

CARNAÚBA

UM SUPERMICROSCÓPIO DE RAIOS X



O físico Carlos Pérez arruma um vaso com uma muda de trigo entre os feixes e detectores de raios X da estação experimental

Em pé, no centro da sala de controle da linha de luz Carnaúba do laboratório Sirius, em Campinas, o cientista molecular Douglas Galante liga o tablet e anuncia: “Estamos fazendo ciência nova aqui. E estamos só no comecinho”. A tela do tablet exibe a imagem da carcaça de uma bactéria capaz de digerir e excretar metais como ferro e manganês. Encontrado em uma praia do leste do Canadá, o microfóssil tem de 20 a 50 micra de comprimento (1 micron, cujo plural é micra, é a milésima parte do milímetro).

As análises preliminares indicaram que o organismo que ocupava a carcaça poderia realmente ter vivido há cerca de 3,7 bilhões de anos, como proposto, embora sob controvérsia, por pesquisadores do Reino Unido em março de 2017 na *Nature*. “Estamos perto de resolver a controvérsia, mostrando que a idade proposta estaria correta, porque a organização dos minerais é típica dos organismos vivos”, diz Galante. Se conseguir, poderá ampliar em 300 milhões de anos os registros dos mais antigos sinais de vida na Terra.

Sua equipe, com geólogos e físicos da Universidade de São Paulo (USP), identificou a forma e a composição de microfósseis, também do Canadá, com 1,8 bilhão de anos, descritos em um artigo de 2020 na *Scientific Reports*. Um trabalho de julho de 2022 na *Frontiers in Earth Science* detalhou a estrutura, em forma de rocambole, e a composição

química da carapaça do microrganismo *Conophyton cylindricus*, encontrado em rochas sedimentares de Minas Gerais com idade entre 1,2 bilhão de anos e 900 milhões de anos.

Em operação desde dezembro de 2021 e aberta em 2023 para os primeiros grupos de usuários externos, a Carnaúba, com 143 metros (m) de comprimento, é a mais longa das 10 linhas de luz já em funcionamento. Como as outras, ela aproveita a energia irradiada pelos elétrons acelerados no anel circular do Sirius, que produz luz do tipo síncrotron, e é usada para estudar diferentes materiais (ver Pesquisa FAPESP nºs 269 e 287). Inaugurado em novembro de 2018, o Sirius faz parte do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), que por sua vez integra o Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM). Outras quatro linhas estão sendo construídas e devem entrar em funcionamento nos próximos anos.

“A Carnaúba é a primeira e única nanossonda de raios X em operação no hemisfério Sul”, comenta o físico Hélio Tolentino, que participou de seu projeto e sua construção, a partir de 2015, depois de trabalhar 10 anos em Grenoble, na França, em um síncrotron similar ao Sirius – há outro desse tipo apenas na Suécia. “O grande desafio é a precisão, porque o feixe de luz tem de se manter estável na amostra, com uma oscilação de poucos nanômetros [milionésimos de milímetro], depois de viajar ao longo de 143 m entre a fonte e o foco, até chegar à amostra a ser estudada.”

A mais longa linha de luz do Sirius, em Campinas, elucida detalhes da história de fósseis, da interação das plantas com o solo e das impurezas de diamantes

Carlos Fioravanti

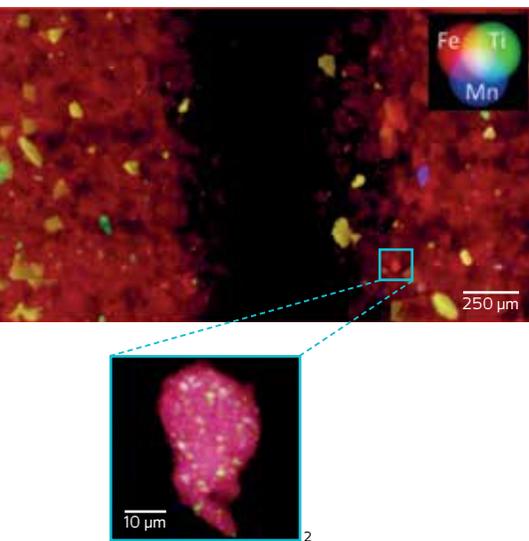
Tolentino compara a linha de luz a um microscópio eletrônico, com a diferença de poder penetrar qualquer tipo de material, até mesmo em solução, por operar na faixa de raios X em níveis de energia entre 6 mil e 15 mil elétrons-volt (eV). Já a microscopia eletrônica limita-se à superfície dos materiais e outras técnicas de raios X implicam a destruição do material estudado, na busca de informações sobre seu interior.

