

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA
CURSO DE CIÊNCIAS AERONÁUTICAS**

**USO DO GRAFENO EM AERONAVES: PERSPECTIVAS QUANTO À SUA
APLICAÇÃO**

GOIÂNIA

2022

LUÍS CLÁUDIO BARBOSA CAMPOS

**USO DO GRAFENO EM AERONAVES: PERSPECTIVAS QUANTO À SUA
APLICAÇÃO**

Artigo apresentada à Pontifícia Universidade Católica de Goiás como exigência parcial para a obtenção do grau de bacharel em Ciências Aeronáuticas. Orientadora: Professora Tammyse Araújo da Silva.

GOIÂNIA

2022

LUÍS CLÁUDIO BARBOSA CAMPOS

**USO DO GRAFENO EM AERONAVES: PERSPECTIVAS QUANTO À SUA
APLICAÇÃO**

GOIÂNIA-GO, 13/6/2022.

BANCA EXAMINADORA

Esp. Tammyse Araújo da Silva _____ CAER/PUC-GO _____
Assinatura Nota

Me. Paulo José Gonzaga Ribeiro _____ CAER/ADM/PUC-GO _____
Assinatura Nota

Esp. Andréluiz da Silva Fernandes _____ CAER/PUC-GO _____
Assinatura Nota

USO DE GRAFENO EM AERONAVES: PERSPECTIVAS QUANTO À SUA APLICAÇÃO

USE OF GRAPHENE IN AIRCRAFT: PERSPECTIVES AS TO ITS APPLICATION

Luís Cláudio Barbosa Campos¹

Tammyse Araújo da Silva²

RESUMO

A indústria aeronáutica, de forma progressiva, vem substituindo os materiais utilizados em aeronaves e em seus componentes por outros mais eficientes, processo evolutivo natural e necessário. Com o advento da nanotecnologia, foi possível transformar materiais empregados em diferentes campos, tornando-os mais leves, resistentes e sustentáveis. Figura nesta tecnologia o grafeno. Tal material apresenta extraordinárias propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, ópticas, além de ser resistente, leve, flexível e elástico. Considerando tais particularidades, esta pesquisa tem por objetivo verificar a aplicabilidade do grafeno em aeronaves e seus componentes. Para isso, adotou-se uma metodologia básica, qualitativa e de procedimentos bibliográficos. Como resultado, foi possível verificar que o grafeno, por apresentar particularidades relacionadas à sua estrutura a partir das ligações de carbono, é um dos materiais mais versáteis já produzidos. Em decorrência de sua versatilidade, ele pode ser aplicado em diferentes áreas, que incluem o tratamento de água salina; diminuição da emissão de CO₂; detecção de doenças de forma mais rápida; materiais de interesse da construção civil; tinturas para cabelo; células solares com menos custos e mais flexíveis; microprocessadores menores e mais resistentes; pneus de bicicletas firmes e duradouros e quadros mais leves. A pesquisa também constatou possíveis aplicações do grafeno na indústria aeronáutica, podendo substituir estruturas à base de compósitos e de liga de alumínio; ser componente da bateria; ser utilizado em revestimento, sensores, atuadores térmicos, protetores, processadores, além de ser capaz de reduzir o peso (de peças ou aeronaves), ser utilizado como impermeabilizante e diminuir os impactos ambientais de ruídos e emissão de CO₂. Com tantas utilidades, uma aeronave protótipo construída a base de grafeno já foi desenvolvida na Europa e segue em fases de testes. Esta aeronave é o *Prospero* e, entre os resultados dos seus testes, está o de voar com menor arrasto, conseguir executar o gerenciamento térmico e evitar danos causados por raios. Percebe-se, portanto, que o grafeno é uma tecnologia bastante útil e o país que dominar a sua extração, pesquisa e aplicação sairá na frente em diversas áreas. Neste sentido, verificou-se com o estudo que o Brasil é o segundo maior produtor de grafite (base do grafeno), atrás da China, ao mesmo tempo em que está em terceiro lugar em termos de reserva, perdendo para a Turquia e a China. Apesar disso, o país investe pouco no desenvolvimento de produtos e em conhecer o material. À vista disso, a União Europeia desenvolve produtos e materiais, incluindo o *Prospero*, sendo alto o investimento no setor, cerca de 1 bilhão de euros. Diante esta realidade, sugere-se como pesquisa futura investigar o uso de grafeno pela Embraer, visto a importância que esta empresa tem no cenário internacional e a disponibilidade da matéria-prima no país.

¹ Graduando em Ciências Aeronáuticas, Piloto Privado. Endereço eletrônico: luis_claudio11@hotmail.com

² Especialista em Docência Universitária pela Universidade Católica de Goiás. Graduanda em Ciências Aeronáuticas pela UnisulVirtual. Professora da Escola Politécnica no curso de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. EC-PREV pelo CENIPA. Credenciada no SGSO pela ANAC e pela Infraero. Endereços eletrônicos: tammyse@hotmail.com/tammyse@pucgoias.edu.br.

Palavras-Chaves: Grafeno. Nanotecnologia. Inovação. Aeroplanes.

ABSTRACT

The aeronautical industry has been progressively replacing the materials used in aircrafts and their components for more efficient ones, an evolutionary process which is natural and necessary. With the advent of nanotechnology, it became possible to transform materials used in different fields of the industry, making them lighter, more resistant, and sustainable, e.g., the graphene. The graphene material has extraordinary mechanical, electrical, thermal, and optical properties, in addition to being resistant, light, flexible and elastic. Considering these particularities, this research aims to verify the applicability of graphene in aircrafts and their components. For such purpose, a basic qualitative methodology and bibliographic set of procedures were adopted. As a result, it became possible to observe that graphene, by presenting particularities related to its structure from carbon bonds, is one of the most versatile materials ever produced. Due to its versatility, it can be applied in different areas, which include saline water treatment; decrease in CO₂ emissions; faster detection of diseases; materials of interest to civil construction; hair dyes; cheaper and more flexible solar cells; smaller, stronger microprocessors; firm, durable bike tires and lighter frames. The research has also found possible applications of graphene in the aeronautical industry, for example its usage in the replacement of structures based on composites and aluminum alloy; to be a battery component; to be used in coating, sensors, thermal actuators, protectors, processors, in addition to being able to reduce the weight (of parts or aircraft), to be used as waterproofing and to reduce the environmental impacts of noise and CO₂ emissions. With so many uses, a prototype aircraft built on graphene has already been developed in Europe and is still undergoing testing. This aircraft is the Prospero and, among the results of its tests, is to fly with less drag, to be able to perform better thermal management and to avoid damage caused by lightning. It can be seen, therefore, that graphene is a very useful technology, and the country that masters its extraction, research and application will come out ahead in several areas. In this sense, it was verified with this study that Brazil is the second largest producer of graphite (based on graphene), behind China, and it is in third place in terms of reserves, losing to Turkey and China. Despite this, the country invests little in the development of products and in getting to know the material. In view of this, the European Union develops products and materials, including Prospero, and investment in the sector is high, around 1 billion euros. Given this reality, it is suggested as a future research to investigate the use of graphene by Embraer, given the importance that this company has in the international scenario and the availability of raw material in the country.

