

Grafeno na prateleira

Duas décadas após ser criado, o nanomaterial bidimensional de propriedades singulares é empregado em inovações tecnológicas que começam a ganhar espaço no mercado

FRANCES JONES

O grafeno, agora transformado em produto, está entre nós. Vinte anos depois de ter sido isolado pela primeira vez, o nanomaterial formado por átomos de carbono já pode ser encontrado em artigos à venda no país. Também figura em uma série de inovações tecnológicas em fase avançada de testes. Em um mercado ainda em formação, importadoras ou companhias locais o vendem para ser usado como matéria-prima ou já inserido em soluções desenhadas para produtos diversos, indo de aditivos para tintas e embalagens plásticas a lubrificantes. Principalmente em torno de instituições de ciência e tecnologia, surgem ecossistemas de inovação, fomentando a produção e novas aplicações para o grafeno. Grandes empresas do país nas áreas de petróleo e gás e de mineração testam em campo dispositivos com o cristal bidimensional para usá-los em seu processo produtivo.

Em São Paulo, um dos principais centros de pesquisa e desenvolvimento do material orientado para demandas de mercado é o Instituto Mackenzie de Pesquisas em Grafeno e Nanotecnologias (MackGraphe). A unidade iniciou suas atividades em 2013 no *campus* de São Paulo da Universidade Presbiteriana Mackenzie, com apoio da FAPESP. Um dos idealizadores do MackGraphe, o físico Eunézio Antonio Thoroh de Souza fundou em 2018 uma startup, a DreamTech Nanotechnology, com o objetivo de converter o conhecimento científico do grafeno em tecnologias aplicáveis ao dia a dia. A iniciativa teve a parceria da multinacional chinesa DT Nanotech, responsável pela produção do grafeno comercializado (*ver* Pesquisa FAPESP nos 284 e 291). Com a distribuidora local MCassab, a startup vem introduzindo o uso do grafeno e de outros materiais bidimensionais no mercado brasileiro. Agora, sua intenção é produzir grafeno em território nacional.

“Estamos em processo de implantação de uma fábrica em Araras, no interior de São Paulo, com capacidade para produzir 200 toneladas de grafeno por ano”, informa Thoroh. “As projeções de crescimento de demanda por grafeno justificam a implantação da nossa fábrica local, que terá como sócios executivos da DT Nanotech. Nossa expecta-

tativa é iniciar a fabricação até o final de 2025.” A empresa adotará a tecnologia de produção baseada no método de esfoliação mecânica líquida e irá focar em produtos como tintas anticorrosivas, compósitos, tintas asfálticas, lubrificantes e materiais de construção.

Também em São Paulo, a Gerdau Graphene, uma startup da Gerdau Next, braço de novos negócios da produtora de aço Gerdau, já colocou no mercado sete produtos incorporando o nanomaterial e prevê o lançamento de pelo menos outros três ainda neste ano. No portfólio da empresa, criada em 2021, há aditivos com grafeno para serem usados na produção de filmes poliméricos, matrizes cimentícias, tintas e revestimentos.

“O grafeno é hoje uma realidade comercial”, destaca a química Valdirene Peressinotto, diretora-executiva e de Inovação da Gerdau Graphene. “O nanomaterial confere ganho de propriedades aos materiais em que é incorporado, tornando-os mais resistentes e duráveis”, afirma a pesquisadora. “Nossos aditivos já são fabricados em escala industrial, na casa de toneladas ou milhares de litros. Não se trata mais de algo experimental, restrito a estudos em laboratórios.”

UM NOBEL PARA O GRAFENO

O primeiro estudo teórico sobre as propriedades elétricas do grafeno é de 1947, mas a história do material no campo da física experimental é bem mais recente. Remonta ao início do século, mais precisamente 2004, quando os físicos Andre Geim – um dos sócios da DreamTech Nanotechnology e da DT Nanotech – e Konstantin Novoselov isolaram na Universidade de Manchester, na Inglaterra, uma única folha de átomos de carbono a partir da esfoliação de uma placa de grafite com uma fita adesiva. Também conhecido por grafita, a grafite é um mineral extraído de jazidas.

