



## **O IMPACTO DOS NANOMATERIAIS DE CARBONO NA INDÚSTRIA NUCLEAR: AS APLICAÇÕES DO GRAFENO**

**Araujo Vieira, Marcus Vinicius<sup>1</sup>, Araujo-Moreira, Fernando M.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Seção de Engenharia Nuclear (PPGEN)- Instituto Militar de Engenharia (IME), 22290-270, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

**Palavras-Chave:** Grafeno, Nuclear, Nanomateriais

### **RESUMO**

O grafeno é um material que vêm sendo alvo de diversas pesquisas devido as suas propriedades únicas, como alta condutividade e leveza, que o tornam um material promissor para aplicações em dispositivos nucleares. O grafeno faz parte de um grupo de materiais denominado de nanocarbonos, nessa família além do grafeno, fazem parte dela o óxido de grafeno, as nanoplacas de grafeno, e o óxido de grafeno reduzido. No contexto da indústria nuclear, o grafeno e suas outras formas, têm sido utilizados em transistores, dosímetros e nano compósitos com foco em blindagens, demonstrando assim que esse material pode contribuir na eficiência e durabilidade de dispositivos nucleares, embora ainda sejam necessárias mais pesquisas para a otimização de sua aplicação no campo nuclear. O objetivo desse artigo é o de apresentar e divulgar as pesquisas relacionadas com a área nuclear e o material grafeno, afim de demonstrar que esse material pode ser correlacionado com a área nuclear. Para a realização desse artigo, fez-se necessário realizar buscas em sites, revistas e jornais especializados no assunto para demonstrar assim a correlação do material com a área nuclear. Os resultados que serão apresentados são resultados de publicações que já foram reconhecidos por pares, e com isso demonstrar que o grafeno pode ser utilizado em diversas subáreas do setor nuclear. Além disso, analisa-se que existe a necessidade contínua de mais pesquisas e estudos para otimizar a aplicação do grafeno nesse campo, visando melhorar a eficiência e durabilidade dos dispositivos nucleares. Por fim, observa-se a relevância desse artigo devido ao fato de apresentar e divulgar as pesquisas que evidenciam a correlação entre o grafeno e a indústria nuclear, contribuindo para o avanço e desenvolvimento dessa área.

### **1. INTRODUÇÃO**

Quando se fala sobre o material grafeno, considera-se que é um material em que sua composição é composta apenas por uma camada de átomos de carbono, que possui em sua separação uma estrutura de massa de grafite. Além disso, sua forma planar é a mais básica e a mais conhecida, sendo que o seu arranjo geométrico tem formato hexagonal plano e essa estrutura só é obtida por causa das três fortes ligações atômicas. Há décadas, muitos cientistas estudam esse material, descobrindo sua versatilidade e aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento. O fato de poder ser aplicado em diversas áreas se deve por conta das suas características de alta condutividade elétrica e térmica, além de ter grande resistência mecânica e flexibilidade. Atualmente tem-se diferentes formatos de grafeno, que quando agrupados são relacionados como Materiais Relacionados ao Grafeno (GRM). Considera-se GRM o óxido de grafeno, as nanoplacas de grafeno, o óxido de grafeno reduzido e o grafeno funcionalizado ou quimicamente modificado.

O que torna esse material objeto de vários estudos são as suas múltiplas aplicações impulsionadas por características marcantes, como a elevada condutividade térmica e elétrica. Essas propriedades tornam o grafeno ideal para dispositivos de detecção, garantindo eficiência e durabilidade graças a resistência e leveza do material. Além disso, sua impermeabilidade possibilita seu uso em gases e líquidos, tornando-o valioso em revestimentos.

Assim como o grafeno, a área da quântica vem tendo um apelo notável nos estudos, acredita-se que agregando o material a área de pesquisa quântica, se tenha diversas aplicações na indústria nuclear, sendo os sensores uma dessas aplicações. Com isso, este artigo visa apresentar e divulgar as pesquisas relacionadas com a área nuclear e o material grafeno, afim de demonstrar que os GRM podem ser correlacionados com a área nuclear.

