



Análise do Grafeno Segundo sua Utilização na Construção Civil Seguindo os Conceitos Sustentáveis.

Gabriel Anniboletti Santos¹, Thiago Thielmann de Araújo²

¹Universidade Veiga de Almeida (UVA)

Rio de Janeiro, BR

²Universidade Veiga de Almeida (UVA)

Rio de Janeiro, BR

`gabriel.anni.trabalho@gmail.com, thiagoaraujothg@uva.br`

Abstract. *Graphene is a composite discovered in 2004 by the University of Manchester. It is still not a widespread material, thus this work aims to publicize the importance of the material and its respective relationship with sustainability not only for civil engineering but also for society as a whole. A bibliographic review on graphene material was adopted as a methodology to achieve the objective of this work. It was concluded that graphene is a very promising composite for civil engineering, however, there are still no studies that prove its effectiveness and sustainability from its extraction to its disposal. Investments in research must be made, making it possible to reach its potential as quickly as possible, however, such advances will not be viable without awareness of the population and companies.*

Resumo. *O grafeno é um compósito descoberto em 2004 pela Universidade de Manchester. Ele ainda é um material pouco difundido, e com isso o trabalho tem como objetivo divulgar a importância do material e sua respectiva relação com a sustentabilidade não só para a engenharia civil como também para toda a sociedade. Foi adotada uma revisão bibliográfica sobre o material grafeno como metodologia para se atingir o objetivo deste trabalho. Concluiu-se que o grafeno é um compósito muito promissor para a engenharia civil, entretanto, ainda não há estudos que comprovem sua eficácia e sustentabilidade desde sua extração até seu descarte. Devem ser feitos investimentos em pesquisas, possibilitando alcançar seu potencial o mais rápido possível, porém, tais avanços não serão viáveis sem conscientização da população e das empresas.*

1. Introdução

O grafeno é um compósito descoberto em 2004 pela Universidade de Manchester. A descoberta deste compósito rendeu aos Pesquisadores André Geim e Konstantin Novoselov o prêmio Nobel de física em 2010.



Atualmente, o material já se encontra na fase de utilização em materiais como telhas, painéis solares e baterias. No entanto, o grafeno ainda é um material pouco difundido, sendo necessário que sejam feitos trabalhos relacionados à documentação das características estudadas de forma abrangente, olhando inclusive para seu ciclo de vida.

O trabalho tem como objetivo divulgar a importância do material e sua respectiva relação com a sustentabilidade não só para a engenharia civil como também para toda a sociedade. Foi adotada uma revisão bibliográfica sobre o material grafeno como metodologia para se atingir o objetivo deste trabalho.

Inicia-se o artigo tratando dos avanços tecnológicos, apresentando o carbono, a nanotecnologia e o grafeno - assunto central do presente trabalho - fornecendo o conhecimento prévio necessário para as discussões posteriores. O artigo ainda se propõe a tratar dos métodos de síntese dos alótropos de carbono, entretanto, cumpre destacar que estes métodos ainda não são ideais para o meio ambiente, porém, podem ser utilizados de forma segura em escala laboratorial.

Ao final do artigo, busca-se tratar da sustentabilidade do grafeno perante a engenharia civil, apontando os riscos existentes, mas também os benefícios trazidos pelo grafeno para os materiais utilizados na construção civil e o Flash Joule, método de síntese sustentável que permite extrair grafeno utilizando recursos descartados na natureza.

2. Avanços Percorridos até a Descoberta do Grafeno

O interesse tecnológico sempre moveu o ser humano na busca por novas ferramentas, avançando em diversas áreas, tal como a engenharia civil. Devido a essas pesquisas realizadas, surgiram as ferramentas necessárias para extrair elementos que sempre se fizeram presentes no meio ambiente, porém, não eram acessíveis ao homem.

Devido a essas pesquisas, pode-se alcançar o máximo aproveitamento de elementos, como o carbono, que agora possui novos meios de extração de seus alótropos. Esse máximo aproveitamento não seria possível sem os avanços da nanotecnologia, que traz maior eficiência aos materiais frequentemente utilizados na engenharia civil.

2.1. Carbono

Previamente ao estudo do grafeno, se faz necessário tratar sobre o carbono, elemento químico presente em larga escala na natureza em diversos materiais. O carbono é o sexto material mais abundante no universo, além de ser muito versátil, sendo capaz de se organizar de diferentes formas em escala nanométrica [Martínez *et al.* 2013].

Antes dos avanços tecnológicos, as principais formas que ocorriam naturalmente no meio ambiente eram o grafite e o diamante, porém, devido aos avanços tecnológicos e ao desenvolvimento de novos equipamentos tornou-se possível a síntese de outras estruturas de carbonos com dimensões nanométricas. Alguns exemplos de novas estruturas são: fulereno, nanotubos de carbono (CNT) e o grafeno, elemento central do presente trabalho.

Na engenharia de materiais, a nanoestrutura de carbono tem ganhado força devido a suas diversas formas estruturais e propriedades, como aditivos de materiais cerâmicos, plásticos e têxtil biossensores, além de dispositivos eletrônicos e compósitos de materiais de construção [Jesus 2012].

