

Nanociência: a próxima grande idéia?

EDISON Z. DA SILVA

“When we get to the very, very small world – say circuits of seven atoms – we have a lot of new things that would happen that represent completely new opportunities for design. Atoms on a small scale behave like nothing on the large scale, for they satisfy the laws of quantum mechanics”

(Richard Feynman, “There’s Plenty of Room at the Bottom”, 1959).

! Ciência

Expectativas

EDISON Z. DA SILVA
é professor do Instituto de
Física Gleb Wataghin da
Unicamp.

Desde a última década do século XX a imprensa mundial tem apresentado muitos temas ligados a um novo tipo de ciência, a nanociência, e junto com ela uma promessa ou até uma esperança, a tecnologia que pode vir como sua consequência: a nanotecnologia. Muitas vezes parece que a nanotecnologia é algo como o santo graal que trará a solução de todos os problemas. A pergunta que muitas pessoas se fazem é: afinal, o que são essas novas ciências? Elas trazem mesmo uma esperança de soluções de problemas que a tecnologia tem hoje?

Se a nanotecnologia vai fazer a grande revolução, só saberemos no futuro, porém, um indicativo dessas expectativas é o grande incentivo que a nanociência e possíveis aplicações têm recebido com grande apoio governamental dos EUA, da Europa e do Japão. O governo americano gastou 422 milhões de dólares em pesquisa nano só em 2001 e esse apoio aumenta a cada ano. Em todo o mundo novos institutos totalmente dedicados à pesquisa são formados. Grandes corporações de alta tecnologia também perceberam o impacto que a nanotecnologia pode ter. Empresas como a HP, NEC, IBM desenvolvem intensos esforços em pesquisa nano.

Se olhamos o desenvolvimento da ciência ao longo dos tempos, vemos que muitas vezes um novo passo científico aconteceu devido a novas tecnologias que, no seu bojo, passaram a permitir

observações e experimentos nunca antes possíveis. A chama da física moderna, que se iniciou no começo do século XX, pôde acontecer porque uma nova tecnologia de vácuo permitiu a produção de tubos dos chamados raios catódicos que levou ao descobrimento do elétron e dos raios X. A partir daí, experimentos sobre o mundo dos elétrons, átomos e da radiação eletromagnética de comprimentos de onda de dimensões atômicas (raios X) permitiram o desenvolvimento da física moderna, que teve um impacto na vida de todos nós, de gerações posteriores. De fato, é difícil hoje vivermos sem produtos que são a consequência direta dos avanços da física moderna, como computadores, telefones celulares e *lasers*.

Com a chamada nanociência não foi diferente: novas técnicas experimentais saídas de laboratórios de pesquisa mudaram a maneira como é possível estudar os constituintes da matéria, átomos e moléculas. Podemos dizer que a nanociência está acontecendo devido basicamente a três técnicas experimentais, a saber, o microscópio eletrônico de transmissão de alta resolução (HRTEM), o microscópio de tunelamento (STM) e o microscópio de força atômica (AFM), e, do ponto de vista teórico, às simulações computacionais. Essas técnicas permitem observar os átomos e, mais importante ainda, algumas permitem manipular a matéria átomo a átomo como um lego. Essa capacidade de manipular a matéria na escala atômica, átomo a átomo, gera uma expectativa antes inexistente, a possibilidade de novos materiais, uma nova eletrônica, novos medicamentos, a solução dos problemas energéticos e talvez novas propostas que ainda nem imaginamos.

O ouro, motivação dos alquimistas e material de grande valor, famoso por sua cor amarelo brilhante, é um bom exemplo das mudanças que ocorrem no mundo nano. Suponhamos que um bloco de ouro de um centímetro de lado seja dividido em oito blocinhos de metade desse tamanho. Os blocos ficaram menores, mas o resultado, o ouro nesses novos blocos, tem as mes-

mas propriedades. Podemos continuar dividindo o bloco dessa forma e os novos blocos ainda serão de ouro. Nosso senso comum nos informa que as propriedades do material não dependem de seu tamanho. Quando chegamos à nanoescala, supondo que temos maneiras de continuar dividindo o bloco de ouro, tudo muda, a cor do ouro, seu ponto de fusão, suas propriedades químicas. A razão para isso é que as interações entre os átomos, que sofrem uma média e desaparecem no ouro volumétrico, aqui têm um papel importante.

