



ISSN: 2230-9926

Available online at <http://www.journalijdr.com>

# IJDR

International Journal of Development Research

Vol. 12, Issue, 05, pp. 55839-55844, May, 2022

<https://doi.org/10.37118/ijdr.24537.05.2022>



RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS

## UM BREVE ESTUDO ACERCA DO USO DA TECNOLOGIA DO GRAFENO NA PAVIMENTAÇÃO: NOVOS PARADIGMAS PARA A TERCEIRA DÉCADA DO SÉCULO XXI

Caroline Garcia Paiva<sup>1\*</sup>, Mayara Sipriano Leal<sup>1</sup> and Fabiano Fagundes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Discente do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade de Gurupi (UNIRG), Gurupi, Tocantins;

<sup>2</sup>Docente da Universidade de Gurupi (UNIRG), Gurupi, Tocantins

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 27<sup>th</sup> February, 2022

Received in revised form

26<sup>th</sup> March, 2022

Accepted 09<sup>th</sup> April, 2022

Published online 20<sup>th</sup> May, 2022

#### Key Words:

Óxido de grafeno, Nano material, Pavimento Asfáltico, Resistência Mecânica.

#### \*Corresponding author:

Caroline Garcia Paiva

### ABSTRACT

O uso de nano materiais para modificar a mistura asfáltica a fim de melhorar seu desempenho tem se tornado uma área de interesse crescente. Recentemente, descobriu-se que o óxido de grafeno (OG) é um nanomaterial com potencial para melhorar o desempenho do ligante asfáltico devido às suas propriedades vantajosas e capacidade de dispersão em diferentes misturas. Este trabalho avaliou o óxido de grafeno, para que se compreenda sua estrutura molecular, as propriedades e aplicações desse material, de modo que se conduza à uma melhor compreensão dos seus benefícios e vantagens para a pavimentação asfáltica. Trata-se de um estudo bibliográfico, do tipo revisão integrativa de caráter exploratório com abordagem qualitativa dos dados. De acordo com os resultados encontrados, constatou-se uma melhora das propriedades mecânicas da mistura asfáltica com a adição de óxido de grafeno, especialmente no quesito de resistência a tração, a flexão, resistência a compressão, fadiga, como também melhoria em sua viscosidade.

Copyright © 2022, Caroline Garcia Paiva et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Citation: Caroline Garcia Paiva, Mayara Sipriano Leal and Fabiano Fagundes. "Um breve estudo acerca do uso da Tecnologia do Grafeno na Pavimentação: novos paradigmas para a Terceira Década do Século xxi", *International Journal of Development Research*, 12, (05), 55839-55844.

## INTRODUCTION

Desde o início do século XX, a frota automotiva brasileira tem aumentado significativamente, gerando, com isso, a necessidade de uma locomoção cada vez mais eficiente, o que tem impulsionado grandes avanços em diversos setores, principalmente na construção civil (BALBO, 2015). O grande volume de tráfego, além dos elevados carregamentos transportados pelas rodovias brasileiras, impulsiona a necessidade de pavimentos cada vez mais resistentes e, em sua falta, surgem adversidades que irão exigir a manutenção frequente dessas rodovias, o que, na maioria dos casos, continuará a gerar altos custos para os cofres públicos. Nesse sentido, o grafeno vem sendo estudado para diversas aplicações na área da Engenharia, incluindo a pavimentação. O desenvolvimento de novos materiais tecnológicos e sua aplicação em pavimentos asfálticos podem recuperar e reforçar suas propriedades mecânicas tendo como consequência a redução das manifestações patológicas existentes e custos com reparos futuros. A definição de grafeno refere-se a uma camada extremamente fina do grafite que possuem ligações de átomos de carbono, mas a principal diferença entre os dois é que o grafeno consiste em um pequeno número de camadas atômicas, cujas propriedades tornam o material muito diferente do grafite (NASCIMENTO; REIS, 2020). Como exemplo de suas diversas aplicações, podemos citar projetos realizados na Universidade de Caxias do Sul - UCS que buscam desenvolver nanocompósitos poliméricos contendo grafeno para

aplicação em tratamento cutâneo e medicina regenerativa. Também destaca-se a abertura da Feira Brasileira do Grafeno no Rio Grande do Sul, a indústria de produção de grafeno está em operação desde março de 2020 e reúne a experiência de anos de pesquisa em nanotecnologia, gerando grafeno para produção de alta tecnologia. Tem capacidade para produzir até 5 mil quilos por ano, além de ser berço para pesquisas e desenvolvimento de novos produtos oriundos desse material. Estudos envolvendo a aplicação do grafeno em pavimentação, apresentam avanços para a correta aplicação desse material, especialmente porque suas propriedades são únicas e tem se sobressaído em relação a materiais testados anteriormente. Dessa forma será possível definir quais as propriedades da aplicação do grafeno se destacam, quais suas vantagens na pavimentação e quais procedimentos serão utilizados para sua aplicação. Portanto, será possível entender a importância do grafeno na pavimentação urbana e, principalmente, como o emprego de novas tecnologias torna possível a economia no uso de materiais e a diminuição do impacto ambiental. Para a comunidade acadêmica e sociedade os dados elencados serão fundamentais para servir como base de pesquisa.