Ele enumera outras vantagens de um microscópio de raios X, que funciona com radiação eletromagnética, sobre um eletrônico, à base de feixes de elétrons: “A maior penetração dos raios X na matéria e a possibilidade de variar a energia continuamente e fazer espectroscopia [identificação de elementos químicos por meio da radiação eletromagnética], o que traz informação sobre estados químicos e eletrônicos da matéria”. Os feixes de elétrons relativísticos (em velocidade próxima à da luz) emitem luz concentrada, ao passo que nos aparelhos mais conhecidos de raios X, que revelam manchas nos pulmões ou ossos quebrados, a radiação tem a forma de um amplo leque.

“Agora podemos estudar materiais com uma resolução espacial de uma dezena de nanômetros, em diferentes condições experimentais”, ele comenta, com exemplos de trabalhos em andamento. “Podemos examinar uma célula solar operando em um simulador ambiental. Também é possível estudar amostras sensíveis à radiação como células e tecidos biológicos ou um eletrocatalisador

UM ESTUDO PROFUNDO

Raios X podem mostrar como nutrientes circulam pelas raízes de trigo



A raiz, por não absorver a radiação, forma a mancha preta central, ladeada pelo solo com três elementos químicos em cores diferentes (*no alto*). Um microagregado de solo (*destaque*) exhibe minerais, poros e filamentos de fungos

feito a partir de uma enzima em uma célula eletroquímica.” Um artigo de julho na *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* mostra que os resultados das pesquisas feitas nos primeiros dois anos de funcionamento da linha são variados.

Na sala de controle, em frente às paredes de vidro da sala, atrás da qual há um corredor e a estação experimental, blindada e vedada durante a emissão de raios X, há um monitor de televisão, a 2 m de altura, mostrando um vaso plástico com uma plântula de trigo. Abaixo do monitor, seis telas de computador exibem gráficos que se refazem continuamente. “Por esses monitores podemos ver tudo o que se passa dentro da estação experimental”, explica o físico argentino Carlos Pérez, coordenador da linha Carnaúba, que no dia anterior havia acompanhado o experimento até as 22h30. “Podemos também fazer ajustes remotamente.”

O vaso é realmente pequeno: 3 cm de altura e 1 cm de diâmetro. É difícil encontrá-lo em meio aos fios e aparelhos da estação experimental, quando, por volta do meio-dia, o teste termina e a luz síncrotron é bloqueada, Pérez abre a porta blindada, entra e o mostra.

Aplicando raios X sobre a raiz de trigo, que se infiltrou em um tubinho abaixo do vaso, com 1,5 milímetro (mm) de diâmetro e 3 mm de terra, esse grupo do LNLS pretende ver como a planta absorve nutrientes e como intervir nesse processo. Se bem-sucedido, o teste em andamento poderá mostrar os tecidos da raiz sorvendo o cálcio liberado pela hidroxiapatita, o mesmo mineral usado na restauração de dentes e ossos.

Para contar o que já fizeram, Tolentino expõe duas imagens no telão da parede adjacente à do monitor. A primeira mostra uma raiz de trigo, que forma uma mancha preta por deixar que os raios X a atravessem, ladeada por uma massa com polígonos vermelhos, verdes e amarelos, correspondentes ao ferro, titânio e manganês – as cores diferem porque cada elemento químico exibe uma resposta distinta quando submetido à radiação.

A segunda imagem é de um microagregado do solo – um nanotorrão – com material orgânico e metais. “É a primeira vez que distinguimos os elementos quí-

UMA EMPRESA QUE NASCEU COM O SIRIUS

Startup desenvolve equipamentos compactos de raio X

Em um galpão de um condomínio empresarial próximo à rodovia Dom Pedro I, em Campinas, a equipe de desenvolvimento da Pitec testa as partes de um detector compacto de raios X. “Esperamos ter o primeiro protótipo até o fim do ano e lançar a versão final no primeiro trimestre de 2024, para ser usado em experimentos científicos e análises de material”, diz o cientista da computação Paulo Bertolo, diretor de operações.

Provisoriamente chamado de RAD, o aparelho é uma aposta da empresa para conquistar novos mercados. Desde 2017, quando começou a funcionar, em uma sala de 25 metros quadrados dentro da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), a empresa fabricava detectores de raios X maiores, com até 144 sensores de raios X (o compacto pode ter menos de 10), que produzem 2 mil imagens por segundo

com resolução de até 9 milhões de pixels. Geralmente pintados de lilás, foram instalados em seis das 10 linhas de luz já em operação no Sirius e testados em aceleradores de luz síncrotron de outros países.

A empresa nasceu de um encontro na Unicamp com pesquisadores do Sirius, então em construção. Ao saberem que o Sirius precisava de empresas nacionais para montar circuitos eletrônicos, importados da Europa, Bertolo e os outros sócios prontificaram-se a fazê-los. Fizeram, entregaram e perguntaram se haveria outro problema que pudessem resolver. Ganharam a tarefa de, em parceria com os engenheiros e físicos do LNLS, prepararem uma versão nacional de um detector de raios X complexo, de entrega demorada e manutenção cara. Os que eram usados na época vinham da Suíça.