Esse processo que descrevemos, de dividir o material mais e mais até atingir a escala nano, é um processo de nanofabricação. Como vamos do grande para o pequeno, esse processo é conhecido como “de cima para baixo” (*top-down*) uma vez que se inicia com uma grande estrutura tornando-a menor. Ao contrário, se iniciamos uma estrutura a partir dos átomos que a constituem para formar a nanoestrutura, o processo chama-se “de baixo para cima” (*bottom-up*).

Essas pequenas estruturas são conhecidas como “pontos quânticos” ou “nanopartículas” por terem formato de um ponto e diâmetros na nanoescala. O interessante é que isso não é novo. As cores dos vitrais das igrejas européias do período medieval e alguns vasos medievais são exemplos do uso de nanopartículas. Por exemplo, nanopartículas de ouro podem apresentar cores laranja, roxo, vermelho ou verde, dependendo do seu tamanho. Podemos dizer que os primeiros nanotecnologistas foram os forjadores de vidro medievais. Nessa época, eles não sabiam por que o ouro produzia essas cores. Hoje nós sabemos. Um belo exemplo do efeito das nanopartículas é a *Taça de Licurgo*, que se encontra no British Museum, em Londres (Figura 1). Essa taça, que data do século IV, parece verde quando vista por luz refletida e vermelha com luz transmitida. Portanto, muda de cor dependendo de como é iluminada. Isso acontece porque nanopartículas de ouro de aproximadamente 70 nm dispersas na matriz do vidro observadas por microscopia eletrônica têm propriedade de

refletir (no verde) e transmitir (no vermelho) a luz em diferentes comprimentos de onda dessas cores. Aplicações interessantes dessas idéias serão discutidas aqui.

Afinal, o que é nano? O prefixo *nano*, “anão” em grego, abreviado por nm, significa um bilionésimo do metro, ou seja, 1nm corresponde a 10 átomos enfileirados. Uma molécula de DNA tem tamanho da ordem de 100 nm, um fio de cabelo tem entre 50.000 e 100.000 nm de diâmetro. A escala nanométrica é a menor escala útil para a ciência de materiais.

O desenvolvimento de novas áreas de pesquisa muitas vezes surge a partir de propostas visionárias que podem até parecer brincadeiras de tão revolucionárias e surpreendentes. A nanociência teve um desses momentos em 1959, quando o grande físico Richard Feynman fez uma palestra no encontro anual da Sociedade Americana de Física (APS) com o título “Há Muito Espaço Lá Embaixo” (“There’s Plenty of Room at the Bottom”) e muitos acharam que ele apresentava apenas uma brincadeira. Nessa palestra Feyn-

man propunha que a ciência do muito pequeno, a escala nanométrica, deveria ser surpreendente e que, se explorada, poderia oferecer novas possibilidades de dispositivos feitos pela manipulação de átomos. O sonho de Feynman demorou um pouco para acontecer.

A nanociência começa, de fato, com a invenção do microscópio de varredura por tunelamento (*scanning tunneling microscope* – STM) por Gerard Binnig e Heinrich Rohrer, em 1981, no laboratório da IBM em Zurique. Esse equipamento é capaz de sondar a superfície de materiais com resolução atômica (Figura 2). O equipamento usa uma ponta em forma de agulha, muito fina, com apenas alguns átomos. O sistema é um circuito elétrico entre a ponta e a superfície que se quer estudar. Quando essa ponta de prova se aproxima de uma superfície, uma corrente de tunelamento de elétrons passa a fluir. Essa corrente cresce exponencialmente com a aproximação da ponta. Varrendo com a ponta a região de interesse, é possível obter informações topográficas da superfície com resolução atômica.

FIGURA 1
Duas divisões da Taça de Licurgo



Sob luz natural



**Por iluminação interna
com luz branca**

FIGURA 2

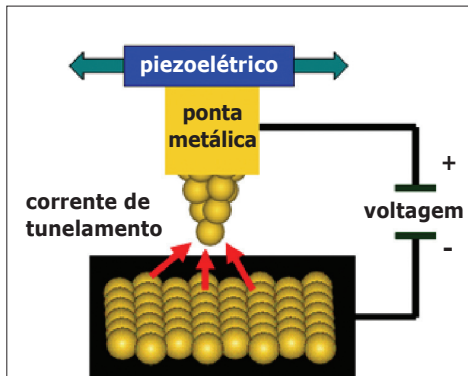


Diagrama esquemático de um STM. À medida que a ponta se aproxima da superfície, mesmo sem energia suficiente para transpor a barreira espaço vazio, uma corrente começa a passar entre a ponta e a superfície por efeito túnel. Esse resultado, impossível na física clássica, foi previsto pela mecânica quântica. A corrente aumenta exponencialmente com a aproximação, e a informação é usada para gerar imagens topográficas da superfície.