Os modelos moleculares (Figura 1) são os diferentes tipos de alótropos que podem ser obtidos do carbono em virtude dos avanços tecnológicos e não mais apenas o grafite e o diamante, como era comum anteriormente.

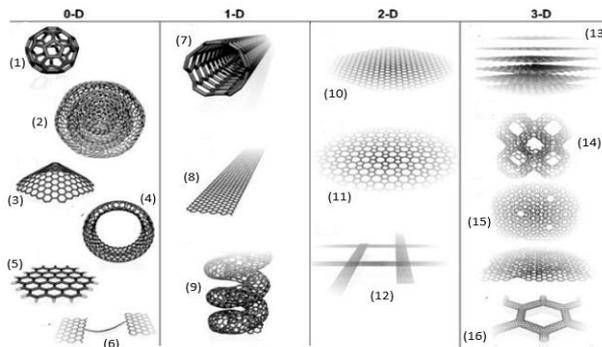


Figura 1. Modelos moleculares dos diferentes tipos de nanoestruturas de carbono hibridizado: 1) fulerenos; 2) nanocebolas; 3) nanocones; 4) nanotoroides; 5) clusters de grafeno; 6) cadeias curtas de carbono; 7) nanotubos de carbono; 8) nanofitas de grafeno; 9) nanotubos de carbono helicoidal; 10) grafeno; 11) superfície Haeckelite; 12) rede de nanofitas 2D; 13) cristais de grafite 3D; 14) cristais schwarzite; 15) nano-espuma de carbono; 16) rede de nanotubos 3D [adaptado de Martínez *et al.* 2013].

2.2. Nanotecnologia e sua importância para a produção de grafeno

Com o passar do tempo, passou a haver um maior interesse em materiais mais eficientes na engenharia civil, abrindo portas para o nanomaterial que passou a ter destaque na área. A nanotecnologia possui essa nomenclatura pois é um estudo de materiais entre 1 e 100 nanômetros (nm) de tamanhos [Martínez *et al.* 2013]. O nanomaterial compreende o desenvolvimento e construção de estruturas a partir de átomos [Jesus 2012].

O estudo das nanotecnologias se faz necessário pois estes materiais, em escala microscópica, apresentam comportamentos diferentes do que na escala macroscópica, apresentando uma excelente força e ótimas propriedades físicas e químicas [Corso *et al.* 2020].

2.3. Grafeno

O grafeno (figura 2) foi descoberto por pesquisadores da Universidade de Manchester, em 2004, pelos Pesquisadores André Geim e Konstantin Novoselov, resultando no prêmio Nobel de física de 2010. O grafeno consiste em uma folha plana de átomo de carbono, organizado em células hexagonais com átomos hibridizados Sp^2 [Martínez *et al.* 2013].



Figura 2. Teste de avaliação de consistência e pureza do grafeno produzido pelo UCSGraphene [Zaparolli 2020].

A estrutura do grafeno o torna um material densamente compactado, com propriedades de boa resistência mecânica, alta condutividade térmica e eletrônica, leve e de aspecto quase transparente, o que resulta em um nanomaterial promissor para a engenharia.

O grafeno é o material mais fino conhecido, até os dias atuais, também sendo considerado um dos mais fortes, além de ser flexível e extremamente duro [Martínez *et al.* 2013], sendo um material 2-D que possui como base três estruturas: fulereno, nanotubo e grafite (Figura 3).

Essas três estruturas da família dos alótropos são as bases do grafeno. O fulereno possui um formato esférico, enquanto o nanotubo possui seu formato cilíndrico, podendo ser visualizado como folhas de grafeno enroladas, já o grafite é formado por folhas bidimensionais empilhadas e deslocadas alternadamente.

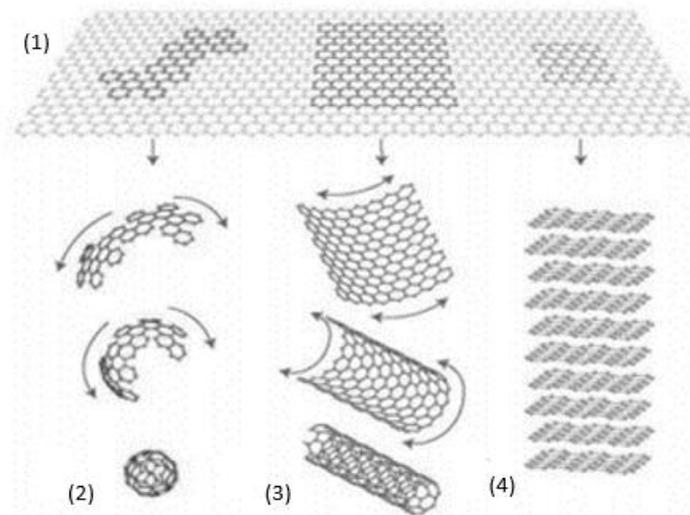


Figura 3. Propriedades do carbono: 1) grafeno; 2) fulereno; 3) nanotubo; 4) grafite [adaptado de Vieira e Vilar 2016].

3. Métodos de Síntese dos Alótropos de Carbono para a Produção do Grafeno

Existem diversas formas de extração do grafeno, as quais serão citadas no presente tópico. Cumpre destacar que os métodos de síntese (Figura 4) não são considerados ideais para o meio ambiente, havendo críticas a serem feitas a eles, entretanto, embora esses não sejam sustentáveis, há outras formas de quebra dessas moléculas e não se pode desconsiderar, sem maiores estudos, os benefícios do grafeno para a engenharia civil e o meio ambiente.