Keywords: Graphene. Nanotechnology. Innovation. Airplanes.

INTRODUÇÃO

A indústria aeronáutica evolui a cada dia, substituindo estruturas e componentes das aeronaves por materiais mais eficientes e resistentes. Nesta evolução, diversas tecnologias podem ser inseridas e aproveitadas. Diante essas possibilidades, é possível que materiais nanotecnológicos passem compor a aeronave ou partes dela, entre eles, o grafeno.

Neste contexto, a pesquisa tem por objetivo geral verificar as possíveis formas de se empregar o grafeno em uma aeronave. Como objetivos secundários, destacam-se o de discutir

sobre a nanotecnologia, conhecer a estrutura e propriedades do grafeno, averiguar os campos nos quais essa nanotecnologia já é aplicada e compreender o grafeno sob a ótica nacional e internacional.

Para alcançar os objetivos propostos, a metodologia é básica, qualitativa e apoiada em procedimentos bibliográficos e documentais. Entre as fontes consultadas, estão autores como Marion e Hansen, Ramos, Woodford, Minari, entre outros, além de *sites* como o da *Graphene Flagship* e da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI).

A divisão do trabalho está estruturada em seis seções. A primeira seção explica as nanotecnologias. A segunda conceitua o grafeno e apresenta sua estrutura. Em seguida, na terceira seção, as principais aplicações do grafeno em diferentes campos são demonstradas. A quarta seção dedica a discorrer sobre as possíveis aplicações do grafeno em aeronaves ou em seus componentes. A quinta seção, por sua vez, trata sobre os estudos no Brasil e no mundo. Por fim, na última seção são traçadas as considerações finais.

A pesquisa se justifica porque trata-se de um material versátil e sua aplicabilidade em aeronave pode ser viável, visto que muitas transformações estruturais nos produtos da indústria aeronáutica resultaram em modelos mais leves, menos poluentes e ruidosos.

Com a pesquisa, espera-se evidenciar que o emprego do grafeno em aeronaves ou componentes que dela fazem parte é possível, considerando, sobretudo, a sua versatilidade e a melhoria que sua adoção pode promover em termos de eficiência.

1 NANOTECNOLOGIAS

A nanotecnologia é campo amplo multidisciplinar e interdisciplinar da ciência e da tecnologia que cria estruturas grandiosas do nanômetro (<100nm), as quais podem ser utilizadas em processos industriais a partir do desenvolvimento de produtos inovadores. À vista disso, tal tecnologia se mostrou relevante, pois sua aplicação pode abranger diversas áreas (SCHULZ, 2013 apud MARION; HASAN, 2016).

A origem da nanotecnologia é atribuída ao fato de que a ciência buscava manipular a matéria e seus átomos para além daqueles apresentados pela natureza, isto é, criar algo sintético. Esse estudo foi iniciado pelo físico Richard Feynman, em 1959, considerado o “pai da nanotecnologia”. Seus resultados, apesar de não oferecerem materiais novos, promoveram conhecimento e possibilidade da nanotecnologia para futura aplicação real (CADIOLI; SALLA, 2006).

A evolução da nanotecnologia ocorreu ao longo do século XXI com a comercialização de materiais cujas bases estão na microfabricação, na química orgânica e na biologia molecular (IBERDROLA, 2022). Desta evolução, surgiram diversos tipos de nanopartículas, assim tipificadas: baseadas em carbono, de cerâmica, de metal, semicondutoras, poliméricas e lípidas sólidas. Estes materiais estão descritos a seguir.

As nanopartículas baseadas em Carbono incluem materiais como os nanotubos de carbono (CNTs – grafeno dobrado em tubo)³ e fulerenos (grafeno que enrola em bolas)⁴. Os CNTs são as folhas do grafeno⁵ que se enrolam em um tubo. A aplicação destes materiais pode ocorrer, especialmente, no reforço de estruturas, sendo 100 vezes mais fortes que o aço. Além disso, seu uso pode se estender a materiais compósitos (principalmente polímeros), energia (armazenamento, conversão e transmissão de energia elétrica), sensores e biosensores, eletrônica (transistores), filmes finos (*touch screens*, LEDs e OLEDs, células solares flexíveis), meio ambiente (processos de purificação e descontaminação de águas) e suporte de catalisadores (ZARBIN; OLIVEIRA, 2013).

Já as nanopartículas de cerâmica são sólidos inorgânicos que compõem óxidos, carbonetos, carbonatos e fosfatos. As nanopartículas detêm forte resistência a temperaturas quentes e são inertes à química. Dentre suas aplicações, destacam-se a fotocatalise e a fotodegradação de corantes, materiais que são administrados em imagem e drogas (SANT ANNA, 2005).

Nos casos das nanopartículas de metal, estas são formadas a partir do preparo de metal e podem ser resumidas por método da química, eletroquímicos ou fotoquímica. Tais nanopartículas são aplicáveis na construção de sensores, microeletrônica, catálise, ação bactericida, células fotovoltaicas e outras (MELO JUNIOR et al., 2012).

Sobre as nanopartículas semicondutoras, estas têm compostos de metais e não metais e são produzidas a partir de compostos da tabela periódica. A utilização destas nanopartículas abrange a fotocatalise, os dispositivos eletrônicos, a foto-óptica e métodos de separação da água (FARIAS et al., 2005a). Dentre as pesquisas desenvolvidas com este material destaca-se a utilização de nanocristais semicondutores luminescentes de hidróxido de cálcio de cádmio (que são muito estáveis) para determinar antígenos em células sanguíneas (FARIAS et al., 2005b).