### 1.1. Grafeno

O estudo do grafeno remonta à década de 1940, e foi intensificado por volta de 2004 quando Novoselov et al. (2004) desenvolveram a pesquisa que conseguiu isolar uma folha, que tinha espessura atômica e era composta por carbono “hexagonal”. A rede hexagonal se deve pelo fato de existir apenas uma camada de átomos de carbono, onde esses átomos estão ligados em três outros átomos de carbono a partir de ligações covalentes  $sp^2$ , esse formato de ligação gera uma estrutura com alto grau de estabilidade e resistência. Na estrutura atômica além da rede hexagonal, pode-se observar que existe nesse material as ligações “pi” conjugada, essas ligações contribuem para a alta condutividade elétrica do grafeno. O uso do grafeno vem representando melhorias tecnológicas para a indústria, onde se pode observar tanto seu uso quanto sua substituição em materiais existentes. A alta mobilidade de elétrons é benéfica para o grafeno fazendo com que esse material tem uma vasta aplicabilidade em dispositivos eletrônicos. O grafeno é um material de excepcional condutividade térmica, isso significa que o calor propaga com rapidez através desse material.

Atualmente consegue-se obter grafeno através de 4 principais processos, que são: esfoliação química, a deposição química da fase vapor ou CVD, esfoliação micromecânica e por fim através do crescimento de grafeno em carbeto de silício (SiC), na figura 1 pode-se observar esses processos.

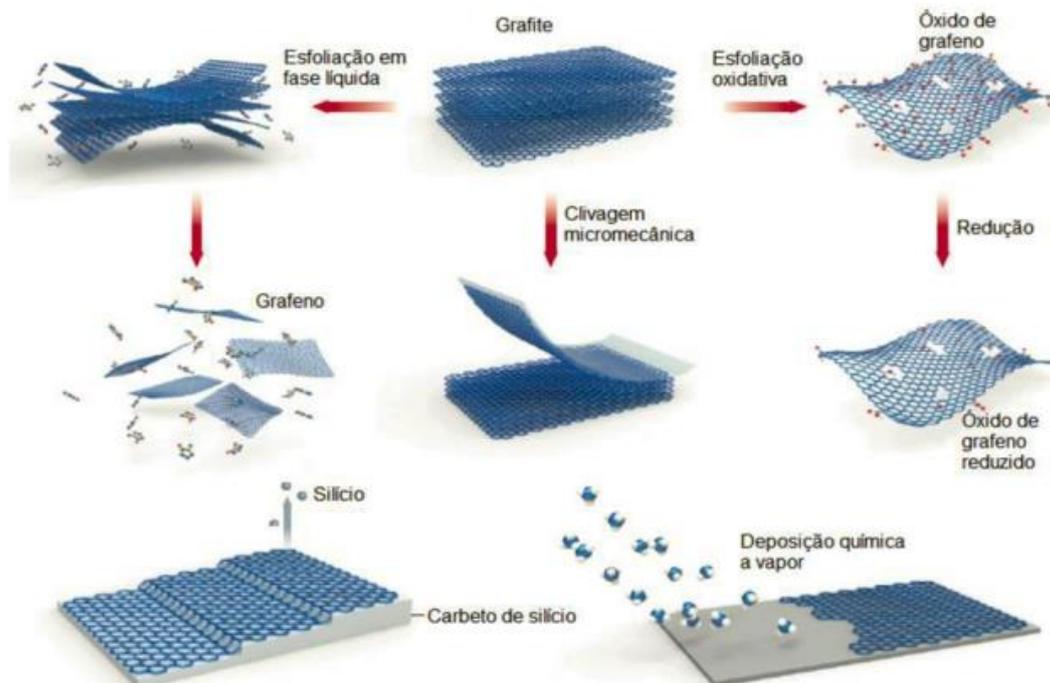


Figura 1: Esquemático das principais rotas de produção do grafeno  
Fonte: Adaptado de Wang et al. (2017).



Embora esse material seja estudado há décadas, ele ainda necessita de pesquisas na área de fabricação, tendo em vista que sua aquisição é extremamente cara e complexa, e também se projeta como um desafio devido à sua estabilidade química. Por conta disso, a indústria vem desenvolvendo outras formas de utilizá-lo, por meio da modificação desse material.

### 1.2. Óxido de grafeno

O óxido de grafeno (OG) é um material de grande expressão, neste material existem características semelhantes às do grafeno, mas o OG tem um custo menor quando comparado ao custo do grafeno. No OG, pode-se notar uma semelhança com uma folha de espessura de carbono atômico.