## METODOLOGIA PROPOSTA

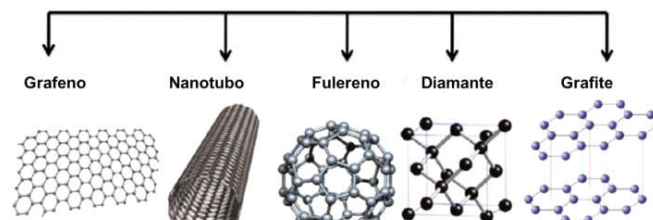
Trata-se de uma pesquisa bibliográfica, sendo assim, objetiva sintetizar o conhecimento já construído em pesquisas anteriores para então traçar uma análise de conteúdo, pautados nos resultados

apresentados pelas pesquisas já construídas (FREITAS, 2013). De caráter qualitativo, Kripka e colaboradores (2015) enunciam que “os estudos qualitativos se caracterizam como aqueles que buscam compreender um fenômeno em seu ambiente natural, onde esses ocorrem e do qual faz parte.” A coleta de dados foi realizada mediante busca eletrônica nas bases de dados Google Scholar, Capes e Science Direct, sobre a temática em questão, referente ao período de 2015 a 2022. Como localizador dos artigos, foram utilizados os descritores asfalto, pavimentação e óxido de grafeno. Esta pesquisa incluiu os artigos disponibilizados na íntegra, nas bases de dados que foram escolhidas; no período de publicação proposto e que tenham relação com os objetivos do trabalho. Para a seleção dos foram utilizados como critérios de inclusão: artigos, resumos, livros, teses, monografias, dissertações, publicações em anais de congressos assim completos em língua portuguesa, inglesa e espanhola; cuja abordagem é qualitativa, exploratória, descritiva, transversal ou relatos de caso; disponíveis eletronicamente e que obedecem à temática supracitada. Foram pesquisados artigos que atenderam ao objetivo proposto e se encaixaram nos critérios de inclusão e exclusão. Posteriormente, esses foram revisados e relidos na íntegra e, a partir disto, foram selecionados estudos sobre a temática para subsidiar a discussão dos resultados da pesquisa e possibilitar posterior catalogação em tabela. Os estudos foram selecionados através de um instrumento de coleta de dados que contém: título, autores dos estudos, objetivo, abordagem metodológica/ano de publicação, resultados e evidência científica.

## REFERENCIAL TEÓRICO

O grafeno é um material bidimensional composto por uma camada única de átomos de carbono, arranjados em uma estrutura cristalina de formato hexagonal, semelhante à um favo de mel. O empilhamento dessas lâminas de grafeno é responsável por originar o grafite. Como alternativa, o grafeno pode ser também aplicado na forma de esfera, denominado fulereno, como também na forma de nanotubos (FEI, 2018). O termo “Grafeno” foi primeiramente citado em 1987, porém o conceito já advinha desde 1947, embora existisse apenas em teoria, uma vez que, até então, não se sabia que uma estrutura bidimensional também poderia existir em sua forma física. O grafeno foi oficialmente lançado em 1994 pela *International Union of Pure and Applied Chemistry - IUPAC*, que o considera como uma camada única da estrutura grafítica. Em 2004, pesquisadores do Centro de Nanotecnologia da Universidade de Manchester, coordenado pelos cientistas André Geim e Konstantin Novoselov foram capazes de isolar, a partir do grafite, pequenos fragmentos de grafeno (NOVOSELOV *et al.*, 2004). Em 2010, após a inserção do conceito do grafeno à ciência, esses cientistas ganharam o Prêmio Nobel de Física. As propriedades do grafeno e seu potencial tecnológico permite sua utilização em diversos setores industriais, principalmente por ser um excelente material condutor e ótimo composto filtrante para o ramo da química. Nessa perspectiva, o Brasil investiu recentemente em um centro de pesquisa para síntese de grafeno, chamado *Mackgraphpe*, localizado na Universidade Mackenzie em São Paulo, cujo orçamento inicial foi avaliado em R\$ 100 milhões. Apesar do investimento ainda não tão expressivo, o País parece estar determinado em progredir nessa área, fato justificado pela abundância de reservas naturais de grafite natural, que alcançam quase 45% em escala mundial, colocando o Brasil em vantagem na cadeia produtiva do grafeno (VILLELA, 2016). Ainda se tratando de Brasil, a UCSGRAPHENE, a maior indústria na produção de grafeno da América Latina, está em operação desde abril de 2020, atuando na prestação de serviços tecnológicos inovadores voltados à produção, caracterização e aplicação de grafeno e/ou seus derivados, possuindo a expertise da Universidade de Caxias do Sul em mais de 17 anos de pesquisa avançada em nanomateriais, como também o LAB N-TEC (Laboratório de Nanotecnologia da Universidade de Brasília, campus Gama) responsável por várias pesquisas na área. O custo para a produção de 150 g de grafeno gira em torno de 15.000 dólares, enquanto 1 kg de grafite natural custa basicamente 1 dólar. Mesmo assim, a indústria do ramo espera que, em 10 anos, a comercialização do grafeno movimente aproximadamente um trilhão de dólares (MATOS, 2017).

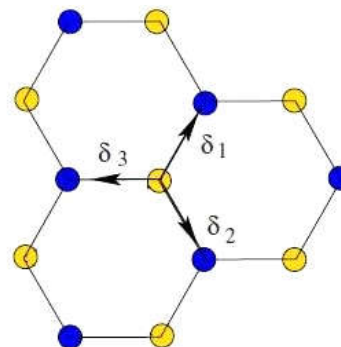
**Propriedades do grafeno:** Por suas propriedades, num contexto geral, o grafeno surge como uma potencial alternativa ao uso do silício e do diamante, devido a suas excelentes propriedades eletrônicas, mecânicas e térmicas, além de sua alta condutividade. A representação esquemática estrutural dos alótropos do carbono está ilustrada na Figura 1. Além da estrutura bidimensional do grafeno, é possível observar a disposição em formato cilíndrico dos nanotubos, o fulereno em formato esférico, além do diamante e do grafite, este último em sua estrutura, é formado por diversas folhas bidimensionais de grafeno (TIWARI *et al.*, 2016).