³ *Carbon nanotube*.

⁴ O fulereno consiste numa forma de carbono descoberta em 1985, que se baseia em anéis fechados de átomos de carbono. A molécula mais simétrica de fulereno é designada por futeboleno. Esta molécula forma esferas perfeitas de 60 átomos de carbono ligados entre si, dispostos por 12 pentágonos e 20 hexágonos formando uma estrutura idêntica à de uma bola de futebol (INFOPÉDIA, 2022).

⁵ É um material que consiste em uma folha plana de átomos de carbono, formando uma camada monoatômica, sua estrutura é mais resistente que o aço, entre outras características (VIEIRA SEGUNDO; VILAR, 2016).

As nanopartículas poliméricas (NPs) são partículas pequenas e sólidas que objetivam o controle de liberação de fármacos, promovendo a direção do fármaco para sítios próprios. As NPs produzem, a partir dos polímeros sintéticos, os copolímeros do ácido metacrílico, ésteres acrílicos ou metacrílicos, amplamente utilizados na área farmacêutica para encaixar princípios ativos (SOUTO; SEVERINO; SANTANA, 2012).

Para Souto et al. (2011), as nanopartículas lipídicas sólidas (NLS) correspondem a um sistema adotado como meio de saída para encapsulação de princípios ativos ligados aos sistemas coloidais tradicionais, como emulsões, lipossomas e nanopartículas poliméricas. As NLS têm aplicação na área farmacêutica e biomédica.

A partir do exposto, observam-se diferentes nanotecnologias aplicáveis em diversas áreas. Elas se fazem presentes, ainda, em produtos do dia a dia, como celulares, em roupas esportivas, tecidos, protetor solar, cosméticos, automóveis e remédios, entre outros produtos, e em inúmeros setores, como: energia, agropecuária, tratamento de água, cerâmica e revestimentos, plásticos e polímeros, aeroespacial, naval, automotivo, siderurgia, odontológico, têxtil, construção civil, microeletrônica, diagnóstico e prevenção de doenças e sistemas de medicação (ABDI, 2010).

Assim, as nanotecnologias estão revolucionando o mundo com muitos processos, produtos, conhecimentos e geração de recursos humanos, podendo ser consideradas do ponto de vista de inovação como uma plataforma tecnológica (ALVES, 2013 apud MARION; HASAN, 2016). Entende-se que não há dúvida de que os estudos na escala do nanômetro estão causando repercussão mundial (MARION; HASAN, 2016).

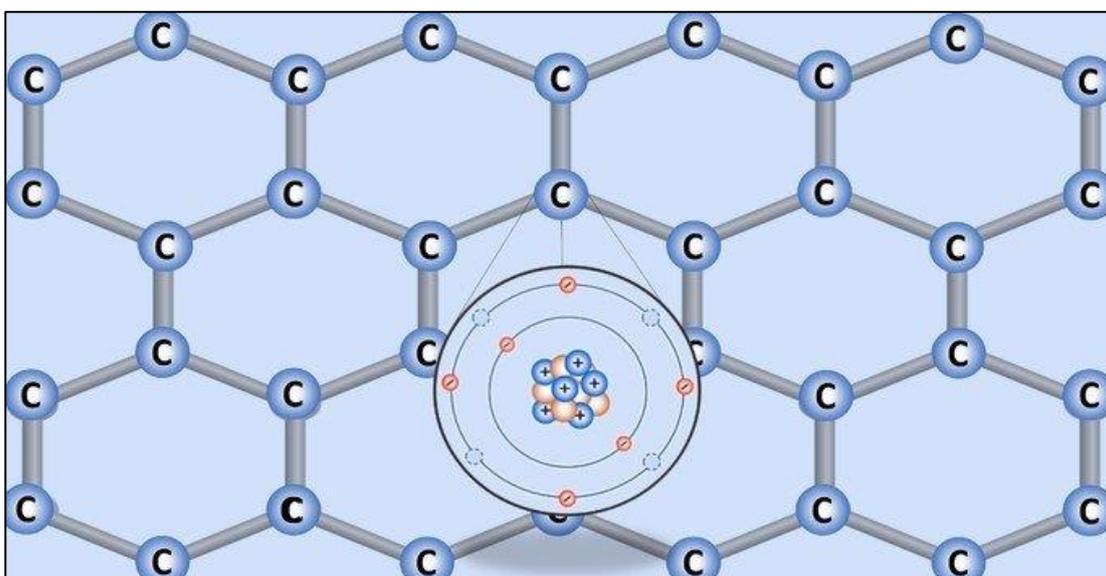
Entre as nanotecnologias, ainda existe uma especialmente discutida no âmbito da ciência. Trata-se do grafeno. De acordo com Zarkin e Oliveira (2013), o grafeno é um alótropo de carbono (C), também inserido na família dos nanomateriais, cuja unidade básica estrutural, origina a estrutura do grafite. A nanotecnologia grafeno será estudada na próxima seção.

2 GRAFENO: CONCEITO, ESTRUTURA E HISTÓRICO

O nome grafeno resulta da junção do prefixo “*graf*” (grafite) com o sufixo “*eno*” (hidrocarboneto insaturado). Isto significa que o grafeno é composto por átomos de carbono e hidrogênio. O grafite, por sua vez, é constituído por várias folhas de grafeno dispostas umas sobre as outras. Desta forma, uma camada de grafite corresponde ao nanomaterial grafeno (MANCHESTER, 2015).

Importante acrescentar uma breve explicação sobre o comportamento do carbono. O núcleo do carbono é constituído por seis prótons e seis nêutrons. Desta forma, os seis elétrons do átomo estão se distribuindo em duas camadas; na camada de valência há quatro elétrons e essa camada compõe até oito elétrons. Portanto, o carbono consegue a estabilidade em fazer quatro ligações e atinge a configuração eletrônica de um gás, conforme a regra do octeto (Figura 1). Os átomos no grafeno se ligam por ligações covalentes, ou seja, há o compartilhamento de elétrons. As ligações carbono-carbonos são fortes e encontra na natureza cada carbono em que se une a outros três na estrutura. Por isso, a hibridação do átomo é sp^2 , que corresponde a duas ligações simples e uma dupla (BATISTA, 2022).