Bertolo e outros colegas da Pitec, que haviam trabalhado antes no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD), terminaram o primeiro protótipo em 2019 e no ano seguinte começaram as entregas. Já entregaram 12 equipamentos para o LNLS – cada um pode demorar até 10 meses para ser fabricado, mesmo assim menos que os importados. Os detectores funcionam como uma câmera fotográfica, formando imagens com a radiação espalhada pelos objetos examinados.

Em 2020 a Pitec foi comprada por um grupo empresarial de Campinas e em 2022 pela Lumentum, multinacional da área de telecomunicações sediada nos Estados Unidos. “Nosso desafio agora é aprimorar os equipamentos, oferecer os detectores para os cerca de 50 aceleradores síncrotrons de outros países e aproveitar a tecnologia para aplicar em outros mercados”, comenta Bertolo.



3



4

micos metálicos do solo e vemos os poros, formados pelo ar, que a água, a raiz das plantas e os filamentos de fungos atravessam”, diz Tolentino.

O químico de solos norte-americano Dean Hesterberg, da Universidade Estadual da Carolina do Norte, dos Estados Unidos, participa dos experimentos com o propósito de descobrir como os nutrientes, principalmente o fosfato, refugiam-se nos poros dos microaglomerados. As informações que conseguir, ele espera, poderiam inspirar estratégias para usar menos ou reaproveitar fosfato, cujo estoque mundial cai rapidamente. “As plantas usam apenas 30% do fosfato, os outros 70% permanecem no solo, provavelmente escondidos nos microporos”, diz. Sua hipótese é de que o óxido de ferro, comum em solos do Brasil, poderia atrair o fosfato e dificultar sua incorporação pelas raízes.

“Não conseguimos ainda detectar o fósforo nos microaglomerados, porque qualquer obstáculo ou mesmo o ar atenua o sinal que ele emite”, explica Tolentino. Mas ele espera que o fósforo aparecerá quando instalarem uma fonte mais potente para as faixas de baixas energias, prevista para entrar em operação em meados de 2024.

O que já se fez deixa os pesquisadores empolgados por entrarem em um mundo novo, como aconteceu com o inventor do microscópio, o naturalista holandês Antony van Leeuwenhoek (1632-1723), ao observar os detalhes de plantas e células pela primeira vez. Mas também gera problemas, porque as imagens em três

dimensões feitas a partir das medições na estação experimental muitas vezes não se encaixam com nada conhecido. “Estamos aprendendo a interpretar essas imagens, que ninguém nunca viu antes”, comenta Tolentino.

Diferentemente de Leeuwenhoek com seu microscópio, eles têm de convencer os outros cientistas de que a imagem é real e tem uma lógica científica. Foi o que fez a geóloga Carolina Camarda, da Universidade de Brasília (UnB), ao usar várias linhas de luz do Sirius para confirmar suas conclusões.

Ela estuda as impurezas dos chamados diamantes superprofundos, formados a mais de 200 km de profundidade no manto terrestre. Bastante raros, eles mantêm sua estrutura original e, por essa razão, podem indicar como os minerais se comportam sob as altas pressões e temperatura no interior da Terra. Os geólogos Tiago Jalowitzki e Fernanda Gervasoni ganharam 10 deles, com 2 a 3 mm de diâmetro, de uma cooperativa de garimpeiros da região de Juína, em Mato Grosso, na divisa com Rondônia, um dos poucos lugares do mundo em que são encontrados.

Em uma das amostras, a J1, as análises revelaram dois minérios de ferro, a hematita e a goethita, ambos muito diferentes dos encontrados na superfície da Terra. “Como as duas se formaram a uma pressão entre 54 gigapascal [GPa] e 60 GPa, próxima ao limite de desestru-

A geóloga Carolina Camarda acompanha os experimentos na sala de controle (acima, à esq.); parte da estrutura da linha (acima); um dos diamantes cujas impurezas mostram como os minerais se comportam no interior da Terra (ao lado)



5

turação do material, a distância entre os átomos e a deformação é muito maior”, ela relata. Tolentino acrescenta: “Os cristais são imperfeitos, não é a mesma estrutura que se repete”.

As imagens formadas por centenas de medições revelaram também inclusões de sulfetos formados por calcopirita, pertlandita e pirrotita, comuns em diamantes. Mas, novamente, há diferenças. Comparados com os das superfícies, os cristais das profundezas “são desestruturados”, observa Tolentino.

Outros resultados instigantes devem sair dos computadores que digerem as informações geradas pela emissão de raios X, talvez até em um ritmo mais intenso. Para o próximo ano está prevista a construção de outra estação experimental da Carnaúba, porque apenas uma não dá conta dos pedidos, mesmo funcionando todos os dias, dia e noite. “A agenda está cheia até 22 de dezembro”, comenta Tolentino. ■

Os projetos e os artigos científicos consultados para esta reportagem estão listados na versão on-line.