



ISSN: 2230-9926

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

IJDR

International Journal of Development Research

Vol. 12, Issue, 05, pp. 56099-56106, May, 2022

<https://doi.org/10.37118/ijdr.24527.05.2022>



RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS

REVISÃO SISTEMÁTICA DA ADIÇÃO DO GRAFENO À MATRIZ CIMENTÍCIA

¹Henrique Oliveira Dias and ²Cesar Augusto de Oliveira Ferrante

¹Acadêmico de Engenharia Civil, Universidade de Gurupi – UNIRG

²Professor, Doutor, Universidade de Gurupi – UNIRG

ARTICLE INFO

Article History:

Received 20th February, 2022

Received in revised form

29th March, 2022

Accepted 10th April, 2022

Published online 27th May, 2022

Key Words:

Grafeno, Concreto, Nanoaditivos,
Óxido de Grafeno, Nanoplaças de Grafeno.

*Corresponding author:

Alan Cruz e Castro

ABSTRACT

Devido ao concreto ser o material de construção mais utilizado do mundo, há um esforço constante para melhorar as suas propriedades físicas e mecânicas. Este trabalho tem como objetivo fazer uma revisão sistemática abordando o uso do grafeno na área de estruturas na construção civil, observando trabalhos com resultados relevantes acerca do uso do mesmo. Foram analisados uma série de artigos, onde os mais relevantes em relação ao que se foi buscado foram separados e submetidos a uma revisão sistemática. As formas do grafeno avaliadas foram óxido de grafeno (OG) e Nanoplaças/nanofolhas de grafeno adicionadas ao cimento. Ficou evidente a melhoria proporcionada à resistência mecânica do concreto com a adição de ambas as formas do grafeno, desde que aplicada com uma porcentagem adequada, segundo as pesquisas. Ressalta-se ainda a importância de mais estudos acerca da fisiologia do grafeno no concreto quanto ao uso em si, pois sabe-se que o conhecimento auxilia na implementação da tecnologia.

Copyright © 2022, Henrique Oliveira Dias and Cesar Augusto de Oliveira. 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: Henrique Oliveira Dias and Cesar Augusto de Oliveira. "Revisão sistemática da adição do grafeno à matriz cimentícia", *International Journal of Development Research*, 12, (05), 56099-56106.

INTRODUCTION

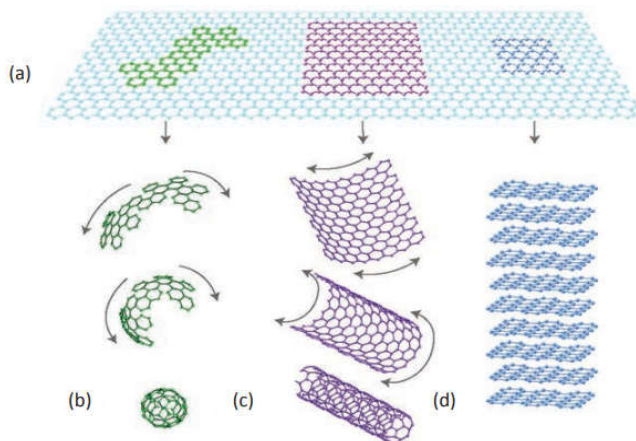
Há um impulso constante para o desenvolvimento de materiais de construção multifuncionais de alto desempenho por meio das tecnologias de engenharia modernas. Esses materiais devem ter boa durabilidade e desempenho mecânico, além de incorporarem multifuncionalidades a fim de serem adequados para futuras aplicações estruturais (DIMOV, ET. AL. 2018). O concreto é o material mais utilizado nos setores de construção civil. É composto de cimento Portland (CP), água, agregados e, muitas vezes, aditivos. O uso de aditivos teve um grande impacto na indústria de cimento / concreto. (AN, 2019). De acordo com ACI (2013), uma mistura é um material diferente de água, agregados, cimento hidráulico e reforço de fibra, usado como ingrediente em uma mistura de cimento para modificar suas propriedades recém-misturadas, o tempo de pega ou de endurecimento. Essas misturas são adicionadas ao lote antes ou durante sua mistura. Uma mistura pode ser classificada como uma mistura química ou como uma mistura mineral. Os principais objetivos dessas misturas minerais são obter economia de custos e melhoria de resistência, durabilidade e desempenho a longo prazo (AN, 2019). Muitos dos danos causados ao concreto são advindos de defeitos químicos ou mecânicos na estrutura cimentícia. Ademais, é importante salientar acerca da necessidade de encontrar compostos que colaborem com a redução de custos, e estimulem um melhor