Os OGs são estruturas que derivam do grafeno e nelas observa-se a presença de grupos funcionais oxigenados (hidroxila, carbonila e epóxi), sua vantagem é ter melhor solubilidade e estabilidade em meio aquoso [1].

Pode-se considerar o óxido de grafeno como isolante, quando observado as suas propriedades eletrônicas, além delas analisa-se também a sua permeabilidade que é seletiva ou pode ser ajustada. Com isso, nota-se que é um material de alto desempenho, que pode ser escalável, é possível obter um material isolante e disperso em água, tornando assim um material com vantajosas características. Deve-se notar que seu manuseio pode gerar reações perigosas, pois inclui o uso de ácidos e oxidantes fortes, é uma obtenção de alto custo e, finalmente, requer lavagem excessiva com água [2].

### 1.3. Pontos quânticos

Esse tema tem grande importância para o mundo, tanto que no ano de 2023 Alexei I. Ekimov, Louis E. Brus e Moungi Bawendi, receberam o Prêmio Nobel de química. Eles foram responsáveis pela descoberta bem como pelo desenvolvimento dos pontos quânticos, essa tecnologia tende a ter inúmeras aplicações e em diversas áreas. Os pontos quânticos são nanopartículas ou nanocristais que podem ser compostos de materiais inorgânicos ou orgânicos. Estes materiais possuem características ópticas que podem ser relacionados ao processo sintético, com isso é possível alcançar certas propriedades através de pequenos ajustes.

Os atributos dos semicondutores nano cristalinos, ou seja, elementos que são portadores de carga (elétrons) quando em um estado de forte confinamento, que é chamado de confinamento quântico. Este confinamento é assim denominado devido às suas dimensões físicas, é nele que se realiza a absorção e emissão em espectroscopia visível. O confinamento quântico é causado a partir do momento em que o tamanho físico do semicondutor está abaixo do raio de Bohr do éxciton, sendo esse raio a distância média entre o elétron e o buraco. O que foi observado no confinamento quântico é que quanto menor o material, maior o confinamento dos portadores de carga e maior a energia na banda proibida. Esse efeito de tamanho pode ser analisado na figura 2, tem-se então a representação dos pontos quânticos em relação à variação da energia da banda proibida em relação ao tamanho da partícula. Assim, pode-se afirmar que a absorção e emissão óptica dos materiais está relacionada ao tamanho desse material [3].



Figura 2: Representação dos Pontos quânticos

Fonte: Santos et al., 2020 [3]

Existe uma dependência dos pontos quânticos não só do tamanho, mas também do material, o foco deste artigo é o grafeno e com isso não haverá citação de outros materiais, mesmo que seja possível utilizá-los em pontos quânticos.

#### 1.4. Radiação e Nuclear.

A área nuclear tem ampla aplicação em tecnologias. Uma demonstração disso é o seu uso em diversos setores como: gerar energia elétrica, realizar exame de imagem, realizar tratamentos de saúde, aplicar em equipamentos de sensoriamento, entre outras aplicações.

A energia nuclear pode ter sua energia sendo liberada através de dois processos: fissão ou fusão nuclear. Quando é realizado o processo de fissão nuclear, significa que houve uma quebra de núcleos pesados em núcleos menores, e por conta dessa quebra se tem a liberação de energia. Já o processo de fusão nuclear, ocorre quando se tem a combinação de núcleos leves com o propósito de se formar um núcleo mais pesado e, com isso, é liberado energia. A radiação pode ser obtida de duas maneiras, de fontes naturais ou de fontes artificiais. Quando se fala em fontes naturais entende-se como radiação cósmica aquela que as partículas de alta energia chegam até a terra advindas do sol, ou quando se é obtido radiação através de rochas e solos, como por exemplo o que ocorre com o Urânio e o Tório, que são rochas onde através de sua decomposição se tem emissão de radiação. Já quando se fala em fontes artificiais significa que houve um processo de manipulação e controle dos materiais radioativos, a emissão não ocorre de forma natural e sim sendo um subproduto de reações nucleares tal como a fissão, ou como o decaimento de materiais radioativos. Os radionuclídeos são entendidos como átomos instáveis que emitem radiação, essa emissão ocorre a partir de um processo de decaimento espontâneo. Tubos de raios X, aceleradores de partículas e, finalmente, reatores nucleares são considerados fontes artificiais [4].