Figura 4. Métodos de síntese de grafeno.

3.1. Esfoliação micromecânica

A esfoliação mecânica é um método simples que consiste em aplicar uma fita adesiva no grafite pirolítico altamente orientado (HOPG), que são camadas de carbono paralelas. Após, deve-se retirar a fita adesiva que contém o grafite e pôr em cima de um substrato de óxido de silício (SiO_2). A afinidade da folha de grafeno com o substrato é maior do que com a própria folha de grafeno, resultando na aderência ao substrato e não à folha de grafeno [Alencar 2017].

Este método de síntese não é eficiente, visto que deixa resíduos de cola na amostra, fazendo com que tenha que passar por um novo tratamento de redução para remover os resíduos [Jesus 2012]. Ao utilizar este método, não é possível produzir grafeno numa quantidade significativa para sua comercialização, apenas sendo interessante para estudos laboratoriais [Alencar 2017].

3.2. Crescimento SIC

Neste método, o grafeno pode ser extraído nas superfícies do carbeto de silício (SiC), sendo considerado o método com melhores resultados. O SiC é colocado dentro de um forno e aquecido a uma temperatura que varia de 1500°C e 2000°C, ocorrendo a sublimação do silício, resultando assim em uma folha de grafeno [Alencar 2017].

Este método pode ter uma produção em larga escala, o que viabiliza sua comercialização, entretanto, devido ao seu custo elevado e seu baixo rendimento, a comercialização é diretamente afetada, fazendo com que seja um método pouco utilizado.

3.3. Processo de obtenção pelo método CVD

O método CVD é a decomposição química em fase de vapor. É possível devido à pouca afinidade do cobre com o carbono e haver formação de ligações fracas, conforme mostra Alencar e Santana (2017):

Já o método CVD, consiste em obter grafeno através da deposição química na fase vapor em substratos de cobre. O cobre por ter pouca afinidade com o carbono e formar ligações fracas na superfície já que possui uma configuração eletrônica estável, torna além de outras características um material propício para o crescimento do grafeno em sua superfície. O processo é realizado depois de aplicar um tratamento térmico na superfície do cobre aplicando gases de argônio e hidrogênio aumentando os grãos do cobre e assim, proporcionando uma superfície mais uniforme. Após esse tratamento térmico um gás carbonáceo (metano, acetileno, etileno, benzeno e etc.) é colocado no forno CVD. O gás então é degradado a altas temperaturas e baixa pressão aderindo ao substrato presente (metal catalisador). Após o crescimento da folha de grafeno, o forno é esfriado para a sua retirada. [Alencar e Santana 2017].

Esta técnica é a mais utilizada para crescer os mais diversos materiais cerâmicos, metálicos ou semicondutores, sendo possível sua produção em larga escala, porém, também possui um processo complexo e de alto custo.

3.4. Esfoliação química em fase líquida a partir do grafite

Esta técnica serve para quebrar a interação entre as moléculas de grafeno empilhadas, utilizando-se de reagentes colocados entre as camadas para separá-las. Este método é simples pois se utiliza de agentes químicos de fácil obtenção, tais como o cloreto de potássio e os ácidos nítrico e sulfúrico, resultando em uma produção de larga escala de grafeno [Alencar e Santana 2017].

A grande problemática em torno deste método se encontra no uso desses agentes químicos de fácil acesso, embora sua obtenção seja simplificada, não há qualquer informação acerca de seu descarte, podendo vir a ser devolvido ao meio ambiente de forma prejudicial.

Outra crítica quanto a esse método é o uso excessivo de resíduos utilizados, como é o caso da esfoliação química de uma pilha onde apenas na etapa de oxidação se gasta uma alta quantidade de resíduos, como apontado no estudo do engenheiro Prado (2019):

Em um erlenmeyer de 500mL, aferiu-se 2g de grafite pré-oxidado (produto da primeira etapa de reação). Adicionando-se 46mL de ácido sulfúrico P.A., sendo a mistura mantida a 35°C, sob agitação. Depois de completa homogeneização, adicionou-se 6g de permanganato de potássio e mantida agitação para a reação durante 2h. Após esse período, a mistura foi colocada em um banho de gelo e adicionouse lentamente à reação 92mL de água deionizada, de forma a garantir a homogeneização da reação e que a temperatura não ultrapasse 50°C. Inicia-se a contagem do tempo e mais 2 horas de reação foram necessárias. Ao final, adicionouse aos poucos mais 280mL de água e 5mL de peróxido de hidrogênio (35%) até ser verificada a alteração da coloração da solução para amarelo-dourada. Em seguida, o conteúdo da reação foi adicionado em uma solução 10% (v/v) de ácido clorídrico para que a reação fosse interrompida, sendo então feita a diluição para 4 L com água deionizada e mantida a mistura em repouso por 12 h. Completar o volume da reação para 4L com água deionizada e deixar durante 12h. O conteúdo da reação foi submetido diversas lavagens com água deionizada, até pH neutro para água de lavagem, e o conteúdo separado por centrifugação. Ao final, óxido de grafeno produzido foi seco à 70 °C, em placas de petri para a formação do filme. [Prado 2019].