Fonte: Adaptado de Tiwari *et al.*, 2016.

**Figura 1. Representação dos diferentes alótropos do carbono**

Na estrutura do grafeno, os átomos de carbono apresentam hibridização  $sp^2$  com orbitais  $p_x$  e  $p_y$  e formação de ligações  $\sigma$  com os carbonos vizinhos. Já o orbital  $p_z$  não-hibridizado se sobrepõe a outros e forma bandas de valência e de condução (Figura 2). Essas ligações favorecem a formação de uma estrutura bidimensional hexagonal (GONÇALVES, 2013).



Fonte: Adaptado de Gonçalves, 2013

**Figura 2. A estrutura do grafeno e representação do padrão de ligações do carbono**

Atualmente, pesquisas em nanotecnologia e nanoengenharia vêm desenvolvendo métodos de síntese, separação e posicionamento das estruturas de grafeno visando sua caracterização e viabilizando avanços que podem vir a ser implementados posteriormente (ORCUTT, 2013). Uma pesquisa conduzida na Inglaterra revelou que o grafeno, quando combinado a tinta, atua como agente impermeabilizante, o que favoreceria sua aplicação na área de revestimentos e compósitos, ainda evitaria reações de oxidação sobre o local revestido (ALENCAR; SANTANA, 2018). Embora possa ser sintetizado a partir de diferentes métodos, a produtividade e o alto custo de sua síntese ainda precisa ser otimizadas. Além disso, os métodos de caracterização modernos requerem a transferência de grafeno a um substrato a ele específico, reduzindo a eficiência da caracterização. Assim, a ciência busca o desenvolvimento de novos métodos de identificação rápida e eficaz para sobrepor as limitações inerentes a produção do composto (NOVOSELOV *et al.*, 2012). Existe um vasto ramo de materiais, que são designados como grafeno, mas têm propriedades diferenciadas que variam em função do número de camadas e de dimensão lateral. Alguns dos termos utilizados pelos investigadores por vezes são contraditórios. Por isso, em 2013, foi sugerida uma nomenclatura para materiais bidimensionais à base de carbono, de modo a que este pudesse funcionar de guia para os investigadores da área (BIANCO, 2013). A Tabela 1 apresenta as definições para os materiais à base de grafeno.

**Aplicações do óxido de grafeno:** O óxido de grafeno (OG), que é quimicamente semelhante ao grafite oxidado, consiste em estruturas grafíticas que em camadas com grupos hidroxila e epóxi nos planos basais e grupos carboxílicos e carbonila nas bordas da folha. Esses grupos contendo oxigênio tornam o óxido de grafite hidrofílico, e a presença de grupos funcionais entre as camadas também resulta em um óxido de grafite com um espaçamento entre camadas maior, dando ao OG características de hidrofobicidade, dispersibilidade e compatibilidade com diversas matrizes poliméricas (EDWARDS, 2013; NANDA, 2015; POTTS, 2011).

com o clima e o fluxo tráfego previstos para o local. Um dos mais tipos de misturas empregados no Brasil, é denominado como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). A fim de garantir bom funcionamento e resistência aos esforços solicitantes de contato pneu-pavimento é indispensável a distribuição da granulometria conforme ao tipo de mistura asfáltica.

Segundo Bernucci *et al.* (2008) as misturas asfálticas à quente podem ter subdivisões pela granulometria dos agregados e filler. Sendo os mais comuns a ser usados:

**Tabela 1. Materiais bidimensionais à base de carbono com definição dos mesmos**

MATERIAIS	DEFINIÇÃO
Grafeno	Folha de espessura monoatômica com arranjo hexagonal, em que os átomos estão ligados através de ligações sp <sup>2</sup> ; não sendo parte integrante de um material à base de carbono, pode estar livremente em suspensão ou depositado sobre um substrato. Conforme o valor da sua dimensão lateral pode ser considerado como uma microfolla (100nm -100um) ou nanofolla (<100nm).
Camada de grafeno	Folha de espessura monoatômica com arranjo hexagonal, em que os átomos têm entre si ligações sp <sup>2</sup> ; pode ser parte de um material bidimensional como uma bicamada de grafeno ou integrante de um material tridimensional como a grafite.
Bicamada e Tricamada, de grafeno	Folha bidimensional, que pode estar sobre a forma de filmes, flocos ou depositada sobre um substrato, formada por duas ou três camadas de grafeno bem definidas e contáveis, de dimensões laterais alargadas.
Multicamadas de grafeno (MLG)	Folha bidimensional, que pode estar sobre a forma de filmes, flocos ou depositada sobre um substrato, que contém um baixo número de camadas (2 a 10), bem definidas, contáveis de dimensões laterais alargadas.
Algumas camadas de Grafeno (FLG)	Um subconjunto de multicamadas de grafeno, contendo entre 2 a 5 camadas de grafeno.
Grafite Exfoliada	Uma multicamada que mantém o arranjo estrutural do grafite, após exfoliação (mecânica, química ou térmica) parcial do grafite.
Óxido de grafeno (GO)	Grafeno modificado quimicamente, preparado por exfoliação e acompanhado por modificação oxidativa. É um material com um elevado teor em oxigênio, caracterizado tipicamente por razões atômicas, sendo a proporção Carbono/Oxigênio menores que 3 e próximas de 2.

Fonte: Adaptado de Bianco (2013).