Os dois pesquisadores depositaram aquela finíssima camada plana de átomos em um substrato que facilitava a visualização em um microscópio óptico, construíram um pequeno dispositivo e fizeram medições elétricas e magnéticas do material bidimensional. Apesar de ter a existência prevista décadas antes, os cientistas de modo geral achavam que tal material não teria estabilidade suficiente para se manter cristalizado em apenas

uma camada. Pelo trabalho, Geim e Novoselov receberam o Nobel de Física em 2010.

Com os átomos organizados em forma de treliça hexagonal, como favos de mel, em um mesmo plano, o grafeno é um material extremamente leve, bastante transparente, flexível e impermeável (*ver infográfico abaixo*). Tem boa condutividade elétrica e térmica e alta resistência mecânica. Suas propriedades eletrônicas e magnéticas peculiares deram origem a novas áreas da física, como a valetrônica, o estudo das alterações do comportamento dos elétrons do grafeno, e a twistrônica, a investigação dos efeitos produzidos pelo ato de girar uma das folhas de um sistema constituído por duas ou mais camadas de grafeno ou de outros materiais com apenas duas dimensões.

O grafeno também abriu o caminho para a física dos sistemas bidimensionais e para o estudo de outros materiais formados por camadas atômicas (*layered materials*), como a grafite. Assim, a descoberta de Geim e Novoselov teve forte impacto na pesquisa fundamental no campo da ciência dos materiais.

MERCADO EM EXPANSÃO

As características singulares do grafeno e dos materiais feitos com ele trouxeram consigo a promessa de ampla aplicação tecnológica em diversos campos da indústria. A consultoria de mercado Fortune Business Insights calcula que o mercado global do material valia US\$ 432,7 milhões no ano passado. Até 2032, a estimativa é de que chegue a US\$ 5,2 bilhões, um crescimento projetado espantoso em menos de 10 anos.

As aplicações do grafeno e seus derivados se multiplicam no mundo. Ele é empregado na fabricação de eletrônicos, materiais compósitos e baterias. O segmento de nanoplaquetas ou nanoplacas de grafeno (NPG), constituídas por várias camadas de grafeno, foi responsável pela maior parcela do mercado em 2023, segundo a Fortune Business Insights. As indústrias eletroeletrônica, aeroespacial, automotiva, de defesa e de energia encabeçam o consumo do nanomaterial, de acordo com o relatório. A região da Ásia-Pacífico respondeu por 34,4% do mercado, a maior do globo.

“O grafeno tem propriedades que fazem com que ele possa ser utilizado em uma vasta gama de aplicações. Do meu centro de pesquisa já saíram seis companhias e ainda temos outras cinco para desovar”, diz o físico teórico brasileiro Antonio Hélio de Castro Neto, diretor do Centro para Materiais Avançados 2D e do Centro de Pesquisa em Grafeno da Universidade Nacional de Singapura (NUS), um dos principais polos globais de pesquisa sobre grafeno. O físico Novoselov, laureado com o Nobel, integra o quadro de pesquisadores da NUS.

Entre as spin-offs geradas na universidade, destacam-se a NanoMolar, especializada no desenvolvimento de sensores médicos, e a UrbaX, com foco no setor de artigos para a construção civil. Mais de 200 patentes associadas ao grafeno e suas aplicações, resultantes de estudos feitos na NUS, já foram registradas, informa Castro Neto, que fez graduação em física na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e há mais de três décadas está fora do Brasil.

A

pesar da demanda crescente em diversas áreas, ainda há desafios a serem superados para que o grafeno se estabeleça de modo mais intenso comercialmente. Um artigo publicado no início do ano por cientistas alemães no periódico *2D Materials* indica que boa parte dos fabricantes permanece em um estágio comercial inicial, tendo que enfrentar o duplo desafio de consolidar sua base de consumidores e de garantir o financiamento para escalar a produção. Também há nichos que crescem sem visibilidade pública em razão dos termos de sigilo impostos pelos clientes, que preferem não dar publicidade aos experimentos com grafeno para não chamar a atenção da concorrência e manter o segredo da fórmula na produção.