Frente ao exposto, é possível concluir que este método utiliza uma grande quantidade de resíduos para extrair grafeno de apenas 2g de grafite. Juntando este estudo com a ausência de informações quanto ao que é feito com os resíduos, este método acaba sendo muito custoso ao meio ambiente. O método mais ecológico destacado é o Flash Joule que será descrito no tópico a seguir.

4. A Sustentabilidade Ligada ao Grafeno

O conceito de sustentabilidade da construção civil está amparado no tripé ambiente, cultura e economia, entretanto, no presente trabalho será abordada apenas a sustentabilidade ambiental. No que tange ao ambiente, está relacionado com a conservação do biosistema nos processos de construção, ou seja, busca a redução do consumo de resíduos e a utilização de materiais mais resistentes e eficientes, através de estudos nanotecnológicos.

O grafeno, por ser um composto ainda recente em comparação com os materiais utilizados atualmente, está em processo de estudo de meios eficazes de produção em larga escala. Desde sua descoberta, vêm sendo feito diversos estudos de técnicas de extração, buscando formas de produzir grafeno em quantidade comercial, entretanto, não há como saber se essas tentativas são prejudiciais ao meio ambiente, considerando que são



utilizados químicos, como o cloreto de potássio e os ácidos nítrico e sulfúrico, sem que haja qualquer informação quanto às formas de descarte dos resíduos.

Considerando a pouca informação acerca da sustentabilidade do grafeno, realiza-se uma análise a partir destas informações e do potencial sustentável do elemento. Uma questão a ser considerada é que há meios sustentáveis, como poderá ser observado mais à frente neste tópico, sabendo que mesmo meios não sustentáveis atualmente possuem potencial, apenas sendo necessário a conscientização de grandes empresas.

4.1. Flash Joule

O método flash, também conhecido como Aquecimento Flash Joule (FJH), é um dos métodos de síntese dos alótropos de carbono, entretanto, foi desenvolvido com o intuito de gerar menos impactos ambientais. Este método foi criado por James Tour e comercializado pela Universal Matter, sendo realizado de forma rápida e barata [Critchley 2021].

O Flash Joule consiste em pegar resíduos orgânicos, como plástico, resíduos domésticos ou materiais à base de carbono e utilizar um pulso de alta tensão, que eleva a temperatura dos materiais, sublimando tudo menos o carbono, o que resulta na formação de folhas de grafeno, conforme nos aponta Critchley (2021):

O "método flash", conhecido como Aquecimento Flash Joule (FJH), usa um pulso de alta tensão para elevar a temperatura dos materiais, sublimando tudo que não o carbono. O excesso de carbono, então, naturalmente forma folhas de grafeno. Este método oferece muito potencial para reduzir significativamente o lixo doméstico ao produzir uma grande quantidade de grafeno (já que o processo é altamente escalável). [Critchley 2021].

Este processo possui um grande potencial sustentável, tendo em vista que pode se utilizar de resíduos já descartados na natureza, reciclando-os para que possam ser reutilizados, segundo o Químico Tour (2020):

O mundo joga fora de 30% a 40% de todos os alimentos, porque vai mal, e o lixo plástico é de preocupação mundial. Já provamos que qualquer matéria sólida baseada em carbono, incluindo resíduos plásticos mistos e pneus de borracha, pode ser transformada em grafeno." [Williams 2020]

Frente ao exposto, pode-se perceber o grande potencial verde deste método, porém, ainda fica muito a desejar no quesito reciclagem ou reaproveitamento de resíduos, o que poderia ser uma dificuldade para o processo de obtenção do grafeno, considerando que ainda teria que ser investido dinheiro numa separação de resíduos, tendo em vista que muitos países, e até mesmo indústrias privadas, não realizam uma coleta seletiva adequada.

4.2. Materiais

O grafeno vem ganhando destaque em diversos cenários ao redor do mundo, havendo pesquisas e estudos quanto à sua estrutura, visto que fornece diversas propriedades que permitem sua utilização em diversas aplicações, como aponta Vieira e Vilar (2016):

Essa estrutura única fornece ao grafeno várias propriedades superiores, tais como altas condutividades elétricas e térmicas, boa transparência, boa resistência mecânica, flexibilidade inerente e enorme área superficial específica. [Vieira e Vilar 2016].

Mesmo tendo estas características, o grafeno possui potencial como material sustentável, sendo utilizado como aditivo, tanto em propriedades físicas como para melhorar as características sustentáveis dos materiais [Critchley 2021]. Sendo provável que seu potencial verde seja o que irá impulsioná-lo no mercado.

Na engenharia civil pode ser observado o grande potencial do uso do grafeno nos materiais utilizados na construção civil, como por exemplo nos transistores de radiofrequência, telhas e placas solares, plástico, concreto e asfalto (Figura 5).