No entanto, a quantidade, tipo e localização dos grupos funcionais pode variar de acordo com as condições de obtenção, já que as propriedades do OG estão associados com a natureza dos grupos funcionais e a morfologia do óxido obtido, estas características dependem do grafite de partida e das condições de reação, tais como o tempo de oxidação, a temperatura e dos agentes oxidantes, o que apresenta forte influência sobre a reatividade destes materiais (BOTAS, 2012; SHAMAILA, 2016). Do ponto de vista mecânico, o grafeno e seus derivados, tais como OG, são previstos como nanopartículas ideais para compósitos poliméricos. Vários pesquisadores vêm estudando a influência da adição das cargas de OG em matrizes poliméricas de polietileno e polipropileno resultando em materiais condutivos, além de apresentarem propriedades mecânicas e térmicas melhoradas (FIM, 2013; HERRERA-RAMÍREZ, 2015; PAVOSKI, 2015). Nandi *et al* (2012) mostra que nanocompósitos da mistura Etil, Vinil e Acetato (EVA) com óxido de grafeno apresentam variações significativas nas propriedades do encapsulante EVA com pequenas quantidades adicionadas. Em comparação ao encapsulante EVA puro, eles apresentam maior condutividade elétrica, maior resistência à degradação térmica e maior resistência mecânica.

**Asfalto: Características e Forma de Obtenção:** O principal componente do asfalto é o betume, no qual é uma mistura de hidrocarbonetos. A sua forma de obtenção é através de extração, no qual pode ser feita na natureza a partir de rochas asfálticas e em lagos naturais, ou por intermédio de métodos de processamento do petróleo. No Brasil, o asfalto é denominado como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e é definido como um produto sólido em temperaturas baixas, à temperatura ambiente apresenta de forma viscoelástico, e em altas temperaturas torna-se líquido (BERNUCCI *et al.*, 2008). Na pavimentação o uso do CAP é um dos mais importante, pois consiste em ser um material aglomerante, devido ser um aglutinante disponibiliza intensa união dos agregados e possibilita a flexibilidade controlável. O mesmo é durável, impermeável, e resistente à ação das maiores partes dos ácidos, álcalis e sais, sendo capaz de ser empregado com ou sem aditivos. Consequentemente, na maior parte dos pavimentos brasileiros é usado como revestimento com misturas de ligantes asfálticos juntamente com agregados minerais de várias granulometrias. Conforme Bernucci *et al.* (2008) as misturas asfálticas que constitui a camada de pavimento precisam garantir impermeabilidade, maleabilidade, estabilidade, durabilidade, sendo resistente à derrapagem, à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo

- Graduação densa: curva granulométrica contínua e bem graduada e com baixo índice de vazios. Exemplo: concreto asfáltico (CA);
- Graduação aberta: curva granulométrica uniforme com agregados aproximadamente de um mesmo tamanho e com alto índice de volume de vazios, portanto, drenante, viabilizando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Exemplo: camada porosa de atrito (CPA);
- Graduação descontinua: curva granulométrica onde permite que os grãos de maiores dimensões em quantidade predominando em proporção aos grãos de dimensões intermediárias, complementados pela quantidade de finos, a fim de obter uma curva descontinua em múltiplas peneiras e com maior interação entre os agregados graúdos, reconstituindo o esqueleto mineral com resistência à deformação permanente. Exemplo: matriz pátrea asfáltica (*stone matrix asphalt – SMA*); mistura sem agregados de certa duração (*gap-graded*).

Com variados métodos de dosagem de misturas asfálticas, o mais usual nos Estados Unidos é o método *Marshall*, criado em 1930. De acordo com Nascimento (2008) a dosagem *Marshall* é fundamentada em parâmetros volumétricos, onde constitui a distribuição granulométrica dos agregados e sua influência nas misturas asfálticas de forma indireta. Em um programa de pesquisa de asfalto nos Estados Unidos, foi criado pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), um método de dosagem denominado *Superior Performing asphalt Pavements* (SUPERPAVE). A técnica de dosagem SUPERPAVE é fundamentada em contabilizar o teor de projeto de CAP através da determinação do volume de vazios e distinguir a granulometria dos agregados à disposição. O objetivo desse método é considerar e reduzir a deformação plástica, trincas por fadiga e mudanças de temperatura, e observar os efeitos do desgaste e prejuízos da umidade (KENNEDY *et al.*, 1994). A distinção entre os procedimentos de dosagens *Marshall* e SUPERPAVE é o modo de compactação, em contrapartida na dosagem *Marshall* a compactação é por impacto, e amassamento no método SUPERPAVE, a outra característica é o modo de seleção da granulometria que pela regulamentação da SUPERPAVE contém a concepção de pontos de controle e zonas de restrições, e à partir de 1993 é bastante empregado pelos departamentos de transporte dos EUA, no entanto em fases de testes no Brasil (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Conforme Brosseau (2022), o procedimento no qual a França utiliza de 24 dosagens criados na década de 60, foi a partir de uma exigência de um método em que considera as situações climáticas e fluxo de tráfego que o pavimento estaria sujeito. De acordo com o autor, o método da concepção de misturas asfálticas traz a definição de uma análise baseada no desempenho, onde cada parâmetro (índice de volume de vazios, fadiga, adesividade, resistência aos sulcos, de faixa de variação do módulo) é analisado por teste e comparação de valores específicos de normas sobre misturas asfálticas, em função da classificação de desempenho. Segundo D'Angelo *et al.* (2008) as misturas asfálticas são classificadas de acordo com a temperatura de utilização, tendo subdivisões que se formam em quatro grupos: misturas quentes, semimornas, misturas frias, sendo a temperatura de mistura inferior a 100°C é considerada mistura semimorna. Muito usual no Brasil principalmente em áreas urbanas expostas a baixo fluxo de tráfego, a mistura a frio são aqueles do qual o ligante é a emulsão asfáltica ou asfalto diluído, utilizados em camadas intermediárias e sistemas de regularização de revestimento. Sendo confeccionadas entre as temperaturas de 20°C e 50°C, não tendo a necessidade de esquentar o agregado. Misturas semimornas e mornas são preparadas a uma temperatura moderada de misturas quentes e frias, como regra, com calefação parcial dos agregados. A faixa de temperatura para a produção de mistura morna varia de 20°C a 30°C, que é menor que a temperatura de produção de mistura a quente. A mistura quente é obtida combinando o calor e o aglutinante a uma temperatura de mistura de 150°C a 180°C. Possuem boa durabilidade, suportam bem o tráfego intenso e são menos suscetíveis aos efeitos negativos da água no processo de produção da massa asfáltica. Devido ao aumento do tráfego nos últimos anos, faz-se necessário a obtenção de projetos e construções de pavimentos asfálticos mais duráveis, que resistam aos diferentes tipos de deterioração, como sulcos e trincas por fadiga. Dessa forma, foram feitas buscas por autores que estudaram as aplicações do óxido de grafeno (OG) em mistura asfáltica, os efeitos desse material devido às suas propriedades específicas como a capacidade de melhoria da propriedade física na viscosidade, e mecânicas na condição de resistência a tração, a flexão, resistência a compressão, fadiga.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O quadro 1 apresenta os artigos selecionados segundo os critérios propostos, tais pesquisas revelam o potencial do óxido de grafeno no quesito de utilização para misturas asfálticas.