“O tamanho relativamente pequeno [do mercado] caminha com a perspectiva de forte evolução nos próximos anos, com taxas de crescimento previstas entre 20% e 50% por ano. [...] O grafeno não consegue converter imediatamente todas as suas promessas iniciais para um sucesso de mercado estrondoso. A difusão dessa nova

Para entender o nanomaterial

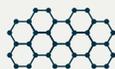
O grafeno é o mais fino e forte material que se conhece

O que é



Uma forma de apresentação (alótropo) do carbono, assim como o diamante e a grafite

Estrutura



Uma ou mais camadas planas de átomos de carbono organizados em uma estrutura cristalina hexagonal, como um favo de mel

Espessura



O grafeno original tem apenas um átomo de espessura. Por isso, é bem fino e bidimensional

Propriedades



- Flexível, leve, transparente
- Elevada resistência mecânica
- Excelente condutor térmico e elétrico
- Resistente a altas temperaturas
- Impermeável a moléculas



Esfoliação de grafite com fita adesiva (à esq.), solução com grafeno manipulada por pesquisador da UFMG (abaixo, à esq.) e recipientes com diferentes tipos de grafite e do nanomaterial



classe de materiais bidimensionais leva tempo”, escreveram os autores do artigo na *2D Materials*. O estudo foi realizado no âmbito da Graphene Flagship, iniciativa europeia que reúne 118 parceiros industriais e acadêmicos.

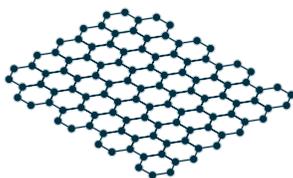
O mercado, não só no Brasil, mas no mundo todo, segundo Peressinotto, está em fase de abertura e de consolidação. A diretora da Gerdau Graphene investiga nanomateriais de carbono, como o grafeno, desde 2004, quando ainda trabalhava como pesquisadora no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), em Belo Horizonte, com um grupo ligado à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

O primeiro caso de sucesso da startup que dirige hoje beneficiou a própria Gerdau. Deu-se após um teste industrial executado com o fornecedor de filmes poliméricos usados para empacotar pregos, vendidos pela siderúrgica gaúcha. “Reduzimos a espessura da embalagem em 25%, aumentamos a resistência ao furo e ao rasgo em 30% e diminuímos as perdas do processo em mais de 40%”, ressalta Peressinotto. Com a incorporação do aditivo na linha de empacotamento dos pregos, a Gerdau pôde economizar cerca de 72 toneladas de plástico ao longo de um ano.

A Gerdau Graphene, que desenvolve seus produtos em parceria com o Centro de Inovação em

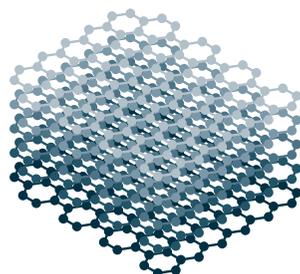
As diversas faces do grafeno

As aplicações do material variam conforme a sua estrutura



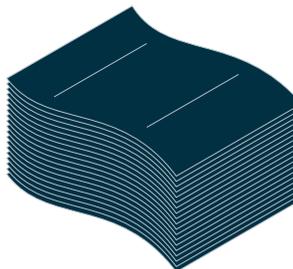
Monocamada

Formado por uma única folha de átomos de carbono, tem propriedades eletrônicas excepcionais. Ideal para dispositivos que exigem alta eficiência e desempenho, como células solares, semicondutores e supercapacitores



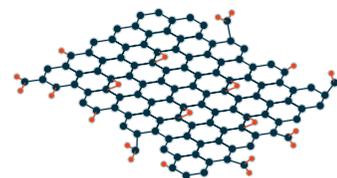
Poucas camadas

Com três a 10 camadas, tem maior flexibilidade em algumas aplicações do que o grafeno monocamada. Usado em dispositivos eletrônicos, sensores e como aditivo para melhorar propriedades mecânicas e elétricas



Nanoplacas

São empregadas em compostos para reforço de materiais, tintas condutoras e aditivos em plásticos, bem como em cimentos e concretos. Aumentam a resistência e a condução elétrica dos materiais



Óxido de grafeno

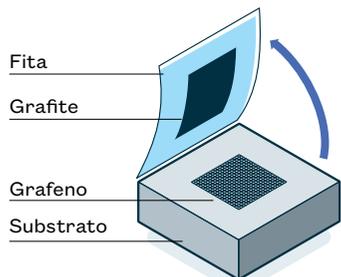
É o grafeno contendo átomos de oxigênio. Material mais versátil, serve para uma ampla gama de aplicações, como baterias, sensores químicos, sistemas de tratamento de água, entre outros