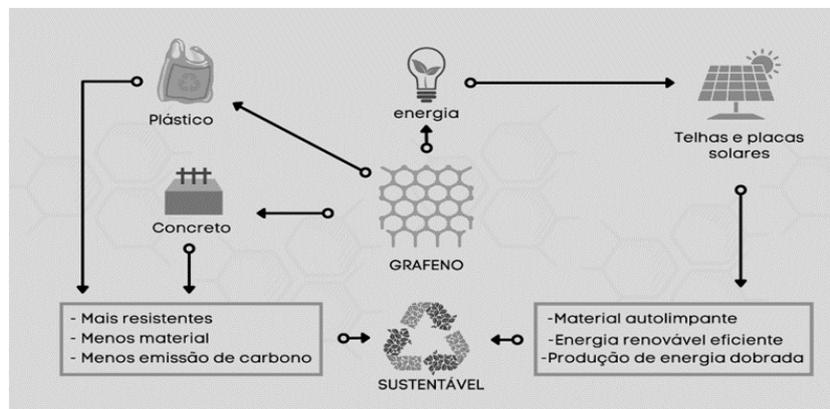


Figura 5. Aplicações do grafeno na engenharia civil.

O grafeno, devido às suas propriedades condutoras e elevadas mobilidades eletrônicas, pode aperfeiçoar a fabricação de transistores de radiofrequência, que são degradados com frequência. Os transistores fabricados com base de grafeno podem melhorar o desempenho nas aplicações de radiofrequência, em virtude da elevada mobilidade eletrônica presente no grafeno, resultando numa melhora do sistema sem fio [Vieira e Vilar 2016].

Outra área que o uso de grafeno se faz de suma importância para o meio ambiente seria na melhoria de fontes de energia renováveis, como por exemplo no uso de telhas e placas solares. Ao utilizar grafeno nas telhas solares, nos possibilita transformar energia solar em eletricidade, tornando as construções autossuficientes em energia. Outra melhoria da eficiência trazida pelo grafeno seria quanto à viabilização da utilização de células fotovoltaicas orgânicas OPVs [Genelhu 2019].

As telhas de grafeno (Figura 6) já estão sendo produzidas e comercializadas por inúmeras empresas, dentre elas a Telite, empresa situada na cidade de Comendador Levy Gasparin, que produziu uma telha que pode durar até 80 (oitenta) anos gerando energia elétrica para uma residência segundo REDAÇÃO CICLO VIVO (2021).



Figura 6 - Telhas de Grafeno [Telite S.A. Ambiental 2021].

O grafeno pode ser adicionado ao plástico, resultando num aumento significativo de sua resistência, que se combinado com uma conscientização e políticas sociais pode vir a diminuir sua produção, ou seja, aumenta-se a resistência dos produtos para incentivar a sociedade a reutilizá-los, evitando assim um descarte precoce e mais resíduos no meio ambiente.

Há ainda o uso do grafeno em adaptadores e fontes de alimentação, que vem sendo produzidos por uma pequena empresa chamada Elecjet, que lançou sua primeira bateria de grafeno em 2019, porém, continuou avançando nas pesquisas e lançou o Elecjet Apollo Ultra, que se propõe a ser o carregador mais rápido do mundo, sem superaquecer, vez que chega a uma temperatura máxima de 43°C. Esta afirmação de criar o carregador mais rápido do mundo só se tornou possível com o uso do grafeno, que permitiu essa aceleração drástica. O Apollo Ultra permite que um celular com bateria de 10.000mAh seja carregado de zero a cem por cento em menos de trinta minutos. Outro fator a ser considerado é que o Apollo Ultra dura mais de 2.500 ciclos de carregamento, o que também se deve ao grafeno [Marinho 2022].

O asfalto é outro composto que poderia vir a ser aperfeiçoado com a utilização do grafeno. Hoje em dia, uma das principais rotas de transporte é o meio rodoviário. Segundo dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e de uma pesquisa da Conferência Nacional de Transportes (CNT), ambos a partir de 2018, 60% de todas as cargas no território e 57% das rodovias brasileiras apresentam algum tipo de manifestação patológica, o que refletem na cadeia produtiva do país [Paula *et al.* 2019]. Frente ao exposto, não resta dúvidas que a utilização do grafeno no asfalto faz com que haja um aumento na resistência, requerendo menos material e, portanto, será feita menos manutenção, que resultará em menos lixos e emissões de carbono.

O concreto é um dos principais materiais utilizados na engenharia civil. Entretanto, com a adição do grafeno em argamassas de cimento, ficou comprovado que as

propriedades mecânicas possuem maior resistência à compressão, tendo um aumento significativo [Critchley 2021]. Quando adicionado o grafeno, o concreto se torna duas vezes mais forte e quatro vezes mais resistente à água do que os concretos já existentes segundo ENERGY INDUSTRY REVIEW (2018).