Uma técnica derivada dessa é o microscópio de força atômica (*atomic force microscope* – AFM) que, ao invés de corrente, usa a força entre os átomos da ponta e da superfície para fazer a varredura da superfície (Figura 3). Essas duas técnicas, junto com o microscópio eletrônico de alta resolução (*high resolution transmission electron microscope* – HRTEM), que evoluiu muito desde a invenção do primeiro microscópio eletrônico em 1931 por Ernest Ruska, revolucionaram a ciência criando essa nova sigla, a nanociência, que sinaliza uma nova era para pesquisa e desenvolvimento. Uma medida da importância dessas técnicas revolucionárias foi o Prêmio Nobel de Física de 1986 conferido a Gerard Binnig e Heinrich Rohrer –pela invenção do STM – e a Ernest Ruska pela invenção do primeiro TEM.

Bastante significativo e emblemático para a nanotecnologia foi o uso do STM por D. Eigler e E. Schweizer, do Laboratório da IBM, para escrever o logotipo da empresa usando 35 átomos de xenônio sobre uma superfície de níquel (Figura 4).

Nanociência é uma grande área que congrega física, química, biologia, ciências médicas e engenharia de novos materiais. Existe pesquisa intensa em todas essas áreas e a inter-relação entre elas é cada vez maior. A grande mudança denominada nanociência se deve ao uso e desenvolvimento de técnicas da física e da química – que continuam sendo aperfeiçoadas e constituem um desenvolvimento incremental da capacidade de pesquisa – e principalmente

FIGURA 3

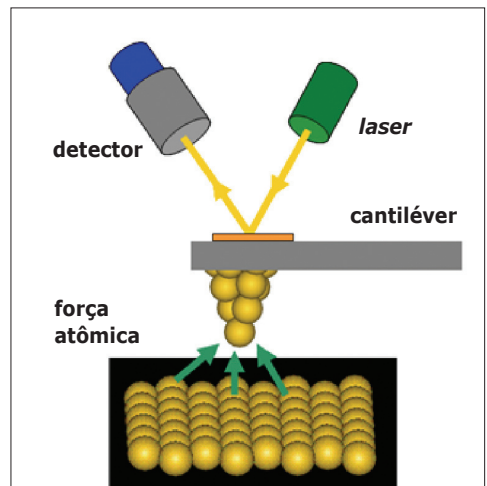


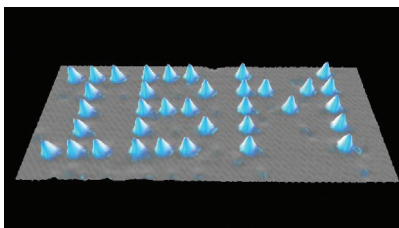
Diagrama esquemático de um AFM. O AFM tem uma ponta fina presa a um braço de material semicondutor. Esse braço, chamado cantiléver, sofre deflexões quando a ponta interage com a superfície. A força, que pode ser controlada eletronicamente e sentida pelo cantiléver, é monitorada por feixes de laser e, a partir da deflexão no detector, a informação é usada para gerar imagens topográficas da superfície.

ao desenvolvimento de novos equipamentos que permitem a pesquisa na escala dos átomos, estes sim causando uma quebra de paradigma, ou seja, a capacidade de manipulação. É importante distinguir a nanociência que se faz agora, um campo em extremo desenvolvimento, da nanotecnologia, que está apenas em sua infância.

Poderíamos dizer que a nanotecnologia é um ramo emergente da engenharia, que usa métodos da nanociência para desenvolver produtos. As novas técnicas experimentais permitem, então, o estudo em uma escala nova e, com isso, a caracterização, identificação e descoberta de novos materiais nanométricos, aglomerados metálicos ou semicondutores, nanofios metálicos ou semicondutores, que agora podem ter seu tamanho controlado.