Diferentes modos de produção

Conheça as principais rotas empregadas para obter o nanomaterial

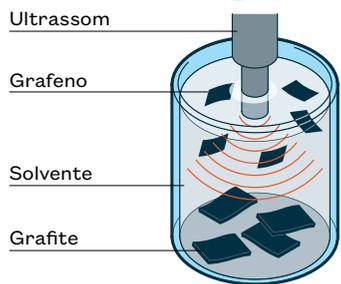
Esfoliação mecânica

Separação de camadas a partir da grafite por meio de métodos mecânicos. Foi a primeira rota seguida para isolar o grafeno. Apesar de mais simples, é difícil escalar para a produção em massa



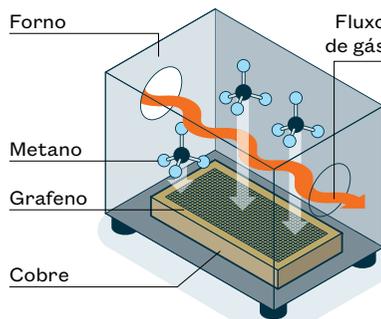
Esfoliação em fase líquida

Esse é o método que produz maior volume. A grafite é imersa em solvente e forças hidrodinâmicas de cisalhamento (deformação paralela à superfície) trabalham para fazer a esfoliação. O grafeno sintetizado fica suspenso no líquido



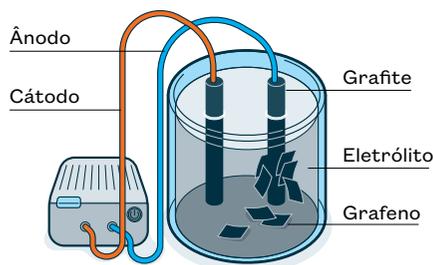
Deposição química a vapor (CVD)

O grafeno é formado sobre uma lâmina de cobre submetida a altas temperaturas (1.000 °C) na presença de um gás ou mistura de gases contendo carbono, como o metano (CH₄). O cobre age como um catalisador, liberando os átomos de carbono para formar as monocamadas



Esfoliação eletroquímica

Forma camadas de grafeno a partir de uma solução iônica condutora (eletrólito) e uma corrente elétrica que provocam mudanças estruturais do material grafitico usado como eletrodo



FONTES MATERIAL DE REFERÊNCIA DA ABNT, LUIZ GUSTAVO CANÇADO (UFMG) E JOYCE RODRIGUES DE ARAÚJO (INMETRO)

Engenharia de Grafeno (Geic), ligado à Universidade de Manchester, compra o grafeno usado em seus aditivos de produtores do Brasil, do Canadá, dos Estados Unidos, da Inglaterra, da Espanha, da Austrália, entre outros países. A importação, explica Peressinotto, é necessária porque o país ainda não tem quem produza o insumo nos formatos exigidos pela companhia, na quantidade suficiente e com o custo competitivo.

No Brasil, o novo material tem sido usado principalmente em aplicações que exploram suas propriedades mecânicas. “As grandes aplicações do grafeno no país ainda são em tintas, elastômeros [polímeros com propriedades elásticas],

compósitos, embalagens e cimento. São usos ligados a materiais mais pesados, incluindo os da construção civil e os do setor automotivo”, afirma o físico Luiz Gustavo Cançado, da UFMG. Ex-coordenador do Projeto MGgrafeno, criado em 2016, o pesquisador e sua equipe desenvolveram um processo-piloto de produção em ampla escala do material e testaram mais de 20 aplicações.

“O grafeno é muito resistente mecanicamente. É preciso imprimir muita força para que ele se rompa. Ao misturá-lo com polímeros, borrachas, cimento ou cerâmicas, ocorre uma melhoria geral das propriedades mecânicas do material resultante”, sustenta o físico Marcos Pimenta, também professor da UFMG. “Mas não é fácil desenvolver e produzir esse material.”

Pioneiro nos estudos de nanomateriais de carbono no país, Pimenta criou e dirigiu por 10 anos o Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno (CTNano) da UFMG, onde hoje, em um espaço de 3 mil metros quadrados, cerca de 100 pessoas trabalham em 10 laboratórios para desenvolver soluções e tecnologias sob demanda.

“No começo, eram principalmente projetos para duas empresas. Hoje temos várias iniciativas em andamento com companhias de diferentes setores”, conta o pesquisador.