Figura 1 – Estrutura do grafeno



Fonte: Batista (2022)

A partir da nomenclatura grafeno e do comportamento do carbono, pode-se entender o grafeno como uma camada de átomos de carbono que apresenta uma estrutura cristalina e bidimensional. Desta forma, seus átomos são estruturados de forma plana, como bolas brilhantes em uma mesa. Assim como no grafite, cada camada de grafeno é composta por "anéis" hexagonais de carbono, similares a um favo de mel. Como tais camadas têm somente um átomo de altura, é necessária uma pilha de cerca de três milhões das camadas para obter um grafeno com 1 mm de espessura (WOODFORD, 2021). Para Marion e Hasan (2016), a junção de várias folhas de grafeno resultam em um grafite tridimensional.

Como o grafeno está relacionado ao grafite e aos seus átomos de carbono, o estudo sobre estes átomos tem sido desenvolvido há décadas. Os principais cientistas, além de Richard

Feynman, (1959), que buscavam entender o comportamento dos átomos de carbono, foram Philip Russel Wallace (1947), que escreveu o primeiro artigo sobre o sistema eletrônico do grafite, e o químico Linus Pauling, vencedor do Prêmio Nobel, que estudou o comportamento das camadas planas de átomos de carbono (década de 1960) (WOODFORD, 2021).

O estudo mais aprofundado sobre o grafeno foi impulsionado entre as décadas de 1980 e 1990 pelas descobertas de fulerenos e nanotubos de carbono. Com os estudos, foi possível, em 2004, fabricar o grafeno em laboratório. Tal feito foi realizado na *University of Manchester* no Reino Unido e os cientistas responsáveis foram os russos Andre Geim e Konstantin Novoselov, que receberam, em 2010, o Prêmio Nobel de Física pelas suas descobertas (WOODFORD, 2021).

Nos experimentos, os cientistas utilizaram pedaços de fita adesiva para tirar flocos de grafite para em seguida, dobrá-la, separando e dividindo o grafite em pequenas camadas. Após análises, os estudiosos identificaram alguns pedaços de grafite em um átomo de espessura, resultando no grafeno. Quatro anos depois desses resultados, a equipe de *Manchester* criou um transistor de grafeno em um átomo de espessura e dez átomos de largura. No mesmo ano, cientistas da *Rice University*, dos Estados Unidos, construíram a primeira memória flash baseada no grafeno (WOODFORD, 2021).

Em razão de a estrutura do grafeno ter a espessura de um átomo de carbono, este se tornou um dos materiais mais inovadores, dotado de ótimas propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, ópticas, entre outras (GEIM; NOVOSELOV, 2007; GEIM, 2009). Neste sentido, Marion e Hasan (2016) consideram que a estrutura do grafeno pode dar forma a uma esfera (fulereno) ou um tubo (nanotubo) e que tais propriedades sugerem que esta nanotecnologia substituirá materiais em variadas e diferentes aplicações. Nessa perspectiva, o grafeno pode originar várias tecnologias disruptivas, visto que suas características podem ser combinadas em um único material, tornando-o um material de múltiplas faces de utilização.

À vista disso, o grafeno é um material que se aplica nas mais variadas áreas, da nanoquímica à nanoengenharia (MARION; HASAN, 2016), e desempenha papel relevante na ciência de nanomateriais, que se dá de variadas formas estruturais e propriedades raras (ALIVISATOS, 2004 apud MARION; HASAN, 2016).

O grafeno possui, ainda, propriedades eletrônicas excepcionais, assim como térmicas, mecânicas e de alta performance na condução de eletricidade, por isso, esse material oferece à indústria uma alternativa potente ao silício e ao diamante (MARION; HASAN, 2016). A seção a seguir apresentará os diferentes campos de aplicação para o grafeno.

3 APLICAÇÕES DO GRAFENO

As aplicabilidades do grafeno são similares às outras nanotecnologias já mencionadas e estão distribuídas em diferentes áreas da sociedade. Entre estes campos, Ramos (2021) destaca alguns: água potável; meio ambiente; medicina e saúde; construção civil; setores de beleza, energia, de eletrônicos, de mobilidade e da indústria aeronáutica. O Quadro 1 a seguir demonstra as particularidades do grafeno que atuam sobre os campos ora mencionados:

Quadro 1 – Particularidades do grafeno e principais campos de aplicação

Nº	Campo	Particularidades
1	Água potável	As membranas formadas com grafeno, em razão de sua constituição, são capazes de filtrar e purificar a água do mar, sendo utilizada no processo de dessalinização
2	Meio ambiente	Filtros de grafeno que separam os gases rejeitados gerados pela indústria reduzem a emissão de dióxido de carbono (CO ₂) para a atmosfera
3	Medicina e saúde	Sensores biomédicos construídos à base de grafeno são mais rápidos e eficientes para as detecções de doenças
4	Construção civil	Como material compósito misturado ao betão e ao alumínio, o grafeno os torna mais leves e resistentes
5	Beleza	Tintura de cabelo, pulverizada com grafeno, aumenta o tempo de fixação da tinta, que dura em torno de 30 lavagens
6	Energia	Células solares produzidas com grafeno são mais flexíveis, transparentes e sua produção envolve menos custos
7	Eletrônicos	Microdispositivos que substituem o silício pelo grafeno podem ser menores e mais resistentes. Baterias, quando construídas com grafeno, são melhores e mais rápidas para armazenar energia e conseguem carregar completamente em até 15 minutos
8	Mobilidade	Ao utilizar grafeno em pneus de bicicleta, estes se tornam mais firmes e duradouros. Do mesmo modo, quadros de bicicleta à base de grafeno, são mais leves, pesando cerca de 350 gramas
9	Indústria Aeronáutica	Aeronaves experimentais construídas com o grafeno são silenciosas e menos poluentes

Fonte: adaptado de Ramos (2021).

Entre os setores descritos no Quadro 1, evidenciam-se dois: a indústria aeronáutica (que será estudada na próxima seção) e os de eletrônicos, sobretudo relacionados às baterias. À vista disso, Baig, Kammakakam e Falath (2021) consideram que, em virtude das propriedades inerentes ao grafeno, este nanomaterial pode trazer inovação em setores específicos, como aqueles que desenvolvem baterias, por ser justamente ser um dos materiais mais finos e de ótima resistência mecânica.