Devido às excelentes propriedades do grafeno, o concreto se torna um material mais sustentável e ecologicamente correto, visto que ao adicionar o grafeno, reduz a quantidade de cimento adicionada no composto, segundo a Revista Advanced Function Materials [ENERGY INDUSTRY REVIEW 2018]. Ainda, pesquisadores apontam uma melhora sem precedentes no concreto à base de grafeno, como apontam pesquisadores: [Dimov *et al.* 2018].

relatamos compostos de concreto multifuncional nanoengenharia de grafeno com poucos átomos de espessura inovadores que exibem uma gama sem precedentes de propriedades aprimoradas em comparação com o concreto padrão. Demonstramos um aumento extraordinário de até 146% na resistência à compressão, até 79,5% na flexural e uma diminuição no deslocamento máximo devido à carga de compressão em 78%. Ao mesmo tempo, encontramos um melhor desempenho elétrico e térmico com um aumento de 88% na capacidade de aquecimento. Uma redução notável na permeabilidade à água em quase 400% em comparação com o concreto padrão, que é uma propriedade extremamente procurada para longa durabilidade de estruturas de concreto, torna este novo material composto idealmente adequado para construções em áreas sujeitas a inundações. Finalmente, mostramos que a inclusão do grafeno no concreto atual levaria a uma redução de 50% do material de concreto necessário, ao mesmo tempo que atendia às especificações para o carregamento dos edifícios. Isso levaria a uma redução significativa de 446 kg por tonelada de emissões de carbono pela fabricação de cimento.” [Dimov *et al.* 2018]

Com essa redução de material, há uma queda na taxa de emissão de carbono ocasionado pela fabricação do concreto. Segundo Critchey (2021), o concreto é responsável por cerca de 8% das emissões de CO₂ no mundo, enquanto ao adicionar, aproximadamente, 0,03% de peso (wt%) de grafeno em concreto se reduz a pegada de carbono em 25-33% e as emissões globais em 2%.

O químico James Tour ainda afirma que ao fortalecer o concreto com grafeno, pode se utilizar menos concreto na construção civil e, por consequência, tornar menos custosa a fabricação e o transporte desses materiais, apontando ainda outros benefícios: [willims 2020]

Basicamente, estamos prendendo gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e metano, que os resíduos alimentares teriam emitido em aterros sanitários. Estamos convertendo esses carbonos em grafeno e adicionando esse grafeno ao concreto, reduzindo assim a quantidade de



dióxido de carbono gerado na fabricação de concreto. um cenário ambiental ganha-ganha usando grafeno. [willims 2020]

Frente ao exposto, pode-se concluir que o grafeno possui um grande potencial para a engenharia civil, seja na economia ao produzir o compósito de concreto, seja em outros aspectos sustentáveis já citados, tendo em vista que há inúmeros benefícios com seu uso, embora não possam ser ignorados os riscos e a necessidade de conscientização.

4.3. Dos Riscos à Sustentabilidade

O grafeno em si é um compósito com potencial de revolucionar a construção civil, aperfeiçoando os materiais usados e reduzindo seus custos. Entretanto, embora na teoria pareça algo sem defeitos, não se deve ignorar todos os riscos que um material novo pode trazer. Devido à sua descoberta recente, ainda são poucos os estudos e informações sobre os riscos que o grafeno pode causar, entretanto, será feita uma análise das informações atuais buscando entender se o uso do grafeno seria sustentável ou não.

O grafeno, para ser produzido em larga escala, precisa ter suas técnicas de extração estudadas ao fundo, analisando todas as formas possíveis e seus benefícios e prejuízos. Atualmente, já há meios sustentáveis de fazê-lo, como é o caso do Flash Joule, entretanto, há diversos meios no mercado atualmente e muitos deles não são possíveis quando analisada sua sustentabilidade. Métodos de síntese que se utilizam de cloreto de potássio e ácidos nítrico e sulfúrico seriam potenciais riscos ao meio ambiente, entretanto, a falta de conscientização e a total ausência de informações quanto ao descarte destes resíduos para a produção do grafeno torna este método ainda mais prejudicial. Se as empresas não estão informando o que está sendo feito, pode ser que este descarte esteja sendo um problema, logo, não pode ser desconsiderado este risco.

Precisa ser estudada a relação do benefício trazido pelo grafeno e a quantidade de resíduos gerados pelo mesmo, para que possa ser comercializado ou não esses nanomateriais, após pesquisas comprovando a ausência de impactos ao meio ambiente e à humanidade. Esse estudo prévio se faz necessário pois os nanomateriais não podem ser recuperados após seu descarte na natureza, logo, devem ser evitados os impactos antes que os mesmos aconteçam e não possam ser reparados.

Um método que deve ser utilizado para a produção do grafeno é o processo do berço ao túmulo, que trata sobre a análise do ciclo da vida, tendo em vista que não adianta o grafeno ser sustentável em sua utilização se ao ser extraído irá gerar muitos resíduos que podem impactar o meio ambiente.



Figura 7. Ciclo de Vida dos materiais.

Conforme análise (figura 7), há um ciclo de vida ideal a ser seguido quanto aos materiais, devendo o grafeno seguir o mesmo esquema, sendo estudado desde sua extração até seu descarte, considerando ainda seu uso após adicionado aos demais materiais. Um dos potenciais benefícios do grafeno seria a utilização do Método Flash, que iria extraí-lo de lixos já gerados pelo mundo, ou seja, faria com que pequenas porcentagens de concentração de grafeno afetassem diretamente a diminuição dos impactos ambientais gerados por lixos. Entretanto, não se pode pensar apenas na redução do lixo sólido, sem considerar o que será feito com os gases gerados da sublimação no processo. Durante os estudos não foi encontrado como seria realizada a separação do lixo que contém ou não o carbono e o paradeiro desses gases sublimados, razão pela qual segue sendo um risco, visto que não há garantias se seria ou não sustentável.