A radiação impacta na saúde do ser humano, com isso seu uso na saúde é realizado através de medições na quantidade de uso, existem valores de dose para que o tratamento ou a realização de um exame não se torne prejudicial. É a partir desse contexto de quantidade, que a medicina nuclear é utilizada para empregar doses controladas em pacientes. Com isso, é possível, por meio do diagnóstico por imagem, avaliar órgãos e tecidos da melhor forma, ou até mesmo ser utilizado no tratamento de células cancerígenas.



As doses de radiação são usadas de forma segura em dispositivos de diagnóstico por imagem, como os raios x, e as tomografias computadorizadas. No caso do raio X o aparelho emite um feixe de radiação que atravessa o corpo e é captado por um detector ou filme do outro lado do corpo. Uma radiografia padrão tem uma taxa de dose de em torno 0,1 a 0,2 mSv, essa taxa varia de acordo com a área do corpo, esses valores são considerados como uma baixa taxa de dose. Quando se fala em tomografia, a taxa de dose é maior quando comparada com a recebida quando é realizado o raio x. Assim como no raio x a dose da tomografia sofre variação devido a área do corpo ao qual ela é aplicada. De acordo com o estudo obtido, a dose efetiva da tomografia para as regiões do crânio, tórax, abdômen e pelve fora, respectivamente,  $2,5 \pm 0,0$  mSv;  $6,8 \pm 0,0$  mSv;  $5,6 \pm 0,1$  mSv;  $4,3 \pm 0,1$  mSv.

Além do controle de dose, outro ponto de segurança é utilizar os protocolos de exposição. São considerados protocolo de exposição a justificativa do exame e uma minimização da dose. Na justificativa do exame, o médico avalia se o benefício da exposição do paciente é maior do que o risco de exposição à radiação. Já quanto a minimização da dose, utiliza-se de modulação da dose ajustando então a intensidade do feixe de raios X tendo como base o local que será realizado o exame, além disso se utilizam de filtros para que seja reduzido a radiação e também se faz uso de colimadores para que o feixe esteja focado na área que será analisada, e então não haja a dispersão para outras áreas. Quanto a proteção dos pacientes e dos operadores, utiliza-se então de blindagens, seja ela uma blindagem física ou até mesmo aventais de chumbo para proteger áreas sensíveis do corpo. Por fim, faz-se necessário um monitoramento e controle da exposição à radiação, onde com isso consegue-se garantir doses precisas e seguras.

## 2. METODOLOGIA

Esse artigo é considerado um ensaio teórico, apoiado por pesquisa bibliográfica, breve estudo de caso e cognição sumária de aspectos de Ciência, Tecnologia, Inovação e Gestão, com foco nos estudos já realizados sobre o grafeno e o setor de tecnologias quânticas. O estudo tem um viés qualitativo e exploratório, corroborando com as informações coletadas em eventos científicos e comerciais na área nuclear. Pretende-se com esse estudo contribuir para a formulação de propostas, para o estabelecimento e institucionalização de formas de pesquisa colaborativa do setor das ciências e tecnologia, além de viabilizar o desenvolvimento de pesquisa de ensino. Na escrita desse artigo foram utilizados diversos artigos e trabalhos já publicados, afim de demonstrar a importância da junção desses assuntos no setor nuclear.

## 3. DISCUSSÕES

Para pesquisas relacionadas a grafeno e pontos quânticos, uma variedade de resultados foram obtidos, demonstrando assim o potencial de aplicação desse material. Os pontos quânticos de grafeno (PQGs) produzem intensa fotoluminescência, devido ao seu resultado de confinamento quântico. Os pontos quânticos de grafeno possuem características de baixa toxicidade, quando na água possuem dispersões altamente estáveis, possuem também interação química rápida e propriedades ópticas estáveis e essas propriedades se tem quando em comparação com os pontos quânticos semicondutores.