desempenho estrutural e a otimização da mão de obra. Diante disso, há um amplo consenso na comunidade científica de que o concreto deve ser projetado em nano escala, onde suas propriedades químicas e físico mecânicas podem ser aprimoradas com intervenção da nanotecnologia (DIMOV et. al. 2018). Nos últimos 20 anos, a nanotecnologia revolucionou o mundo científico e tecnológico (BORSCHIVER, 2005). O estudo da mesma trabalha com o desenvolvimento e construção de estruturas a partir dos átomos. Existem diversas técnicas e ferramentas disponíveis para promover e amplificar a capacidade de manipular átomos e moléculas nas quantidades e combinações desejadas, tais como microscopia eletrônica de alta resolução e a espectroscopia e espalhamento da luz visível (SOLDANO, 2010). Na construção civil, os nano materiais à base de carbono como grafite, grafeno, nano tubo de carbono, entre outros, têm recebido grande atenção da indústria de cimento e concreto como aditivos por causa de suas propriedades superiores, com alta resistência à tração e módulo de elasticidade e condutividade elétrica. (PAN, 2015). Atualmente já se utiliza no mercado algumas soluções baseadas em carbono, como fibras de carbono - com função de reforço estrutural - e também existem técnicas para aumentar as resistências por meio de dosagem de materiais finos que diminuem a porosidade dos produtos de cimento (RUIVO, 2021). As excelentes propriedades químicas dos nano materiais fornecem o aprimoramento mais eficiente para a matriz interna do concreto; em consequência do recente progresso na nanomodificação de materiais compósitos de cimento permitiu aplicações em reforço estrutural, redução da

poluição ambiental, (ACS, 2010) e produção de materiais autolimpantes (SILVESTRE, 2016). Dentre os materiais nanotecnológicos, o grafeno vem se mostrando promissor em pesquisas envolvendo a construção civil, incluindo a área de estruturas de concreto. Portanto, este artigo tem como objetivo fazer uma revisão sistemática abordando o uso do grafeno na área de estruturas na construção civil.

Referencial Teórico

Grafeno: O grafeno, atualmente, é considerado um dos mais promissores nanomateriais em estudo no mundo, visto que possui propriedades elétricas, térmicas, ópticas e mecânicas consideradas ótimas. Para a sua produção diversos métodos têm sido pesquisados, entretanto, tais métodos precisam ser aperfeiçoados e o escalonamento ainda constitui uma dificuldade para o setor produtivo (JESUS, 2012). Se ouviu o termo “grafeno” pela primeira vez em 1987, contudo, sua definição oficial veio em 1994 através da International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). Pequenos fragmentos esfoliados a partir de grafite em 2004 foram isolados por pesquisadores e, após análises de caracterização, identificaram que a estrutura era formada por uma única camada de átomos de carbono (JESUS, 2012), um material bidimensional à base de carbono, obtido por meio de esfoliação mecânica a partir de grafite (NOVOSELOV, 2004). A figura 1 esquematiza o grafeno mais algumas outras formas advindas do mesmo.



