa linha de pesquisa é atuar diretamente sobre as células-alvo – por exemplo, células cancerosas –, retirando-as ou destruindo- ▶







## EFEITO GIROMAGNÉTICO: EINSTEIN COMO FÍSICO EXPERIMENTAL

Geralmente, imaginamos um Einstein queimando neurônios para bolar novas teorias e fórmulas complicadas, ou seja, trabalhando como físico teórico. Mas foi justamente no magnetismo que Einstein realizou suas poucas incursões nos domínios da física experimental. Juntamente com o físico holandês Wander Johannes de Haas (1878-1960), ele publicou, em 1915, a demonstração de um fenômeno denominado efeito giromagnético, conhecido hoje como efeito Einstein-De Haas.

Como o próprio nome indica, o efeito giromagnético consiste na rotação de um fio ferromagnético gerada ao se modificar o campo magnético aplicado sobre ele. Ou seja, ao se aplicar ou se tirar um campo

magnético em um fio perfeitamente alinhado verticalmente, observa-se um movimento de rotação em torno do eixo do fio – em uma descrição um pouco mais técnica, pode-se atribuir esse efeito ao fato de o momento magnético ser diretamente proporcional ao momento angular do fio, que deve se conservar; assim, ao se mudar o momento magnético, muda-se também o momento angular, e o fio inicia um movimento de rotação no sentido contrário, para manter o momento angular constante.

Esse efeito já era previsto na época e vinha sendo perseguido experimentalmente desde meados do século 19. Portanto, a obtenção do fenômeno mostra a habilidade experimental de Einstein e De Haas, que tiveram que realizar um experimento muito cuidadoso para observar o fenômeno, cuja obtenção

é sutil e dificultada por qualquer perturbação.

Vale notar que, através do experimento, conhecendo diversas variáveis, é possível estimar a constante de proporcionalidade entre os momentos magnético e angular e, a partir desse dado, obter um parâmetro importante em magnetismo conhecido como fator  $g$  de Landé – uma homenagem ao físico teuto-americano Alfred Landé (1888-1975), que pesquisou o efeito giromagnético. Einstein e De Haas pensaram que haviam conseguido determinar o fator  $g$  com uma precisão de aproximadamente 10%, mas, na realidade, erraram em mais de 100%. Na época, não se conhecia a noção de *spin* e não havia surgido a teoria quântica do magnetismo. Portanto, qualquer experimento teria que necessariamente discordar da teoria existente.

### SUGESTÕES PARA LEITURA

REZENDE, S.  
'Magnetismo em Terra Brasilis' in *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 22, n. 3, p. 293, 2003.

JILES, D.  
*Magnetism and Magnetic Materials* (Chapman & Hall, Londres, 1991).

NOBEL, M.  
'Os Superpoderes dos Nanomagnetos', in *Ciência Hoje*, abril de 2000.

NOBEL, M. e GOYA, G.  
'Ferramentas Magnéticas na Escala do Átomo' in *Scientific American Brasil*, dezembro e 2004.

as, utilizando, para isso, fluidos magnéticos biocompatíveis. Isso acarretará um grande avanço no tratamento de doenças que utilizam tratamento pelo método convencional, ou seja, espalhando a droga por todo o corpo humano.

## Aplicações promissoras

Além das pesquisas aplicadas em indústrias consolidadas, como a da gravação magnética, há outras sobre magnetismo e materiais magnéticos que mereceriam destaque. Por exemplo, com a conexão de nanopartículas magnéticas a células cancerosas, seria possível aplicar um campo magnético alternado suficientemente forte para movimentar essas partículas e aquecer localmente o tumor, provocando a eliminação do câncer sem os indesejados efeitos colaterais da quimioterapia e radioterapia.

Além disso, o desenvolvimento de novos sensores magnéticos em breve permitirá novas formas de diagnóstico, como a magnetoencefalografia, hoje proibitiva por causa de seu custo. Outra aplicação

útil seria na área ambiental, em que partículas magnéticas poderiam ser utilizadas na eventualidade de um vazamento de óleo, facilitando a coleta, recuperação e limpeza da área afetada.

Milhares de outras aplicações poderiam ser citadas, mas as mencionadas já bastam para dar uma idéia da importância dessa área na tecnologia de nosso dia-a-dia. E é interessante ressaltar que o desenvolvimento tecnológico vem ocorrendo em paralelo com pesquisas básicas, pois o magnetismo é uma área da física da matéria condensada com muitas questões fundamentais ainda por serem respondidas.

Não se sabe ao certo aonde essas pesquisas irão levar, mas sabe-se que, certamente, irão revolucionar o futuro da eletrônica e da informática. Vale a pena destacar que toda essa atividade de pesquisa iniciou-se e teve continuidade com a presença importante de pesquisadores brasileiros, que têm contribuído enormemente para fazer dessa área uma das mais ativas no mundo da tecnologia, apesar das enormes dificuldades de fazer pesquisa de ponta no Brasil. ■