Em 2021, o *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) realizou uma pesquisa em que o grafeno de três camadas sofre torção até um determinado ângulo, exibindo assim supercondutividade com altos campos magnéticos. Esse material, descoberto e analisado pelo grupo, teria a capacidade de melhorar os equipamentos de ressonância magnética, assim como esse material poderia ser aplicado a um computador quântico. O que foi observado é que a



supercondutividade desse material de três camadas é incomum e que, quando empilhada e torcida em um ângulo específico, pode dar origem a comportamentos eletrônicos grandiosos. Inicialmente, foram estudadas as propriedades de duas folhas de grafeno, e assim que foram notadas propriedades curiosas, os testes foram alterados para uma configuração de três folhas de grafeno e essas tricamadas mostraram ter mais resistência e maior supercondutividade, quando expostas a altas temperaturas, do que a bicamada. Por fim, a equipe demonstrou interesse em aprofundar os estudos desse material, dada a sua grande possibilidade de aplicação [5].

Foi realizada uma pesquisa onde pontos quânticos intrinsecamente radioativos foram usados para dispositivos de imagem óptica e tomografia por emissão de pósitrons (PET). Os pontos quânticos foram preparados para que, assim que fossem excitados, o efeito cerenkov fosse gerado e, por isso, a luz azul fosse gerada. Nesta pesquisa, foi demonstrado o potencial de uso para bioimagem de pontos quânticos em instrumentos PET, além disso este material demonstrou ter um melhor resultado para captura tumoral, o que se torna um ponto positivo para o material [6].

Em um estudo realizado em meados de 2017, pontos quânticos sulfônicos-grafenos sintéticos (sulfônicos-GQDs) foram produzidos para atingir com precisão os núcleos de células cancerígenas in vivo, sem que houvesse a necessidade de modificações adicionais em bioligantes ou alguma intervenção em tecidos normais. A chave para essa seletividade se deu por conta da alta pressão do fluido intersticial (IFP) nos tumores, o que facilita a penetração dos sulfônicos-GQDs na membrana plasmática das células tumorais. Em contraste, in vitro, os sulfônicos-GQDs são repelidos pela membrana celular devido à força repulsiva entre os GQDs carregados negativamente e as membranas das células normais, resultando em baixa distribuição em tecidos não tumorais. No entanto, a penetração através da membrana pode ser facilitada incubando as células em meio de cultura ultrafino, que fixa os sulfônicos-GQDs nas membranas celulares. Simulações de dinâmica molecular indicam que, uma vez dentro da célula, os grupos funcionais carregados negativamente dos GQDs promovem uma função de autolimpeza, permitindo a penetração dos GQDs através da membrana nuclear. O estudo revela o IFP como um mecanismo inexplorado para direcionamento específico de núcleos de células tumorais e sugere que os sulfônicos-GQDs têm potencial para desenvolver novas ferramentas para imagem e terapia direcionada ao tumor [7].

Os pesquisadores obtiveram um novo nano compósito de óxido de grafeno reduzido marcado com pontos quânticos altamente inflamado (QD-rGO), este novo nano compósito prometia trazer capacidade de não toxicidade junto com possível uso em bioimagem celular / tumoral com terapia fototérmica. A forma como esta produção foi realizada fez com que este material contornasse alguns problemas anteriormente relatados quando da utilização de determinados materiais. Após a modificação química, foi possível obter a ligação dos pontos quânticos ao óxido de grafeno reduzido (rGO), a fim de melhorar a dispersão e ter adesão da superfície da rGO. Também foi possível ter uma boa fluorescência neste composto, e notou-se que alterando a quantidade de ponto quântico, se tiver outras cores, as amostras foram consideradas estáveis, mas obtiveram uma pequena perda de fluorescência em 24 horas. Por fim, vale ressaltar que o grupo obteve sucesso na obtenção de um novo nano compósito de baixa toxicidade e que sua finalidade é para uso como agente de imagem na região da luz visível e agente fototérmico para terapia do câncer. Eles também demonstraram que os pontos quânticos eram essenciais para a manutenção da célula, uma vez que apenas o rGO irradiado poderia causar a morte celular, enquanto com os pontos quânticos foi possível observar a dosagem e o progresso da terapia [8].

Finalmente, com base na pesquisa apresentada na AtomExpo 2016, pode-se concluir que o grafeno pode ser usado no meio nuclear não apenas como pontos quânticos. Nesta pesquisa,



constatou-se que apenas o material grafeno, quando utilizado na quantidade de 1 grama, poderia ser capaz de reduzir o volume de rejeitos radioativos em 90%, além disso verificou-se que pode ter uma cobertura de 200 a 400 metros quadrados de área. De acordo com esta mesma pesquisa, é possível reduzir um galão de 900 litros de resíduos para 90 litros de resíduos, tendo assim uma maior capacidade de armazenamento de resíduos radioativos. Além disso, observou-se que a área do grafeno pode ser detectável como um agente fluorescente, tornando-se assim um marcador de qualidade [9].