De acordo com o físico Rodrigo Gribel Lacerda, atual coordenador-geral do CTNano, que se tornou uma unidade da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii), o centro firmou até agora parcerias com 15 empresas. Entre os projetos mais avançados está um nanossensor feito com nanotubos de carbono (camadas de grafeno enroladas em forma de cilindro) para monitorar a concentração de dióxido de carbono no gás natural extraído dos poços de petróleo do pré-sal.

“Estamos na fase de homologação do dispositivo, criado em parceria com a Petrobras. Falta realizar os testes em ambiente real para virar um produto comercial”, ressaltava Lacerda. Também nessa etapa de desenvolvimento há outro sensor de deformação para maquinários usados na atividade mineradora. Em um terceiro projeto, o objetivo é empregar o grafeno como filtro para purificação da água.

O Rio Grande do Sul sedia uma das primeiras fábricas de grafeno em operação no país. Fruto de um projeto da Universidade de Caxias do Sul (UCS), a UCSGraphene, em Caxias do Sul, está em operação desde março de 2020. A unidade, vinculada à Embrapii, utiliza a rota de esfoliação em fase líquida para desenvolvimento e produção do grafeno e de outros materiais ricos em carbono. Sua capacidade de produção supera 1 tonelada por ano.

“Além de desenvolver grafeno a partir da grafite e de outras fontes de carbono, nós nos dedicamos à criação de soluções tecnológicas contendo o nanomaterial e seus derivados, e a rotas produtivas focadas em outras nanoestruturas à base de carbono, como óxido de grafeno e grafenos modificados”, conta o engenheiro de materiais Diego Piazza, coordenador da UCSGraphene, que atua em parceria com outras empresas e institutos de ciência e tecnologia.

“Entre os diversos desenvolvimentos tecnológicos e estudos do uso do grafeno e derivados realizados por nossa equipe, está a sua utilização em materiais compósitos [polímeros, cerâmicas e metais], equipamentos de proteção, lubrificantes, tintas e revestimento, sistemas de filtração, medicina regenerativa e peças técnicas”, diz Piazza, que também é professor na UCS. “Várias de nossas soluções já estão sendo comercializadas nos setores de moda, mobilidade, logística, entre outros.”

Na capital mineira, outra instalação com condições de produção industrial prepara-se para lançar uma oferta pública de tecnologias. O CDTN abriga uma planta construída no âmbito do Projeto MGgrafeno, da UFMG, em parceria com a estatal Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (Codemge), com capacidade para fabricar cerca de 1 tonelada por ano. “Com o edital, pretendemos transferir a tecnologia que criamos para interessados em produzir grafeno para exploração comercial e industrial”, diz Caçado, da UFMG. A ideia é de que o parceiro privado utilize as instalações do CDTN.

A universidade detém, com o CDTN, a cotitularidade da propriedade intelectual gerada no projeto, relacionada à rota desenvolvida para a

produção de grafeno, baseada na esfoliação em fase líquida da grafite. O pesquisador explica que um dos grandes desafios para expandir as aplicações e o uso do material comercialmente é conseguir fabricá-lo em grande escala por um processo reprodutível.

Otra dificuldade é estabelecer normas para produção, controle de qualidade e segurança do insumo. Por fim, é necessário ter informações confiáveis sobre o material, que garantam que se trata realmente de grafeno e não de outra forma alótropica do carbono, como grafite. Alótropos são substâncias simples formadas pelo mesmo elemento químico, com variação do número de átomos ou de sua estrutura cristalina.

A demanda por controlar a qualidade do grafeno que circula no país, seja ele nacional ou im-

Laboratório da Gerdau Graphene voltado a criar soluções com grafeno para construção civil



Ao lado, preparo de pasta de cimento com material contendo grafeno; mais à esquerda, grafeno em pó (atrás) e composto aditivado à base de termoplástico e do nanomaterial



portado, chegou ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). Desde o ano passado, a entidade trabalha no desenvolvimento de um selo de conformidade por meio de um programa de certificação para o grafeno, programa conhecido informalmente como PAC (Plano de Aceleração do Crescimento) do grafeno. A previsão é de que ambos sejam lançados em meados de 2025.