Desse modo, uma vez utilizado como um de seus componentes, o carregamento das baterias se torna mais rápido, como apontado no Quadro 1. Isto se deve à sua estrutura única de camada de átomos de carbono de grafite, tornando-o 100 vezes mais eficiente que o cobre na condução de eletricidade. Além disso, o grafeno transfere energia 140 vezes mais rápido que o silício usado na bateria de lítio, ideal para carga rápida (VILLAS-BOAS, 2017).

Do exposto, observa-se a versatilidade do grafeno, considerado mais revolucionário que os materiais tradicionais. Para se ter mais uma ideia de sua capacidade, este pode substituir plenamente o silício, utilizado massivamente na fabricação de vários implementos tecnológicos. Essa substituição traria maior resistência, leveza, transparência e flexibilidade ao objeto produzido (WOODFORD, 2021).

4 GRAFENO: POSSÍVEIS APLICAÇÕES EM AERONAVES

O setor da indústria aeronáutica, em constante transformação, propicia a criação de materiais mais modernos e avançados. Nesta evolução, as propriedades dos materiais são desenvolvidas com vistas à sustentabilidade, leveza e alta resistência mecânica. Na esteira dessa ideias, estudiosos investigam elementos que sejam originados de fontes renováveis para que haja uma combinação de propriedades atrativas (HAHN, 1994). Assim, o grafeno e materiais que a ele se interligam certamente podem atender a estes requisitos.

Klotzel (2015) sugere que, em função de suas propriedades, o grafeno poderia substituir os compósitos e as ligas de alumínio em estruturas aeronáuticas, assim como as baterias e o revestimento de proteção contra agentes agressivos. A forma de construir aviões, portanto, pode ser melhorada com o emprego do material. É o que se verifica a seguir:

O grafeno pode desempenhar um papel em várias partes da aeronave. Pode tornar os materiais compostos simultaneamente fortes, resistentes, leves, flexível e elástico (pode ser esticado até 25% de seu comprimento original sem quebrar). A redução do peso da aeronave traz vantagens consideráveis: cada quilograma poupado economiza cerca de duas toneladas de combustível, evitando a emissão de seis toneladas de CO₂ ao longo da vida útil de uma aeronave (DIAMANTE, 2020, p. 1).

Além de aplicável a várias partes de uma aeronave, o grafeno também pode servir como proteção para metais, areia, chuva e alta radiação UV. Quando utilizado em um meio corrosivo, por exemplo, sua propriedade condutora interfere no processo de oxidação eletroquímica, amenizando a reação; com isso, as tintas com grafeno se tornarão cada vez mais necessárias em meios corrosivos devido à sua alta impermeabilidade, principalmente nas indústrias navais, eólicas e aeroespaciais (NOGUEIRA, 2021).

Ademais, o grafeno auxilia para que a camada química colocada sobre a superfície possa aderir de maneira mais eficiente. É importante destacar que o uso do grafeno deve ser feito com o auxílio de um segundo pigmento anticorrosivo. No Brasil, já se desenvolvem tintas com tais características e retardantes a chamas, produzidas pela empresa Galmebetech, sediada em Campinas; o novo produto nanotecnológico impede a propagação de chamas em superfícies (CASTRO, 2022). O novo material retardante de chamas da Galmebetech, batizado de *Exfoliated and Rearranged Graphite* (ERG) (grafite esfoliado e reorganizado), faz parte de uma plataforma de produtos da empresa integralmente baseados em celulose e grafite (CASTRO, 2022).

O grafeno tem, ainda, uma conduta térmica e elétrica que usa e adiciona funções inovadoras aos materiais, aumentando seu desempenho (MELO JUNIOR et al., 2012). Por esta razão, pode ser empregado em motores elétricos, sistemas de bordo, sensores elétricos, atuadores térmicos, processadores, entre outras aplicações.

Para que haja impulsos no campo tecnológico, há a necessidade de processadores mais rápidos, com habilidades qualitativas e quantitativas, mas também favoráveis aos ecossistemas. Posto isso, é sabido que os processadores de silício não passaram por avanços tecnológicos significativos desde meados dos anos 2000, já que dependem da natureza da matéria-prima utilizada (o silício) para que evoluções surjam. Esta não é a realidade do grafeno graças à sua alta capacidade de processar, armazenar e colaborar ambientalmente. Assim, ao comparar o silício ao grafeno, este em tese melhora a velocidade de processamento em mil vezes e exige um centésimo da energia utilizada por equipamentos baseados em silício (GALEON, 2017).

Outro aspecto relevante reside na menor poluição sonora. A utilização de grafeno na aviação, mais especificamente nos motores, prevê a redução de decibéis consideráveis na decolagem de aeronaves, algo por volta de 16 decibéis a menos, o que se compara a instrumentos domésticos diários, como uma furadeira (MINARI, 2021).

Considerando os impactos ambientais das baterias destinadas aos materiais aeroespaciais e a busca por alternativas à bateria química que combinem alto desempenho técnico com mínimo impacto ambiental (HANSSON et al. 2018), baterias construídas a partir

do grafeno podem ser uma possibilidade. Isto se deve ao fato de que estas baterias geram e armazenam energia limpa, utilizando recursos renováveis sem emissões (ROCHA, 2015). Ademais, são mais leves e promovem uma recarga mais rápida e eficiente (VILLAS-BOAS, 2017).

À vista disso, teste de voo com a utilização do grafeno em um protótipo de aeronave, o *Prospero* (Figura 2), pode iniciar uma era que interliga projetos de pesquisa e os efeitos desse material na redução de arrasto, no gerenciamento térmico (sendo um bom condutor térmico, já que conduz calor duas vezes melhor que o diamante) e na capacidade de tornar-se um bom condutor elétrico, assim evitando danos causados por raios. Por meio dos dados coletados desses voos iniciais em 2016, pode-se notar excelentes benefícios estruturais, redução de peso em estruturas compostas e em termos de resistência ao impacto, a nova asa com o grafeno está mostrando níveis aumentados de resistência ao impacto de até 60% em relação a uma asa de fibra de carbono convencional (MANCHESTER, 2016).

Essa discussão teve seu início em uma parceria firmada entre universidades inglesas, como a de Manchester, Central Lancashire, e várias pequenas e médias empresas (PMEs) em cooperação com a *Graphene Flagship*, buscando uma tecnologia potencialmente disruptiva em um mercado como o aeroespacial e ajudar a manter a posição do Reino Unido neste importante mercado (GRAPHENE FLAGSHIP, 2016; 2020).