**Quadro 1. Autores que aplicaram o óxido de grafeno na mistura asfáltica**

Autor/Ano	Título
(YU, 2021)	Polyurethane/graphene oxide nanocomposite and its modified asphalt binder: Preparation, properties and molecular dynamics simulation.
(PAULA <i>et al.</i> , 2019)	O Uso De Óxido De Grafeno Para Reparação De Pavimento Asfáltico - Uma Revisão.
(LI & AMIRKHANDIAN, 2019)	Efeitos do óxido de grafeno em ligantes asfálticos.
(FAKHRI, 2021)	Os efeitos do nano óxido de zinco (OZn) e nano óxido de grafeno reduzido (OGR) na propriedade de suscetibilidade à umidade da massa asfáltica.
(ADNAN, 2020)	Melhorando o comportamento mecânico do asfalto misturado a quente usando óxido de grafeno.

Fonte: Autores (2022)

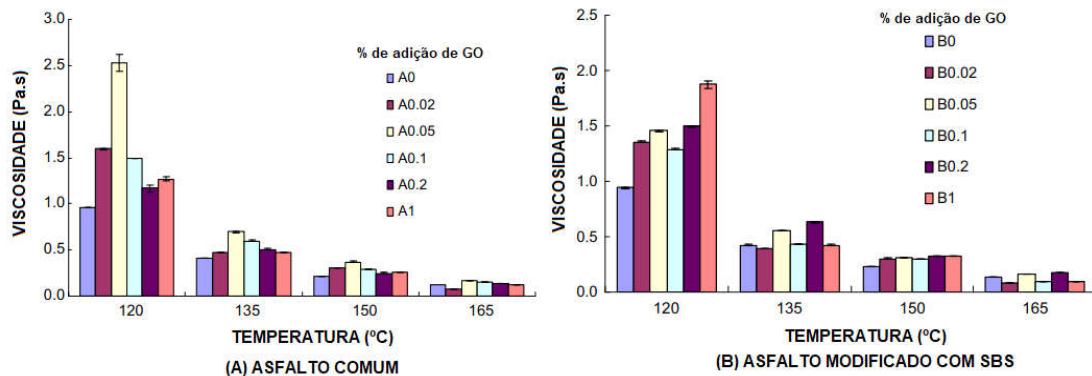
Yu (2021), objetivou a realização do uso do Poliuretano reativo juntamente com óxido de grafeno para preparação de nanocompósitos, que foram polimerizados *in situ*, logo submetido ao cisalhamento em alta velocidade no asfalto afim de obter a dispersão uniforme do sistema asfáltico modificado com nanocompósitos, sendo utilizado modelos moleculares de asfalto com poliuretano e asfalto modificado com nanocompósito Poliuretano/Grafeno foram constituídos no *Materials Studio*, os quais foram simulados por dinâmica molecular. As mudanças estruturais sob a interação de cada molécula foram analisadas. Foram calculados os parâmetros de solubilidade, deslocamento quadrado médio, função de distribuição radial, raio de giração e temperatura de transição vítrea desses modelos. Os resultados mostram que o óxido de grafeno é bem disperso em poliuretano e as partículas do polímero são mais uniformes. Paula *et al.* (2019), discutiu o papel do óxido de grafeno na melhoria das propriedades dos revestimentos asfálticos e nos micros revestimentos

asfálticos apresentado *XV Congresso Latinoamericano de Patología de Construcción*. Seu trabalho qualitativo, realizou uma revisão bibliográfica e identificou 412 artigos, com os seguintes parâmetros de referência para a pesquisa: ano de 2010 a 2019, aderência ao tema proposto, combinação de palavras chave, etc. De acordo com a literatura apresentada, a introdução de 3% de óxido de grafeno melhorou a viscosidade, a temperatura de trabalho e a resistência aos ciclos de fadiga. Li & Amirkhandian (2019), citam que os efeitos dos ligantes asfálticos modificados com óxido de grafeno foram discutidos e os resultados dos testes apresentados na *Nanotechnology in Eco-Efficient Construction*, concluíram que a interação do óxido de grafeno no asfalto, investigada pela espectroscopia de infravermelho transformada de Fourier (FTIR), difração de raios-X (DRX) e cromatografia gasosa-espectrometria de massa (GC-MS), determinou os efeitos do mesmo no desempenho do pavimento de ligantes asfálticos. Além disso, as propriedades térmicas do asfalto modificado foram estudadas por análise termogravimétrica (TG).