Outra questão a ser considerada quando analisados os riscos do grafeno seria no que diz respeito ao seu uso como base do concreto. Enquanto há informações quanto aos benefícios de seu uso, sendo eles a redução de material, resistência e menos emissões de CO₂, não se pode desconsiderar que é um nanomaterial que quando em contato com o solo ou lençol freático, se houver água escoada, poderá vir a desembocar em um rio, gerando contaminações ao meio ambiente e aos seres que ali habitam, sem chances de recuperação.

Até o momento da publicação deste artigo, não foram encontradas pesquisas tratando a respeito da reutilização do concreto com grafeno, portanto, não é possível afirmar sua sustentabilidade de forma plena.

O grafeno possui muitas vantagens e desafios que precisam ser levados em consideração quando ponderada sua utilização de maneira consciente e sustentável, sendo eles (tabela 1).

Tabela 1. Vantagens e desafios da utilização do grafeno na engenharia civil.

Metodos	Vantagens	Desafios
Síntese de grafeno	Grafeno se encontra em abundância no planeta; Materiais químicos de fácil acesso para o método de esfoliação química; Redução de lixo pelo método flash.	Redução de resíduos químicos; Produção em larga escala; Separação do lixo para o método flash; Diminuição do custo de extração; Sintetizar grafeno de Material com grafeno.
Concreto de grafeno	Redução de CO ₂ na produção de concreto; Melhoria na característica física e mecânica; Redução na quantidade de aço em estruturas de concreto armado.	Descarte de forma adequada do concreto de grafeno; Reciclagem do concreto após seu descarte.
telhas e células fotovoltaicas de grafeno	Energia renovável eficiente; Produção de energia dobrada em relação as placas convencionais de silício; Material autolimpante, reduzindo a quantidade de manutenção; Material durável e mais resistente.	Reciclagem das telhas e placas; Descarte adequado das telhas e placas; Redução do custo de energia renovável.
transistores de radiofrequência	Melhoria do desempenho na radiofrequência; Redução de fios e cabos; Melhoria no sistema de automação sem fio.	Reciclagem dos transistores compostos de grafeno.
Plásticos	Materiais de plásticos mais duráveis; Menos resíduos derivados do plástico.	Reciclagem do plástico; Descarte do plástico de grafeno de forma adequada.

5. Conclusão

Frente ao exposto, pode-se concluir que o grafeno é um composto muito promissor para a engenharia civil e diversas outras áreas, entretanto, o fato de que não há pesquisas e dados suficientes que justifiquem seu uso livre e desimpedido nos dias atuais não deve ser ignorado. O grafeno, devido ao seu potencial, está sendo muito estudado por diversas áreas. Não há dúvidas que daqui a uns anos haverá inúmeras pesquisas tratando sobre seus usos e consequências.

Ocorre que embora o grafeno esteja sendo muito estudado, esses estudos ainda não propiciaram seu uso em larga escala, podendo expor o meio ambiente a riscos altíssimos. Conforme expresso no presente trabalho, ainda não há estudos que comprovem sua eficácia e sustentabilidade desde sua extração até seu descarte. Ainda não há dados suficientes que comprovem a real proporção de resíduos prejudiciais utilizados em comparação à quantidade de grafeno extraída.

Conforme destacado, é possível visualizar um enorme potencial do grafeno, principalmente ao ser utilizado em materiais para a engenharia civil, até mesmo apreciar as benfeitorias e ansiar por elas, no entanto, não se deve deixar de lado a conscientização em relação ao meio ambiente. Há riscos que não podem ser ignorados em prol de uma redução de gastos e de materiais, porém, não se pode descartar o grafeno por causa desses riscos, devendo estudá-los a fundo, garantindo que seja extraído o melhor deste composto.



Portanto, devem ser feitos investimentos em pesquisas sobre a sustentabilidade do grafeno, focando em todas as fases da vida do elemento, ou seja, observando todo o processo do berço ao túmulo, sem ignorar os prejuízos ecológicos em prol dos benefícios materiais. Com essa conscientização, surgirão incentivos ao investimento em meios sustentáveis de extração e utilização do grafeno. Não é algo impossível de se acreditar, considerando a existência do método Flash Joule, no entanto, tal método se torna difícil na prática devido à falta de conscientização da necessidade de uma coleta seletiva realizada de forma correta, que possibilite a utilização destes resíduos sem que torne o Flash Joule um método mais custoso e demorado. Sem estes resíduos, o método não será viável, portanto, é necessário investir na separação correta dos resíduos, de modo a incentivar e possibilitar a utilização deste método que, até o presente momento, seria a opção mais sustentável para extrair o grafeno.

O grafeno tem potencial para revolucionar os materiais da construção civil, razão pela qual devem ser feitos investimentos em pesquisas, possibilitando alcançar seu potencial o mais rápido possível, porém tais avanços não serão viáveis sem conscientização da população e das empresas.