Figura 2 – *Prospero* avião com asa de grafeno.



Fonte: Inovação Tecnológica (2016)

Considerando, portanto, a versatilidade do grafeno e sua capacidade de revolucionar a indústria e diversos setores, é importante conhecer sobre a produção dessas nanotecnologias e identificar quais países podem ser fomentadores desse tipo de tecnologia. Isto também implica verificar o potencial do Brasil frente a outros países que produzem grafeno, assunto estudado na próxima seção.

5 BRASIL E PRINCIPAIS PRODUTORES MUNDIAIS DE GRAFENO

Na última década, a China tem sido consistentemente o principal produtor global de grafite. Em 2021, este país produziu cerca de 820.000 toneladas métricas do material. O Brasil ocupa um distante segundo lugar, com o volume de produção estimado em 68.000 toneladas naquele ano. Apesar disso, o país que detém a maior reserva mundial de grafite natural do mundo, com aproximadamente 90 milhões de toneladas métricas, é a Turquia, seguida da China com 73 milhões e do Brasil, com 70 milhões de toneladas métricas (GARSIDE, 2022).

Verifica-se, portanto, que o Brasil se destaca como uma das maiores reservas de grafite natural, material que deriva do grafeno. Para obter esse acúmulo de grafite no território brasileiro, são exploradas as reservas localizadas em Minas Gerais, no Ceará e na Bahia. A matéria-prima farta e disponível em território nacional colabora para que haja estudos na área e investimentos no setor. Assim, em 2013, foram iniciadas as atividades do primeiro laboratório da América Latina destinado a estudos com grafeno, na Universidade Presbiteriana Mackenzie, em São Paulo, conhecido como Centro de Pesquisas Avançadas em Grafeno, Nanomateriais e Nanotecnologia (MackGrafe) (MARION; HASAN, 2016)

Com o intuito de investir na inserção do grafeno para melhorar a qualidade dos produtos e de materiais e isto, conseqüentemente, reverberar nas vidas das pessoas, o MackGrafe recebeu uma verba inicial de aproximadamente US\$ 15 milhões, destinada à construção de um novo prédio, contratação de cientistas, entre outros direcionamentos. O objetivo do laboratório é o de criar formas de resumir o grafeno, caracterizar e desenvolver dispositivos, principalmente ligados à fotônica (MACKGRAFE, 2015 apud MARION, HASAN; 2016).

Na esteira da Mackenzie, a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), por meio de um grupo de 30 pesquisadores dedicados a estudos na área do grafeno, realizou testes com o método *Chemical Vapor Deposition* (CVD) para produção do grafeno em porte industrial. Esta técnica possibilita a produção de um vapor de átomos de carbono que, quando colocados em um substrato de cobre, forma película de grafeno sobre o cobre (PIERRO, 2013).

Por outro lado, os experimentos feitos no Brasil ainda estão mais centralizados no estudo do desenvolvimento do material do que nos produtos. Isto se deve ao fato de que a efetiva criação de produtos que utilizam o grafeno tem maior interação entre empresas e centros de pesquisa e universidades, subsidiadas por investimentos privados para a inserção de descobertas novas no mercado (MARION; HASAN, 2016).

No que se refere à extração e produção de grafeno, a mineração é o setor principal, que, a partir da qualidade de processamento envolvido na extração, beneficia a grafita natural e, conseqüentemente, a qualidade do grafeno. Observa-se, portanto, que os processos de mineração e extração são cruciais para a qualidade do material. Desta forma, a incorporação das nanotecnologias no meio social causa impacto nos processos de produção de equipamentos, já que precisam de um grau de conhecimento elevado (RAMOS, 2021).

À vista disso, os constantes desafios e mudanças na economia mundial articulam-se com as estratégias de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) para inovações tecnológicas, que visam crescer na qualidade de processos do setor industrial, como a mineração. Assim, no caso do grafeno, é importante focar em ganho de eficiência operacional e sustentabilidade socioambiental na cadeia produtiva do novo material, da extração da grafita natural até seu desenvolvimento em laboratório (RAMOS, 2021).

Sobre a produção de grafeno, alguns países a desenvolvem em cooperação com o Brasil, quais sejam: o Canadá (produz energia limpa); os Estados Unidos da América (produzem energias renováveis); a China (produz materiais nanoestruturados, nanotubos de carbono, dispositivos eletrônicos nanoestruturados, produtos e materiais derivados de biomassa); e Portugal (colabora com a produção brasileira de grafeno por meio do Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) da Universidade de Campinas) (RAMOS, 2021).

Entretanto, a maior iniciativa de pesquisa mundial parte da União Europeia por meio da Comissão Europeia do sistema de regulação em nanotecnologia e da *Graphene Flagship*, cujo orçamento gira em torno de 1 bilhão de euros (RAMOS, 2021).

A *Graphene Flagship* tem parceiros comerciais como Airbus, Fiat, Lufthansa e Siemens. Entre as atividades da *Graphene Flagship*, estão os novos Projetos *Spearhead* que combinarão os resultados de sua pesquisa científica com aplicações comerciais progressistas. Com isso, a Europa tornou-se um exemplo de uso de resultados científicos incorporados à indústria. A *Graphene Flagship* é uma gigante do setor: coordena mais de 150 grupos de pesquisa acadêmica e industrial em mais de 20 países e tem mais de 90 membros associados e 31 projetos de parceria. Além disso, envolve mais de mil pesquisadores em 31 países da Europa (EUROPEAN COMMISSION, 2020).

Nesse aspecto, a exploração de grafita e o incentivo/investimento em pesquisas nanotecnológicas são uma realidade inquestionável. Assim, em países emergentes como o Brasil, a exportação de *commodities* – em especial a grafita – é prioridade ao lado de investimentos no desenvolvimento das tecnologias, sendo o caso do grafeno e das nanotecnologias a ele, fatores esses que movimentam a economia, acelerando o crescimento da nação e beneficiando, além do campo social, o setor aeronáutico também (MARION; HASAN, 2016).

Assim, o Brasil pode começar a investir na criação de produtos onde há o uso desse material, com a promessa de avanços consideráveis, por exemplo, em aeronaves, por meio da implementação de melhores processadores e potencialização de energia armazenada. Atualmente, apenas universidades estudam soluções para produzir grafeno em grande quantidade, ficando de lado a necessidade de explorar esse recurso pelo Estado. Sendo assim, as empresas brasileiras precisam identificar, em meio à crise, uma oportunidade de crescer e investir no material do futuro (MARION; HASAN, 2016).