Os resultados desse estudo mostram que o gás liberado do asfalto modificado com óxido de grafeno é o CO<sub>2</sub>, que é produzido pela decomposição do óxido uma vez que não há reação química entre o mesmo e os ligantes asfálticos. Fakhri (2021), investigou os efeitos das nanopartículas de Óxido de Zinco (OZn) e nanopartículas de Óxido de Grafeno Reduzido (OGR) na resistência à umidade de misturas de massa asfáltica. Estes, são um tipo de asfalto de mistura a quente contendo duas partes principais de agregados graúdos e argamassa com betume (betume, aditivos estabilizantes e agregados de enchimento). O estudo apresentado na *Case Studies in Construction Materials* utilizou o teste *Marshall* de imersão, teste de resistência à tração indireta, teste de água fervente, teste de fluência estática, adesão *pull-off* e teste de fratura de flexão semicircular (SCB). O betume puro foi modificado com três teores de Óxido de Zinco e Óxido de Grafeno Reduzido (0,2%, 0,4% e 0,6% em peso de ligante asfáltico). Os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa indicaram que a adição de Óxido de Grafeno Reduzido no ligante puro aumenta o ponto de amolecimento e a viscosidade, e diminui as propriedades de penetração e ductilidade do puro betume. Além disso, a adição de Óxido de Zinco no betume pode aumentar a ductilidade, o ponto de amolecimento e a viscosidade e reduziu as propriedades de penetração. Os resultados dos testes mecânicos mostraram que um aumento na porcentagem de óxido de zinco e óxido de grafeno leva a um aumento na estabilidade *Marshall*, resistência à tração indireta, deformação acumulada, resistência à adesão de tração e energia de fratura e melhora o revestimento de betume em agregados em misturas de *Stone*

*Matrix Asphalt* (SMA). Apresentado na *Construction and Building Materials*, Adnan (2020), em seus estudos, aponta que o ligante asfáltico modificado com óxido de grafeno (OG) foi empregado em asfalto misturado a quente para avaliar sua influência nas características da engenharia. Um ligante asfáltico base com grau de penetração 60/70 foi primeiramente misturado com óxido de grafeno em diferentes concentrações (usando um equipamento de mistura de alto cisalhamento) e então empregado para preparar as misturas asfálticas. Uma série de testes de desempenho, por exemplo, módulo de resiliência, fluência dinâmica, divisão de congelamento-descongelamento, imersão *Marshall* e fratura de flexão semicircular (SCB) foram conduzidos para investigar o desempenho de rutura e fadiga, estabilidade à umidade e resistência à fratura das misturas modificadas.





Fonte: Adaptado de Liu, Zhang & Shi (2018).

Figura 3. Influência do OG na performance da viscosidade em diferentes temperaturas para os dois tipos de ligantes asfálticos

Tabela 2. Comparação dos resultados encontrados com a adição de óxido de grafeno para os autores estudados

	Aditivo/Mistura	b	Propriedades Adquiridas
Paula <i>et al.</i> (2019)	Óxido de Grafeno à massa asfáltica	3%	Incremento de viscosidade entre 5,4% e 12,5%
Li & Amirhanian (2019)	Óxido de Grafeno ao ligante asfáltico	1% 3%	Incremento de viscosidade de 4,3% à 12,5% respectivamente.
Yu (2021)	Óxido de grafeno (OG) em poliuretano hermoplástico (PU) na concentração de 3,05 mg/ml em massa asfáltica	(PU/GO) 0,2% (PU/GO) 0,4% (PU/GO) 0,8% (PU/GO) 1,6%	Aumento da Viscosidade e da Resistência Mecânica
Zeng <i>et al.</i> (2020)	Óxido de Grafeno à massa asfáltica	0,1% 0,3% 0,5% 0,7% 0,9%	Aumento da Viscosidade em 135°C (mPa.s): 524, 611, 703, 734 e 748.
Liu, Zhang & Shi (2018)	OG ao ligante asfáltico comum e ao ligante asfáltico modificado com PS poliestireno ou SBS (estireno-butadieno-estireno)	0,02%, 0,05%, 0,1% 0,2% 1%	Melhora no comportamento a fluência e resistência na formação de sulco.
Fakhri (2021)	Óxido de Grafeno Reduzido (OGR) em misturas de massa asfáltica.	0,2% 0,4% 0,6%	Aumento na Resistência à tração de 12,01%, 12,07% e 15,82% para as amostras com óxido de grafeno.
Adnan (2020)	Óxido de grafeno em asfalto de mistura quente	1% 1,5% 2%	Aumento da Resistência à Tração em 4%, 6% e 7% respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados sugerem uma melhora significativa no comportamento mecânico do asfalto mistura a quente pode ser alcançado incorporando OG em comparação com a mistura convencional. Yu (2021), realizou pesquisas adicionando óxido de grafeno em poliuretano hermoplástico nas concentrações 0,2%, 0,4%, 0,8% e 1,6%, logo convertido em dispersão aquosa de óxido de grafeno na mistura de asfalto modificado na concentração de 3,05 mg/ml. Com isso, verificou-se que a adição de óxido de grafeno no asfalto pode aumentar a viscosidade do sistema, de modo que o material asfáltico modificado é menos propício à deformação, amolecimento e de fluir em altas temperaturas do que o asfalto base, o que é benéfico para melhorar o desempenho em altas temperaturas. De acordo com o mecanismo de resistência à propagação de trincas sob sobrecarga, a camada de óxido de grafeno consome energia de tensão e deformação, e melhora sinergicamente o desempenho do asfalto em baixa temperatura, fazendo os pavimentos asfálticos serem menos propensos a aberturas. Resultados corroborados por Li & Amirhanian (2019) que também estudaram a adição de óxido de grafeno ao ligante asfáltico. Seus estudos indicaram um aumento no teor de viscosidade de 4,3% e mínimo de 1,5% em diferentes temperaturas para adição de 1% de óxido de grafeno. Além disso, os resultados indicaram que quando a taxa de adição de 3% de grafeno foi utilizada, os resultados apresentaram um aumento máximo de 12,5% e mínimo de 5,4%. Ele também afirma que não houve reação química entre o óxido e o ligante asfáltico pois CO<sub>2</sub> foi produzido pela decomposição do grafeno. Zeng *et al.* (2020) realizou a adição de OG nas concentrações 0,1%, 0,3%, 0,5%, 0,7% e 0,9% na mistura asfáltica.