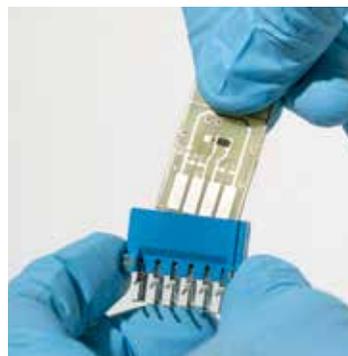
“Quando o grafeno superou o estágio da pesquisa acadêmica e virou um produto comercial, o Inmetro percebeu que devia criar métodos de medição [para verificar o número de camadas de grafeno e a pureza do material contido no produto] e elaborar um conteúdo de referência para orientar a realização de testes visando a conformidade do material a determinadas normas de ensaio. Com a ABNT [Associação Brasileira de Normas Técnicas], elaboramos as normas para identificar e classificar esse nanomaterial”, relata a química Joyce Rodrigues de Araújo, responsável pelo Laboratório de Fenômenos de Superfície e Filmes Finos (Lafes) da Divisão de Metrologia de Materiais e Superfícies do Inmetro. Ela ganhou em 2024 o prêmio 25 Mulheres na Ciência, promovido pela empresa 3M, pelo trabalho no desenvolvimento de um biogrfeno, produzido a partir do processamento de biomassas, como casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar.

Araújo explica que raramente o que se tem em produtos comerciais é a monocamada de grafeno, como a produzida na Universidade de Manchester em 2004. “O grafeno engloba uma família de compostos que diferem entre si pelo número de camadas que os constitui e o formato com os quais se apresentam”, afirma a pesquisadora. Inclui, por exemplo, o grafeno original, de uma só camada, o de múltiplas camadas e as nanoplacas de grafeno (ver infográfico na página 15).

“Nosso trabalho no Inmetro é definir a família, o modelo, se é grafeno em pó ou em suspensão líquida. Também estabelecemos as técnicas de ensaio que serão utilizadas pelos laboratórios que vão ser acreditados para certificar o material”, pondera a pesquisadora.

Em meio às dúvidas sobre o que pode ser chamado de grafeno, a Organização Internacional de Normalização (ISO) publicou normas sobre o tema, que foram traduzidas para o português. Elas indicam que se considera grafeno um material de carbono com até 10 camadas atômicas – ou seja, até 10 folhas de átomos de carbono empilhadas uma sobre a outra. Quando há duas camadas, chama-se bicamada de grafeno. Entre três e 10 camadas, fala-se em grafeno de poucas

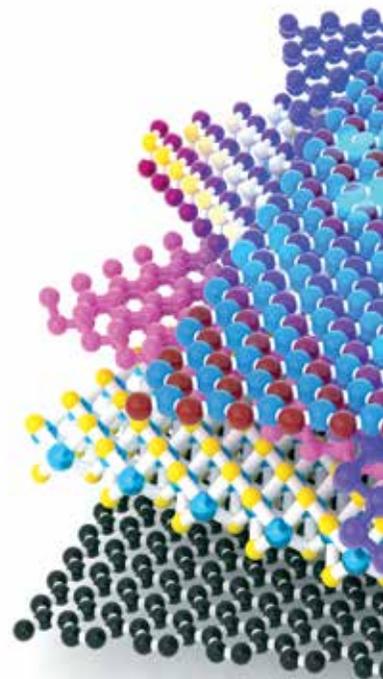
Chip com nanossensor de grafeno para detecção de gases, feito na UFMG; abaixo, biossensor com o nanomaterial para exame de glicemia, criado pela NanoMolar



camadas. “Acima de 10, ainda não há um consenso sobre a nomenclatura a ser adotada. No momento, utiliza-se a definição de nanoplacas de grafeno, desde que o material tenha pelo menos uma dimensão na nanoescala, até 100 nm [nanômetros]”, explica Araújo.

“Há uma grande discussão sobre até onde é grafeno. Quando se passa de uma para duas camadas e de duas para três, a estrutura eletrônica do material muda muito. Com mais de 10 camadas fica mais parecido com grafite. A monocamada, o grafeno original, entretanto, nem sempre é o mais interessante para as aplicações tecnológicas”, ressalta Cañado. “Pode acontecer que o de mais camadas se adéque melhor à finalidade desejada. É possível afirmar que, para a maioria das aplicações atuais, o grafeno de pouquíssimas camadas, entre uma e três, não é o mais indicado.”