Referências

- Alencar, E. (2017). “Processos De Obtenção Do Grafeno, Suas Aplicações E Sua Importância Para O Brasil.”, Revista Acadêmica Oswaldo Cruz, p. 1-9. Bertocello, A., Modaeli, E., Batista, V. (2021). “O Grafeno Na Dessalinização D’água e o Impacto Nas Regiões Com Crise Hídrica.”, South American Development Society Journal, v. 07, ed. 19.
- Bueno, R.M. (2020). “A influência do óxido de grafeno e da sílica coloidal nas propriedades químicas e mecânicas de matrizes cimentícias”, Universidade São Judas. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil.
- Castro, V.L.S.S., Clemente, Z., Jonsson, C.M., Silva, M. S. G. M., Vallim, J.H., Medeiros, A. M. Z. e Martinez, D.S.T. (2017). “Avaliação de Risco Ambiental estimado Pela Exposição Ao Óxido De Grafeno.”, Embrapa Meio Ambiente –Artigo em anais de congresso (ALICE), p. 651-654.
- Cordeiro, G. L. (2018). “Defect Engineering in Reduced Graphene Oxide toward Advanced Energy Conversion.”, Graphene Oxide - Applications and Opportunities. <https://www.intechopen.com/books/graphene-oxide-applications-and-opportunities/defect-engineering-in-reduced-graphene-oxide-towardadvanced-energy-conversion>, Maio.
- Corso, M., Berto, L. K., Albuquerque, A. C. D., Oliveira, J. H., Favaro, S. L. e Rezende, L. C. S. H. (2020). “Incorporação de óxido de grafeno em argamassa de revestimento: uma visão sustentável.”, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n.1, p. 297-312.
- Critchley, L. (2021). “Could the Focus on Sustainability Help Drive the Graphene Market?”, Azonano.



- Cruz, L. (2019). “Desafio para ciência: quais os efeitos do uso e descarte de nanomateriais?”, Minas Faz Ciência.
- DICA DE OBRA (2021). “Telhas com grafeno para gerar energia elétrica.”
- Dimov, D., Amit, I., Gorrie, O., Barnes, M. D., Townsend, N. J., Neves, A. I. S. N., Withers, F., Russo, S. e Craciun, M.F. (2018). “Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene–Concrete Composites for Multifunctional Applications.”, *Advanced Functional Materials*.
- ENERGY INDUSTRY REVIEW (2018). “Innovative new ‘green’ concrete using graphene.”.
- Genelhu, R. N. (2019). “Uso Do Grafeno Em Placas Fotovoltaicas Orgânicas Para Melhoria De Eficiência Energética.” Universidade Federal De Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto – MG.
- Hasan, N. M., e Marion, B. D. G. (2016). “Grafeno: Inovações, Aplicações e sua comercialização”, *Interfaces Científicas - Exatas E Tecnológicas*, 2(1), 29–40. <https://doi.org/10.17564/2359-4942.2016v2n1p29-40>, Agosto.
- Jesus, K.A. (2012). “Grafeno: Aplicações e Tendências Tecnológicas”, Departamento de Processos Orgânicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. p.14-19.
- Lima, L. F. e Gargia, M. V. D. (2015). “A deficiência mecânica do concreto poroso e seu fortalecimento com aplicação de nanotubos de carbono.” Centro Universitário Salesiano de São Paulo – UNISAL, p. 47-58. <http://www.publicacoes.fatea.br/index.php/Janus/article/view/363/336>, Maio.
- Marinho, F. (2022). “Já está à venda o carregador portátil de grafeno mais rápido do mundo, que promete recarregar o celular em 7 minutos, aguenta mais de 2,5 mil ciclos de carga, ou cerca de sete anos de uso diário. Indústria e Construção Civil. Click Petróleo e Gás.”, Click Petróleo e Gás.
- Martínez, L. M. P., Torres, S. M., Gomes, H. T. e Silva, A. M. T. (2013). “Nanotubos e Grafeno: Os primos mais jovens na família do carbono!”, *Química* 128, p. 21-27. <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/8300>, Julho.
- Paula, J., Carneiro, L., Ludvig, P. e Silva, S. N. (2019). “O Uso De Óxido De Grafeno Para Reparação De Pavimento Asfáltico - Uma Revisão.”, Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG, Conference Paper.
- Pereira, P. I. (2009). “Construção Sustentável: o desafio.”, Universidade Fernando Pessoa, p. 1-122, 21. https://bdigital.ufp.pt/bitstream/10284/2674/3/T_13485.pdf, Julho.
- Prado, J. P. (2019). “Síntese Do Grafeno A Partir Do Grafite De Pilhas Exauridas.” Universidade Tecnológica Federal Do Paraná Departamento Acadêmico De Engenharia Química Curso De Engenharia Química.



- REDAÇÃO CICLOVIVO. (2021). “Telhas solares geram energia com grafeno.”, Telite S.A. Ambiental. Telhas Ecológicas, Banheiros Químicos e Telhas Solares. <https://www.telite.com.br>, Outubro.
- Vieira Segundo, J. e Vilar, E. (2017). “Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos.” Revista Eletrônica de Materiais e Processos, América do Sul, 11. <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewArticle/493>, Julho.
- Williams, M. (2020). ”Lab turns trash into valuable graphene in a flash.”, Rice University.
- Zaparolli, D. (2020).” Grafeno made in Brasil.”, Pesquisa FAPESP 291.
- Zarbin, A. J. G. e Oliveira, M. M. (2013). “Nanoestruturas De Carbono (Nanotubos.Grafeno): Quo Vadis?”, Quim. Nova, ano 1533-1539, 2013, v. 36, n. 10, p.1533-1539.