Novas formas do carbono são alguns dos resultados que se tornaram possíveis devido ao HRTEM para sua caracterização. A grafite, muito conhecida no lápis que usamos para escrita em papel, é um material formado por planos conhecidos como grafenos (Figura 5a), nos quais os átomos de carbono se organizam em estruturas hexagonais similares às colméias. Essas

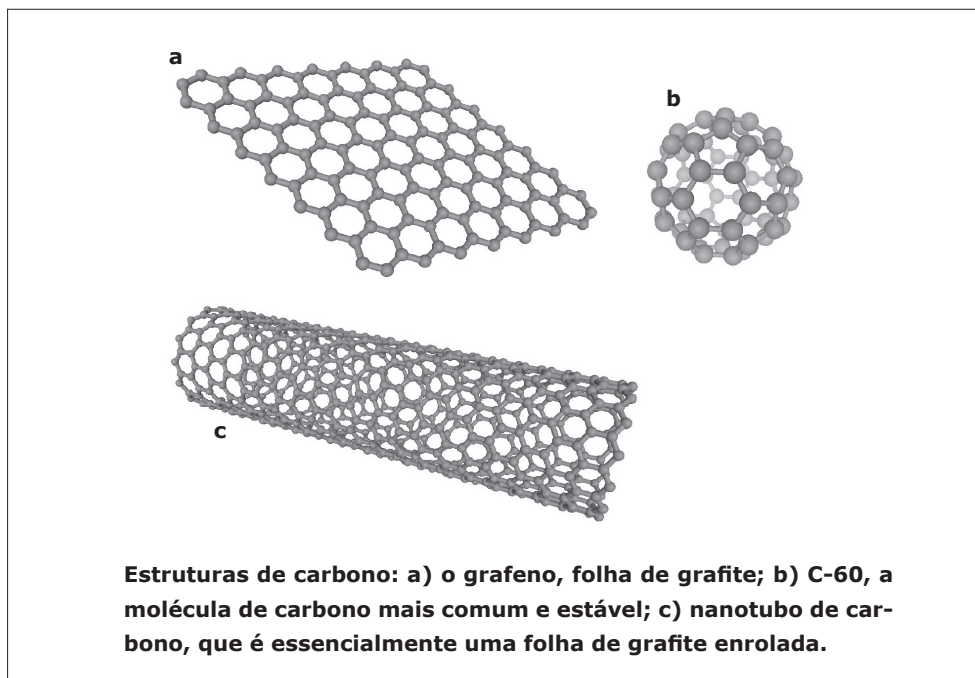
FIGURA 4



Logotipo da IBM desenhado com átomos de xenônio em uma superfície de níquel.

folhas, que ficam empilhadas na grafite, são fracamente ligadas, daí a capacidade de esfoliar a grafite quando escrevemos com um lápis. Em 1985, Smaley e Kroto descobriram que a vaporização por *laser* ou por descarga elétrica produzia moléculas de carbono e a mais abundante era uma estrutura com 60 átomos (Figura 5b). Essas estruturas, chamadas fulerenos, foram a primeira nova forma de carbono importante e desencadearam muita pesquisa. Na tentativa de entender melhor os produtos da vaporização *laser* da grafite, S. Iijima, em 1991, descobriu os nanotubos de carbono, basicamente folhas de grafeno

FIGURA 5



Estruturas de carbono: a) o grafeno, folha de grafite; b) C-60, a molécula de carbono mais comum e estável; c) nanotubo de carbono, que é essencialmente uma folha de grafite enrolada.

enroladas formando um tubo com diâmetros entre 1 e 10 nm e dezenas de microns de comprimento, com extremidades que podem ser abertas ou fechadas (Figura 5c). Essas novas estruturas, os nanotubos, têm propriedades fantásticas. A maneira como a folha de grafite é enrolada para formar o nanotubo confere a ele caráter metálico ou semicondutor. Eles são estruturas flexíveis, porém resistem ao estiramento do tubo melhor que o aço. Existe uma grande expectativa de possíveis aplicações de nanotubos como partes importantes em dispositivos eletrônicos. Nanotubos metálicos têm elevada condutividade ao longo do tubo. Os nanotubos semicondutores foram conectados a eletrodos de ouro mostrando comportamento de transistor. Devido às características dos nanotubos, é possível construir nanotubos metálicos que, depois, tornam-se semicondutores e voltam a ser metálicos conectando tubos de diferentes tipos. Tudo isso leva a grandes possibilidades, uma vez que sejam resolvidas questões de produção dos nanotubos.