Em seu estudo a viscosidade em 135 °C do asfalto modificado aumenta gradualmente com o aumento do teor de OG. No geral, ele afirma que o teor ideal de asfalto modificado com OG é de 0,5% a 0,7% em peso. Ele afirma que esse comportamento é explicado pela forma que a estrutura da camada OG se dispersa no asfalto. Quando as moléculas da cadeia de asfalto entram entre as camadas de OG, a esfoliação de camadas com baixo teor de OG pode efetivamente obstruir o movimento das cadeias de moléculas de asfalto, o que leva a um rápido aumento da viscosidade. Quando o teor de OG é acima de 0,5% em peso, a estrutura de asfalto modificado com OG mostra um certo grau de estabilidade, o movimento molecular da cadeia asfáltica também tende a ser estável e o aumento da viscosidade torna-se lento. Nesse quesito, Paula *et al.* (2019) afirma que os parâmetros de adição do óxido de grafeno sobre o peso do asfalto variam de 0,05% a 3,0%. Adições inferiores a 0,5% não demonstram eficiência para todas as propriedades, sendo o teor ideal indicado de 2,0%. Ainda ressalta que, para aplicação no Brasil é necessário definir qual seria a região pois os parâmetros de variação climática, a viscosidade indicada, o teor de hidrocarbonetos da emulsão asfáltica e a resistência a deformação, irão influenciar no teor ideal de óxido de grafeno a ser adotado. Liu, Zhang & Shi (2018) realizaram a adição de OG (nas concentrações em peso de 0,02%, 0,05%, 0,1%, 0,2% e 1%) ao ligante asfáltico comum e ao ligante asfáltico modificado com PS (poliestireno), SBS (estireno butadieno estireno). Em seus resultados, afirmam que a adição de OG pode melhorar significativamente seu fator de ruptura, temperatura de falha, comportamento de fluência/recuperação e resistência ao enrugamento dos ligantes asfálticos, mas não sua resistência a rachaduras a baixa temperatura. A figura 3 demonstra a variação da

viscosidade com a temperatura para adição de OG na massa asfáltica comum e para adição de OG em asfalto modificado com SBS (estireno butadieno estireno). Adnan (2020) realizou a adição de óxido de grafeno em asfalto de mistura quente nas concentrações com os teores de 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%. Com isso, observou que o óxido de grafeno melhorou consideravelmente o módulo de resiliência da massa asfáltica exposta às temperaturas intermediárias (25° C) e altas (40° C). A deformação permanente da mistura asfáltica diminuiu substancialmente com o aumento do teor de grafeno, comprovando o desempenho superior das misturas asfálticas modificadas no que diz respeito à resistência à formação de sulcos em relação ao asfalto convencional. Em sua análise de sensibilidade à umidade Adnan (2020) também observou que a inclusão de óxido de grafeno melhorou a estabilidade à umidade da mistura asfáltica, aumentando a estabilidade residual e a relação de resistência à tração, as misturas asfálticas com 1% e 1,5% de OG quase tiveram a mesma influência em relação ao dano por umidade (94,79% e 95,89%, respectivamente), enquanto a amostra de OG 2% apresentou a menor suscetibilidade à umidade com estabilidade retida de 97,68%. A incorporação do nanomaterial também aumentou a resistência à fratura da mistura asfáltica, sendo a mistura de OG a 2% (4,65 kJ/m<sup>2</sup>) com a maior resistência, seguida da mistura de 1,5% de OG (3,86 kJ/m<sup>2</sup>) e 1% de OG (3,65 kJ/m<sup>2</sup>) enquanto a da mistura convencional (2,14 kJ/m<sup>2</sup>), indicando uma notável melhoria da resistência à fratura aplicando OG. O que pode ser visto também nos estudos de Fakhri (2021), que realizou a adição de Nanopartícula Óxido de Grafeno Reduzido (OGR) nas concentrações 0,2%, 0,4% e 0,6% na mistura asfáltica. Seus resultados demonstram que o óxido de grafeno aumenta a flexibilidade e melhora o comportamento viscoelástico da massa asfáltica além de aumentar a resistência a fratura e promover uma mistura com uma boa performance contra a propagação de trincas de fadiga em condições secas e úmidas. Além disso, o óxido de grafeno reduz o efeito da umidade na resistência mecânica. Os resultados dos autores estudados podem ser comparados através da Tabela 2, que apresenta as propriedades adquiridas a mistura em função da porcentagem de aditivo utilizada.

## CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o óxido de grafeno é um material promissor para o futuro do asfalto modificado. A análise da literatura permitiu uma familiarização com a estrutura, as propriedades e as aplicações do óxido de grafeno na pavimentação asfáltica, bem como, compreender a importância desse material para a evolução da indústria da construção civil. A partir das informações levantadas, espera-se que em futuras fases experimentais de pesquisas com a aplicação de óxido de grafeno ao asfalto, constata-se melhora das propriedades mecânicas do mesmo, especialmente na resistência a tração na flexão, resistência a compressão e fadiga. Simultaneamente, mais pesquisas sobre o mecanismo do asfalto modificado com nanomateriais e sua microestrutura serão significativas na orientação das práticas de engenharia. Os estudos analisados também indicam que adição de OG no asfalto pode aumentar a viscosidade do sistema composto, de modo que o material asfáltico modificado é menos propício à deformação, amolecer e fluir em altas temperaturas do que o asfalto base, o que é benéfico para melhorar seu desempenho. A inclusão de óxido de grafeno melhora a estabilidade à umidade da mistura asfáltica, aumentando a estabilidade residual e a relação de resistência à tração. A incorporação do nano material também aumenta a resistência à fratura da mistura asfáltica, sendo a melhoria que apresentou maior porcentual, o que garante boa performance contra a propagação de trincas de fadiga em condições secas e úmidas.

## REFERÊNCIAS

ADNAN, Abbas Mukhtar et al. 2020. Improving mechanics behavior of hot mix asphalt using graphene-oxide. *Construction and Building Materials*, v. 254, p. 119261.

- BALBO, José Tadeu. 2015. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos.
- BIANCO, Alberto et al. 2013. All in the graphene family—A recommended nomenclature for two-dimensional carbon materials. *Carbon*, v. 65, p. 1-6.
- BOTAS, C. et al. 2012. The effect of the parent graphite on the structure of graphene oxide. *Carbon*, v. 50, n. 1, p. 275–282.
- CABRAL, Aline Magalhães et al. 2017. Comportamento mecânico de misturas asfálticas com agregado sinterizado de argila modificadas por nanomaterial de multicamadas de grafeno. UFAM. Manaus.
- DNIT 2005. NORMA DNIT 035/2005 - ES Pavimentos flexíveis – Micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero – Especificação de serviço.
- EDWARDS, R. S.; COLEMAN, K. S. 2013. Graphene synthesis: relationship to applications. *Nanoscale*, v. 5, n. 1, p. 38–51.
- FAKHRI, Mansour et al. 2021. The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA). *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, p. e00655.
- FEI, Zhe. 2018. Electrically detecting infrared light. *Nature Materials*, v. 17, n. 11, p. 950-951.
- FREITAS, Ernani Cesar de; PRODANOV, Cleber Cristiano. 2013. Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. Ed. Universidade Feevale. Rio Grande do Sul, 2013.
- FIM, F. et al. 2013. Thermal, electrical, and mechanical properties of polyethylenegraphene nanocomposites obtained by in situ polymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 128, n. 5, p. 2630–2637, 2013.
- KRIPKA, Rosana; SCHELLER, Morgana; BONOTTO, Danusa Lara. 2015. Pesquisa documental: considerações sobre conceitos e características na pesquisa qualitativa. *CIAIQ2015*, v. 2.
- HERRERA-RAMÍREZ, L. C. et al. 2015. How do graphite nanoplates affect the fracture toughness of polypropylene composites? *Composites Science and Technology*, v. 111, p. 9–16.
- LI, Yuanyuan; WU, Shaopeng; AMIRKHANIAN, Serji. 2019. Effects of graphene oxide on asphalt binders. In: *Nanotechnology in Eco-Efficient Construction*. Woodhead Publishing, p. 203-226.
- MOURA, Lucas Narcizo de. 2019. Estudo de um método simples para produção de nanocompósitos de grafeno multicamadas no poliestireno-bloco-polibutadieno-bloco-poliestireno. *Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo.
- NANDI, Debabrata et al. 2012. Reduced Graphene Oxide/Ethylene Vinyl Acetate Co-polymer Composite with Improved Thermal Stability and Flame Retardancy. *Journal of Polymer Materials*, v. 29, n. 4.
- NASCIMENTO, José Carlos; REIS FILHO, Ramílio Ramalho. 2020. GRAFENO: processos de produção e suas aplicações. *Revista Interface Tecnológica*, v. 17, n. 1, p. 661-672.
- PAVOSKI, G. et al. 2015. Polyethylene/reduced graphite oxide nanocomposites with improved morphology and conductivity. *Polymer (United Kingdom)*, v. 81, p. 79–86.
- PAULA, J. et al. 2019. O uso de óxido de grafeno para reparação de pavimento asfáltico-Uma revisão. XV Congresso Latinoamericano de Patología de Construcción. Chiapas - México.
- PÉREZ, Socrates Pedro Muñoz et al. 2021. Uso de Nanomateriales en la Producción del Concreto: *Revisión Literaria. Revista de Ingeniería e Pesquisa Aplicada*, v. 6, n. 4, p. 74-87.
- POTTS, J. R. et al. 2011. Graphene-based polymer nanocomposites. *Polymer*, v. 52, n. 1, p. 5–25.
- SHAMAILA, S.; SAJJAD, A. K. L.; IQBAL, A. 2016. Modifications in development of graphene oxide synthetic routes. *Chemical Engineering Journal*, v. 294, p. 458–477.
- YU, Rui et al. 2021. Polyurethane/graphene oxide nanocomposite and its modified asphalt binder: Preparation, properties and molecular dynamics simulation. *Materials & Design*, v. 209, p. 109994.