O método de produção do material, explica Cañado, interfere no tipo de grafeno que se obtém, e cada um deles tem propriedades diferentes, que podem ser adequadas aos diferentes usos. Além disso, por vezes outros materiais bidimensionais são incluídos na família dos materiais relacionados ao grafeno. A esfoliação mecânica foi o



primeiro método usado para isolar o grafeno, mas ele também pode ser obtido a partir da deposição química em fase vapor (CVD) ou esfoliação em fase líquida (*ver infográfico na página 16*).

O preço do nanomaterial, afirmam os especialistas, varia muito no mercado global. Segundo Thoroh, da DreamTech Nanotechnology, o quilo do grafeno monocamada com alta pureza pode custar US\$ 2 mil. “Já os grafenos com poucas camadas que comercializamos custam aproximadamente US\$ 300 a US\$ 350 o quilograma”, diz.

O Brasil tem tradição e contribuições expressivas no trabalho de caracterização do material. Pesquisadores do país vêm desenvolvendo o campo científico dos nanomateriais de carbono desde a década de 1990. Em artigo publicado em 2019 no *Brazilian Journal of Physics*, Pimenta e colegas descrevem o papel da colaboração entre grupos brasileiros e o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), nos Estados Unidos, para o estabelecimento dessa ciência no país.

A física norte-americana Mildred Dresselhaus (1930-2017), então professora emérita do MIT e considerada a “rainha da ciência do carbono”, visitou o Brasil 12 vezes entre 2001 e 2013. “Antes mesmo do estudo pioneiro com grafeno de Novoselov e Geim em 2004, os cientistas brasileiros deram contribuições importantes para a ciência

da grafite e os sistemas gráfiticos”, afirmam os autores no artigo.

“Trabalho com isso desde 1999, antes que meus antigos compatriotas fizessem a extração do grafeno”, conta o físico experimental russo Yakov Kopelevich, do Instituto de Física da Unicamp e autor de artigos com centenas de citações sobre o tema, entre eles um publicado em abril de 2003 na *Physical Review Letters* sobre o comportamento da grafite no limite quântico.

Castro Neto, da NUS, afirma que o seu primeiro artigo sobre grafeno foi rejeitado em todos os periódicos aos quais foi submetido com a explicação de que “não existe tal coisa como o grafeno”. “Por muito tempo, ninguém acreditava na existência de materiais bidimensionais, pois não se achava que eles seriam estáveis o suficiente para se manter”, lembra o pesquisador.

Em 99% dos materiais, diz o professor da NUS, os elétrons se propagam dentro do material como uma partícula livre, que tem massa e inércia. “No grafeno, em razão de a rede cristalina ser hexagonal, os elétrons se propagam com velocidade como se fossem objetos sem massa. Do ponto de vista teórico, isso era interessante. Um novo tipo de partícula se propagando no material.” Em 2009, o pesquisador brasileiro publicou na *Reviews of Modern Physics* um estudo detalhando as propriedades eletrônicas do grafeno.

Além de abrir a área das investigações de materiais com apenas duas dimensões, o grafeno também inaugurou a chamada twistrônica. Em 2018, pesquisadores do MIT descobriram um “ângulo mágico” no grafeno, ao desalinhar em exatamente 1,1 grau duas folhas do material (*ver Pesquisa FAPESP nº 302*). Com esse desalinhamento, o grafeno vira um supercondutor. Isso, contudo, precisa ocorrer em temperaturas extremamente baixas, o que acaba por dificultar sua aplicação prática. Na UFMG, os pesquisadores investigam outros ângulos de rotação, de até 30 graus. Um artigo do grupo da universidade mineira com esse tema foi capa da revista *Nature* em 2021.

Em 2024, a mesma equipe, coordenada por Cançado, da UFMG, e pelo físico Ado Jório, da mesma universidade, publicou um artigo de capa da revista *Carbon* sobre o estudo dos defeitos do grafeno usando a técnica de espectroscopia de Raman. O *paper*, que descreve a história da pesquisa para o aprimoramento da metrologia de nanomateriais, indica que o Brasil é referência na área, segundo publicação da Sociedade Brasileira de Física. O controle das propriedades do grafeno é crucial para a fabricação de dispositivos e para o processamento de informações, concluíram os autores do estudo. ●

Ilustração mostra vários materiais bidimensionais, entre eles o grafeno, empilhados