Esta é uma área muito intensa de pesquisa básica e várias tentativas de transformação em produtos estão sendo feitas. Os nanotubos têm propriedades interessantes de absorção e emissão de luz e já existem telas similares às LCDs feitas com nanotubos de carbono. Os nanotubos de carbono podem ser usados para armazenar fármacos e outras moléculas com possíveis aplicações em medicina e em armazenamento de energia. Muitas outras aplicações estão em desenvolvimento.

Mais recentemente, em 2004, foi mostrado que o grafeno, o material que se transforma em bolas de carbono ou nanotubos, é estável, e muita pesquisa é feita agora sobre esse material, principalmente com esperança de uso em nanoeletrônica.

A evolução da física de semicondutores levou à produção dos chamados pontos quânticos (*quantum dots*), nanocristais semicondutores nanométricos, por exemplo, ZnS, CdS, GaAs entre outros. Esses materiais, nessa escala de tamanho, têm suas propriedades elétricas e óticas modificadas por efeitos quânticos de tamanho. Portanto,

cor depende de tamanho, como no caso das partículas de ouro discutido anteriormente. Esses materiais têm aplicações em novos tipos de *laser* e diodos emissores de luz (LEDs). Os pontos quânticos já são usados como marcadores biológicos. Pontos quânticos foram usados para fazer a imagem do fluxo do sangue em ratos. Marcadores biológicos já existem no mercado.

O uso de nanocristais apresenta possibilidades interessantes para seu uso em terapias. Nanopartículas de ouro têm picos de absorção, transmissão e reflexão de luz em diferentes comprimentos de onda. Partículas selecionadas em tamanhos que maximizam a absorção de luz de um determinado comprimento de onda, quando colocadas em solução na corrente sanguínea, tendem a se acumular no entorno de tumores cancerígenos, pois nessas regiões o fluxo é muito grande. A exposição por luz *laser* do comprimento de onda de absorção causa um aquecimento de até 10°C matando as células cancerígenas e com quase nenhum efeito no tecido sadio. É possível também cobrir nanopartículas de ouro com pequenas moléculas, principalmente os tióis, que contêm enxofre. Trocando os tióis por outras moléculas, podemos usar as nanopartículas como moléculas funcionais, capazes de realizar tarefas como conduzir fármacos até os pontos onde devem atuar no organismo.

Nanopartículas desenvolvidas recentemente pelas técnicas da nanotecnologia oferecem novas oportunidades para o mercado de tintas, produzindo tintas com melhores propriedades. A Basf, por exemplo, estima que 10% das suas vendas sejam de produtos que incorporam essas novas tecnologias. Seus principais produtos são na área de nanopigmentos. O dióxido de titânio, com sua capacidade de absorção, substitui pigmentos convencionais usados em tintas. As cores são geradas por dispersões de nanopartículas de tamanho uniforme. O uso dessas novas tintas é importante na indústria de revestimentos porque elas não riscam, evitam corrosão e são resistentes a solventes orgânicos.

Outros segmentos muito importantes são a indústria de papel e a de embalagens.

O uso de nanopartículas para melhoria da qualidade do papel já ocorre em processos de produção. A indústria de embalagem usa nanocompósitos, polímeros com inclusões de nanopartículas minerais como a argila. As chamadas nanoargilas melhoram as propriedades dos plásticos, tornando-os mais impermeáveis e bloqueando a passagem, por exemplo, de oxigênio em embalagens de queijos e carnes. Outra área importante é a das garrafas PET dos refrigerantes atuais. O padrão de qualidade desses materiais ainda não atingiu o patamar aceitável para seu uso em garrafas de cerveja, mas há um mercado mundial muito grande para trabalhos que busquem melhorar esse material. A indústria de embalagens procura usar a nanotecnologia para agregar valor ao produto. Pelo uso de microcódigos de barra, produtos podem ser marcados, o que facilita o controle de estoque e previne falsificação. As indústrias de plásticos e polímeros movimentam algo em torno de US\$ 300 milhões/ano só nos Estados Unidos, portanto, melhorias nesses produtos são fatores econômicos importantes. Os nanocompósitos têm utilização também nas indústrias automobilística e aeronáutica, substituindo componentes metálicos por materiais mais resistentes e mais leves.