Entende-se, para tanto, que se deve buscar por uma ligação maior entre as empresas privadas, setor público, centros de estudos/Universidades, pois essa colaboração auxilia na aceleração do processo de exploração da grafita e desenvolvimento do grafeno implantando-o na realidade cidadã (MARION; HASAN, 2016).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo discutiu sobre o material nanotecnológico grafeno e suas possíveis aplicações em aeronaves. Foram apresentadas as modalidades de nanotecnologias, assim como as propriedades do grafeno e sua estrutura, as aplicações bem-sucedidas desse material e o contexto nacional e internacional que o envolve, sobretudo, relacionado à produção e à pesquisa.

A pesquisa reforçou que o grafeno é material forte, resistente, leve, flexível, elástico, dotado de excelentes propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, ópticas, entre outras, e que tais propriedades podem substituir materiais já muito utilizados no mercado, tais como o silício. Entre suas aplicações, ele pode estar inserido nas áreas da nanoquímica à nanoengenharia, destacando-se os seguintes campos: água potável; meio ambiente; medicina e saúde; construção civil; e setores de beleza, energia, de eletrônicos, de mobilidade e da indústria aeronáutica.

A pesquisa também identificou que é viável o emprego deste material em aeronaves. Desta forma, confirmou-se que o grafeno poderá substituir materiais convencionais utilizados

em estruturas aeronáuticas (compósitos e liga de alumínio), bateria, revestimento, sensores, atuadores térmicos, protetores, processadores, além de ser capaz de reduzir o peso, promover a impermeabilização de peças e reduzir impactos ambientais relacionados a ruídos e emissão de CO₂.

Identificou-se, ainda, o desenvolvimento de um protótipo de aeronave que utiliza o grafeno, o *Prospero*, resultado de parcerias europeias. Tal aeronave apresentou redução de arrasto, gerenciamento térmico e de incidência de raios.

O estudo também apresentou que o Brasil é o segundo maior produtor de grafite (atrás da China) e possui a terceira maior reserva desse material no mundo (seguido da Turquia e China, respectivamente). Entretanto, apesar de o Brasil já desenvolver a produção do material em cooperação com outros países, os investimentos em pesquisas ainda são tímidos, comparados aos da União Europeia, que conta com mais de 1 bilhão de euros investidos. Além disso, os recursos nacionais ainda buscam o desenvolvimento do material, e não o de produtos.

Por fim, considerando o potencial do Brasil como produtor e dono de uma extensa reserva de grafite, sugere-se uma pesquisa voltada à Embraer, para verificar se esta empresa tem desenvolvido componentes aeronáuticos a base de grafeno.

REFERÊNCIAS

ALIVISATOS, A. P. Menos é mais na medicina. *Scientific American Brasil*, edição especial, n. 22, São Paulo, mar. 2004. p. 74-81. In: MARION B. M.; HASAN, N. Grafeno: inovações, aplicações e sua comercialização. **Interfaces Científicas – Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 2, n. 1, p. 29-40, 2016.

ALVES, O. L et al. Nanotecnologias: elas já estão entre nós. *Revista Ciência e Cultura*, v. 65, n. 3, São Paulo, jul. 2013. p. 22-23. In: MARION B. M.; HASAN, N. Grafeno: inovações, aplicações e sua comercialização. **Interfaces Científicas – Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 2, n. 1, p. 29-40, 2016.

ARAIA, E. Como Grafeno vai mudar sua vida. **Revista Planeta** [online]. 472. ed., jan. 2012. Disponível em: <https://www.revistaplaneta.com.br/como-grafeno-vai-mudar-sua-vida/>. Acesso em: 10 abr. 2022.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Panorama nanotecnologia**. Série Cadernos da Indústria. Brasília: ABDI, 2010.

BAIG, N.; KAMMAKAKAM, I.; FALATH, W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. **Materials Advances**, v. 6, n. 2, p. 1.821-1871, 2021.

BATISTA, C. Grafeno. 2022. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/grafeno/>. Acesso em: 08 de mar. 2022.

CADIOLI, L. P; SALLA L. D. Nanotecnologia: um estudo sobre seu histórico, definição e principais aplicações desta inovadora tecnologia. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 1, n. 1, p. 98-105, 2006.

CASTRO, F. de. **Tinta retardante de chamas impede a propagação do fogo até mesmo em madeira**. 2022. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/tinta-retardante-de-chamas-impede-a-propagacao-do-fogo-ate-mesmo-em-madeira/38576/>. Acesso em: 18 de maio de 2022.

DIAMANTE, L. **Graphene takes off for sustainable aviation**. 2020. Disponível em: <https://graphene-flagship.eu/graphene/news/graphene-takes-off-for-sustainable-aviation/>. Acesso em: 1 mar. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **European industries lead new Graphene**. 2020. Disponível em: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/european-industries-lead-new-graphene-flagship-commercialisation-projects>. Acesso em: 20 maio 2022.

FARIAS, P. M. A. et al. **CdS nanoparticles: structural and energetical correlations**. *Materials Chemistry and Physics*, v. 89, p. 21–27, 2005a.

FARIAS, P. M. A. et al. Core-shell CdS/Cd(OH)(2) quantum dots: synthesis and bioconjugation to target red cells antigens, **Journal of Microscopy-Oxford**, v. 219, p. 103-108, 2005b.

GALEON, D. **Graphene computers work 1000 times faster, use far less power**. 2017. Disponível em: <https://futurism.com/graphene-computers-work-1000-times-faster-use-far-less-power>. Acesso em: 27 abr. 2022.

GARSIDE, M. **Reserves of graphite worldwide in 2021**. 2022. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/267367/reserves-of-graphite-by-country/#statisticContainer>>. Acesso em: 27 abr. 2022.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. **Nature Mater**, v. 6, 2007. p. 183-191.

GEIM, A. K. Graphene: status and prospects. **Science**, v. 324, 2009. p. 1530 -1543.

GRAPHENE FLAGSHIP. **Flying start for world's first graphene-enhanced aircraft**. 2016. Disponível em: <https://graphene-flagship.eu/graphene/news/flying-start-for-world-s-first-graphene-enhanced-aircraft/>. Acesso em: 20 abr. 2022.