#### 4. CONCLUSÃO

O grafeno é um material que possui inúmeras aplicações em diversas áreas. O que pode ser observado neste trabalho é que os pontos quânticos do grafeno, devido à sua capacidade de luminescência, têm grandes aplicações nas áreas da saúde. Os estudos encontrados abordaram sua capacidade de não toxicidade, bem como boa aceitação quando combinada com outros componentes químicos. De modo geral, os estudos apresentaram PQG como um material promissor para a área da saúde. Além disso, ao analisar diversos estudos, inclusive o do MIT, é possível observar que o grafeno não é um supercondutor comum, bem como que esse material pode ser aplicado em diversos setores da energia nuclear, demonstrando assim que se trata de um material de altíssima capacidade de implementação em projetos existentes de sensoriamento e de diagnósticos por imagem. Por fim, pode-se analisar que o material de grafeno se mostra promissor quando utilizado em resíduos radioativos, então pode ser que esse material resolva um problema nuclear, que são as questões ambientais

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e o apoio do Instituto Militar de Engenharia (IME).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Camargos, J. et al., “ Características e aplicações do grafeno e do óxido de grafeno e as principais rotas para síntese”, The journal of Sidney Nicodemus da Silva, v.3, pp. 1118-1130 (2017).
- [2] DAVIES, P. et al. Summary of Graphene (and Related Compounds) Chemical and Physical Properties. [s.l.: s.n.]. Available at: <[https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a82eb7340f0b6230269d634/Summary\\_of\\_Graphene\\_and\\_Related\\_Compounds\\_Chemical\\_and\\_Physical\\_Properties.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a82eb7340f0b6230269d634/Summary_of_Graphene_and_Related_Compounds_Chemical_and_Physical_Properties.pdf)>.
- [3] SANTOS, C. et al. SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE PONTOS QUÂNTICOS AMBIENTALMENTE AMIGÁVEIS, UM MEIO SIMPLES DE EXEMPLIFICAR E EXPLORAR ASPECTOS DA NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA EM CURSOS DE GRADUAÇÃO. Química Nova, 2020.
- [4] ALVES, G. Abordagem ctsa no ensino de Física nuclear: reflexões iniciais sobre uma intervenção didática na desmistificação do uso das radiações. repositorio.ifpe.edu.br, 7 fev. 2024.
- [5] PARK, J. M. et al. Tunable strongly coupled superconductivity in magic-angle twisted trilayer graphene. Nature, v. 590, n. 7845, p. 249–255, 1 fev. 2021.



- [6] GUO, W. et al. Intrinsically Radioactive  $[^{64}\text{Cu}]\text{CuInS}/\text{ZnS}$  Quantum Dots for PET and Optical Imaging: Improved Radiochemical Stability and Controllable Cerenkov Luminescence. v. 9, n. 1, p. 488–495, 2 jan. 2015.
- [7] YAO, C. et al. Tumor Cell-Specific Nuclear Targeting of Functionalized Graphene Quantum Dots In Vivo. *Bioconjugate Chemistry*, v. 28, n. 10, p. 2608–2619, 6 out. 2017
- [8] HU, S.-H. et al. Quantum-Dot-Tagged Reduced Graphene Oxide Nanocomposites for Bright Fluorescence Bioimaging and Photothermal Therapy Monitored In Situ. *Advanced Materials*, v. 24, n. 13, p. 1748–1754, 16 mar. 2012.
- [9] Pesquisa inédita do IEN usa grafeno no tratamento de rejeitos radioativos líquidos. Available at: <[https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/ultimas-noticias/pesquisa\\_inedita-do-ien-usa-grafeno-no-tratamento-de-rejeitos-radioativos-liquidos](https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/ultimas-noticias/pesquisa_inedita-do-ien-usa-grafeno-no-tratamento-de-rejeitos-radioativos-liquidos)>. Accessed on: 26 apr. 2024.
- [10] WANG, X.; NARITA, A.; MÜLLEN, K. Precision synthesis versus bulk-scale fabrication of graphenes. *Nature Reviews Chemistry*, v. 2, 2017.