Produtos que incorporam nanotecnologia já existem no mercado, exemplos são as bolas de tênis da líder mundial Wilson, que usa uma dupla camada em suas bolas, incorporando assim, uma camada micrométrica com inclusão de nanopartículas, o que torna a vida útil da bola maior, pois evita que ela murche por perda do gás interior. Essas bolas são usadas desde 2002 como as bolas oficiais da Copa Davis de Tênis. A empresa Nanoledge produz raquetes de tênis com nanotubos de carbono em sua estrutura, proporcionando um material mais leve e resistente.

A indústria de cosméticos, que também movimenta uma grande parcela da economia, já incorpora nanopartículas em seus produtos. Nanopartículas permitem o controle do grau de penetração dos cremes na pele. A L'Oréal já apresenta vários produtos com essa tecnologia. Nanopartículas

absorvem a radiação UV e são usadas em filtros solares. Idéias similares estão presentes no encapsulamento de fármacos, no sentido de que a entrega desse fármaco aconteça no local do organismo onde deve atuar, assim permitindo que o seu uso seja mais econômico e eficiente.

O sonho de Feynman era que a capacidade de manipulação da matéria átomo a átomo – agora possível devido às novas técnicas experimentais – permitisse se tentar montar circuitos e dispositivos de uma forma impossível anteriormente. Uma aplicação importante dessas idéias ocorre na indústria de componentes eletrônicos dos processadores usados em tecnologia da informação. A indústria de computadores, foco dessa nova maneira de desenvolvimento de componentes, tem uma longa história, anterior ao desenvolvimento do primeiro transistor em 1947. O primeiro computador, chamado Eniac, de 1946, usava válvulas – 18 mil delas! – e ocupava todo um andar de um edifício, pesando trinta toneladas. Previsões dessa época sinalizavam um mercado mundial com algo em torno de seis computadores. Se dependêssemos daquela tecnologia, a previsão talvez se confirmasse, porém, em 1947, W. Brattain, W. Shockley e J. Bardeen, trabalhando nos laboratórios de pesquisa da Bell Telephone, inventaram o transistor, uma das mais importantes descobertas do século XX. Esse trabalho, mais do que tudo, apresentou um novo caminho: a possibilidade de um dispositivo semiconductor para substituir a válvula. O transistor feito de silício começou a ser miniaturizado e o resultado são os computadores que permeiam nossa vida, assim como outros equipamentos do nosso dia-a-dia, telefones celulares, tocadores de MP3, Ipods, etc.

O problema que se apresenta hoje na tecnologia de dispositivos como o transistor é que o mesmo processo que tornou possível o STM e revolucionou a ciência, o tunelamento de elétrons, começa a ter um efeito danoso, inviabilizando o dispositivo à medida que ele se torna cada vez mais pequeno. Previsões indicam que, se a capacidade de miniaturização continuar

umentando linearmente como vem acontecendo há várias décadas, já no início da próxima década os dispositivos serão tão pequenos que elétrons poderão tunelar de um lado ao outro da barreira isolante desses dispositivos. Portanto, a indústria eletrônica, que tem sempre caminhado na direção da miniaturização dos seus componentes (processo de cima para baixo), é um foco muito importante para a nanotecnologia. Espera-se que, através de processos do tipo de baixo para cima, construindo dispositivos a partir dos átomos e moléculas, seja possível criar novos dispositivos que poderão substituir os atuais chips de silício.

O que se procura é um dispositivo tão revolucionário como foi o transistor de 1947. Existe muito esforço nesse sentido, e dispositivos de laboratório usando pequenas moléculas, moléculas de C-60 e também nanotubos de carbono como componentes têm sido testados em nanodispositivos que funcionam em laboratório. Muitos outros sistemas na escala nano estão em estudo e talvez em um futuro próximo tenhamos novos dispositivos baseados nessas idéias. Um grande problema é como produzir esses dispositivos de laboratório em escala industrial e com uma grande densidade de empacotamento para fazer frente à tecnologia atual.