GRAPHENE FLAGSHIP. **Graphene composites enable the aviation industry to gain altitude**. 2020. Disponível em: <https://graphene-flagship.eu/graphene/news/graphene-composites-enable-the-aviation-industry-to-gain-altitude/>. Acesso em: 16 maio 2022.

HAHN, S. Os papéis da ciência dos materiais e da engenharia para uma sociedade sustentável. **Estudos Avançados [online]**. v. 8, n. 20, p. 36-42, 1994. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/gY6LTM7LgHF5554hj4xNNYN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 abr. 2022.

HANSSON, N. et al. **Environmental impacts of aerospace batteries**. 2018. Disponível em: <https://www.boeing.com/features/innovation-quarterly/aug2018/btj-batteries.page>. Acesso em: 20 maio de 2022.

IBERDROLA. Nanotecnologia: **uma pequena solução para grandes problemas**. 2022. Disponível em: www.iberdrola.com. Acesso em: 18 abr. 2022.

INFOPÉDIA (DICIONÁRIO PORTO EDITORA). **Fulereno**. 2022. Disponível em: [https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$fulereno](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$fulereno). Acesso em: 10 mar. 2022.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Primeiro teste de um avião com asa de grafeno. 2016. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=aviao-asa-grafeno&id=010170161201#.YrmRpHbMKU1>. Acesso em: 10 maio 2022.

KLOTZEL, E. **Construção do avião do futuro**. 2015. Disponível em: https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/construcao-do-aviao-do-futuro_2112.html. Acesso em: 16 out. 2020.

NOGUEIRA, L. **Proteção ecologicamente correta contra corrosão a partir de aditivos de grafeno**. 2021. Disponível em: <https://engenharia360.com/protacao-sustentavel-corrosao-grafeno/>. Acesso em: 18 mar. 2022.

MARION B. M.; HASAN, N. Grafeno: inovações, aplicações e sua comercialização. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 2, n. 1, p. 29-40, 2016.

MACKGRAFE Mackenzie. **Sobre**. Disponível em: http://mackgraphe.mackenzie.br/mackgraphe_about.html?&L=1. Acesso em: 4 maio 2015.

MARION B. M.; HASAN, N. Grafeno: inovações, aplicações e sua comercialização. **Interfaces Científicas – Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 2, n. 1, p. 29-40, 2016.

MANCHESTER (University). **The story of graphene**. Disponível em: <http://www.graphene.manchester.ac.uk/explore/the-story-of-graphene/>. Acesso em: 2 maio 2022.

MANCHESTER (University). **World's first flight of graphene-skinned aircraft to take place at Farnborough Air Show**. 2016. Disponível em: <https://www.manchester.ac.uk/discover/news/worlds-first-flight-of-graphene-skinned-aircraft-to-take-place-at-farnborough-air-show/>. Acesso em: 2 maio 2022.

MELO JUNIOR., M. A. et al. Preparação de nanopartículas de prata e ouro: um método simples para a introdução da nanociência em laboratório de ensino. **Química Nova [online]**, v. 35, n. 9, p. 1872-1878, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/wfcctywf33BdvbMBYmCxPg/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 abr. 2022.

MINARI, G. **Isolante acústico mais leve do mundo promete deixar aviões menos barulhentos**. 2021. Disponível em: <https://canaltech.com.br/inovacao/isolante-acustico-mais->

leve-do-mundo-promete-deixar-avioes-menos-barulhentos-188010/. Acesso em: 20 maio 2022.

MITSUBISHI MATERIALS. **Os céus estão fervilhando em plena atividade.** (s.d.). Disponível em:

<http://www.mmbr-carbide.com.br/magazine/article/vol01/market>. Acesso em: 22 mar. 2022.

PIERRO, Bruno de. **O grafeno e seus desafios.** 2013. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/o-grafeno-e-seus-desafios/>>. Acesso em: 28 abr. 2022.

RAMOS, R. M. Produção do grafeno a partir da grafita natural. **Revista HOLOS**, Ano 37, v. 2, p. 1-12, 2021.

ROCHA, J. P. M. da. **Grafeno como fonte de energia renovável:** um estudo prospectivo. 2015. Monografia (Graduação em Administração) – Universidade de Brasília, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Brasília. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/16089/1/2015_JoaoPedroMagalhaesDaRocha_tcc.pdf. Acesso em: 25 abr. 2022.

SCHULZ, P. Nanotecnologia: uma história um pouco diferente. 2013. *In:* MARION B. M.; HASAN, N. Grafeno: inovações, aplicações e sua comercialização. **Interfaces Científicas – Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 2, n. 1, p. 29-40.

SANT ANNA, J. P. **Cerâmica:** nanopartículas permitem fórmulas inovadoras. 2005. Disponível em: <https://www.quimica.com.br/ceramica-nanoparticulas-permitem-formulas-inovadoras/>. Acesso em: 25 mar. 2022.

SOUTO, E. B.; SEVERINO, P; SANTANA, M. H. A. Preparação de nanopartículas poliméricas a partir da polimerização de monômeros: parte I. **Polímeros: Ciência e Tecnologia [online]**, v. 22, n. 1, p. 96-100, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/sRbyFZVWkPSbzkKMwZpQSkN/?lang=pt>. Acesso em: 2 maio 2022.

SOUTO, E. B. et al. Nanopartículas de lipídios sólidos: métodos clássicos de produção laboratorial. **Química Nova [online]**, v. 34, n. 10, P. 1762-1769, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/ytQYBxHbbs5yTRJPw7qxCvt/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 mar. 2022.

VILLAS-BOAS, A. **Samsung's new battery technology could charge smartphones in minutes, not hours.** 2017. Disponível em: <https://www.businessinsider.com/samsung-graphene-smartphone-batteries-could-charge-in-minutes-2017-11?r=US&IR=T>.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis? **Química Nova [online]**, v. 36, n. 10, p. 1533-1539, 2013. Disponível em: <http://old.scielo.br/pdf/qn/v36n10/09.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2022.

VIEIRA SEGUNDO, J. E. D.; VILAR, E. O. Grafeno: uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. Campina Grande, **Revista Eletrônica de Materiais e Processo**, v. 11, n. 2, p. 54-57, 2016.

WOODFORD, C. **Graphene:** a simple introduction. 2021. Disponível em: <https://www.explainthatstuff.com/graphene.html>.