Um exemplo de grande sucesso da nanociência foi a descoberta da magnetorresistência gigante (*giant magneto resistance* – GMR) por Albert Fert, na França, e Peter Gruenberg, na Alemanha, em 1988. Eles descobriram que, se camadas magnéticas de espessura nano fossem separadas por um material não magnético, chamado espaçador, teriam sua resistência à passagem de corrente elétrica muito modificada se as camadas magnéticas tivessem a mesma orientação de suas magnetizações mudadas. Quando as duas camadas têm a mesma orientação, a resistência é pequena; quando as orientações são contrárias, a resistência fica muito grande. Esse efeito foi logo usado pela IBM para produzir discos rígidos, o que permitiu uma maior capacidade de armazenamento desses discos rígidos usados hoje, por exemplo, nos nossos computa-

dores. Esses trabalhos criaram uma nova área da física chamada spintrônica. Essa descoberta levou a um novo produto: os discos rígidos de tecnologia GMR, padrão atual da indústria. Por essa contribuição à ciência e à nanotecnologia, Fert e Gruenberg foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física de 2007.

A nanociência, com sua capacidade de se tornar tecnologia e desenvolver produtos para o mercado consumidor, está cada vez mais gerando novas empresas, muitas vezes desmembramentos de um departamento de ciência (química, física ou das engenharias). Alguns exemplos são: a Plastic Logic, empresa encubada a partir do Cavendish Laboratory da Universidade de Cambridge, que tem propriedade intelectual baseada em impressão por jato de tinta e materiais poliméricos; a Nanospectra Biosciences, empresa encubada da Rice University para desenvolvimento da *nanoshells*, uma nova classe de materiais para uso em ciências da vida; a Nanoscape, que saiu do Departamento de Química da Ludwig-Maximilians University de Munique e do Fritz-Haber Institute, da Sociedade Max Planck, em Berlim. Outras são subsidiárias de empresas importantes como a Nanocor, subsidiária da Amcol International Corporation, que é a maior fornecedora de nanoargilas específicas para nanocompósitos plásticos. Já existem no mercado empresas como a Nano Tex LLC, uma empresa de materiais avançados que desenvolve e licencia uma família de tratamentos que incorporam nanotecnologia para têxteis, melhorando enormemente sua *performance*. A empresa já licencia mais de 40 tecelagens e tem acordos com muitas empresas do ramo, como Levi's, Gap, Old Navy, Lee, Nike, Champion. Quatro tecnologias proprietárias são comercializadas: Nano-Care, Nano-Pel, Nano-Dry e Nano-Touch. A tecnologia Nano-Pel, por exemplo, tem a capacidade de repelir líquidos e sujeira, e permite melhor respiração do tecido.

A nanotecnologia, apresentada aqui com exemplos selecionados, já é uma realidade, com produtos no mercado. Certamente os desenvolvimentos que estão acontecendo

a todo momento vão contribuir mais e mais para a utilização dessas descobertas em novas tecnologias e produtos. De fato poucos segmentos da indústria sobrevivem sem a incorporação da nanotecnologia a seus produtos. Vimos que muitas dessas inovações podem ajudar indústrias tradicionais de papel, embalagem, vestuário, entre outras, introduzindo novas rotas de produção, *performance* e desenvolvimento de novos produtos.

A nanotecnologia tem metas de curto, médio e longo prazos. As de curto prazo são, por exemplo, as que apresentamos como produtos a caminho do mercado e, em alguns casos, já nas prateleiras das lojas.

As metas de médio prazo são, por exemplo, as novas tecnologias de nanoeletrônica dos futuros dispositivos eletrônicos para substituir a tecnologia da microeletrônica atual baseada em silício e aplicações em ciências médicas. Estas ainda estão no estágio de pesquisa básica em nanociência. As metas de longo prazo são as mais difíceis de definir e, aí, poderemos ter surpresas advindas dos desenvolvimentos em nanociência na próxima década.

Nanotecnologia propõe novas formas de fazer as coisas. É uma promessa de fazer mais usando menos material e, ainda, material mais barato e com maior funcionalidade.

BIBLIOGRAFIA

- MOORE, Graham. *Nanotechnology in Packaging*. Pira International, 2004.
- POOLE JR., Charles & OWENS, Frank J. *Introduction to Nanotechnology*. Wiley Interscience Publication, 2003.
- RATNER, Mark & RATNER, Daniel. *Nanotechnology – A Gentle Introduction to the Next Big Idea*. New York, Prentice Hall, 2002.
- TIMP, Gregory (ed.). *Nanotechnology*. API Press, 1999.
- TOMA, Henrique E. *O Mundo Nanométrico: a Dimensão do Novo Século*. São Paulo, Oficina de Textos, 2004.
-