Fonte: NaturePublishingGroup (2007)

Figura 1. (a) Grafeno, base para formação do (b) fulereno, (c) ser enrolado na forma de um nanotubo ou (d) ser empilhado formando grafite

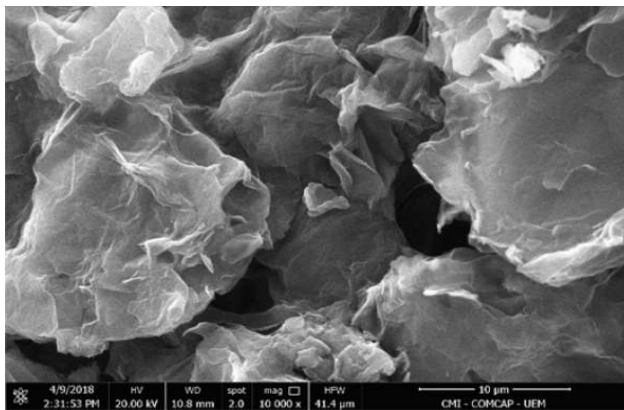
Ainda sobre o grafeno, acredita-se que seja o nanomaterial à base de carbono mais promissor para várias aplicações devido às suas incríveis propriedades físicas de resistência à tração (130 GPa), módulo de Young (1,1 TPa) e propriedades intrínsecas adicionalmente notáveis (LIN; DU, 2020). Quando é descrita a importância de se investigar e buscar mais conteúdo acerca do grafeno, é devido ao fato do mesmo ser tendência de mercado para os próximos anos; sua produção em escala industrial de nanomateriais e aplicações em diversas áreas é algo cogitado. Além de possuir propriedades eletrônicas excepcionais, as propriedades térmicas e mecânicas e de alta condutividade do grafeno oferecem à indústria de nanomateriais uma alternativa potencial ao silício e ao diamante em aplicações tais como: condutores transparentes, eletrodos flexíveis e transparentes para células de energia solar ou de cristal líquido, transistores de efeito de campo, sensores de pressão e ressonadores (JESUS, 2012). A produção do grafeno é feita a partir do grafite, podendo ser utilizados diferentes métodos, sendo o método original conhecido como esfoliação mecânica com fita adesiva. Tal método alcançou a produção de material de alta qualidade para estudos científicos com sucesso, no entanto, a técnica não produz grafeno em grandes quantidades para atender a demanda industrial. Já a esfoliação química em fase líquida (do inglês LPE) é uma técnica utilizada para a produção de grafeno em larga escala. Nesse caso, os

cristais de grafeno ficam preservados (KAULING, 2018). Ainda para Kauling (2018), a técnica de deposição química em fase vapor, sobre metais ou superfícies de silício, tem sido a mais utilizada para estudar as propriedades físicas, ópticas, eletrônicas e espectroscópicas do grafeno, além de ser uma das técnicas mais promissoras para a produção de filmes de grafeno em larga escala, contudo, esse filme possui defeitos que acabam comprometendo a estabilidade estrutural como desvantagem, além de prejudicar suas propriedades físicas. A síntese de grafeno torna-se possível a partir do corte de nanotubos de carbono (PASTRANA-MARTÍNEZ, 2013). Dentre os métodos de síntese mais usados para a produção de grafeno, destaca-se a exfoliação das folhas de grafite por oxidação, por meio de oxidantes químicos fortes tais como HNO_3 , KMnO_4 e H_2O_2 . Visto que grupos funcionais são o conteúdo resultante das folhas de carbono - como ácidos carboxílicos, hidroxilos e epóxidos - o material é normalmente intitulado como óxido de grafeno. Estes grupos funcionais possibilitam a dispersão de folhas de óxido de grafeno em solventes polares, para que se possa permitir um estudo em meio líquido ou fluido (PASTRANA-MARTÍNEZ, 2013). Bianco (2013) em “All in the graphene family - A recommended nomenclature for two-dimensional carbon materials” (Tudo na família do grafeno - uma nomenclatura recomendada para materiais de carbono bidimensionais), fornece uma lista com a função de guia, para que investigadores na área possam nomear mais adequadamente os materiais bidimensionais à base de carbono (tabela 1). Apesar de haver discordâncias, alguns autores utilizam os termos “nanofolhas de grafeno” e “nanoplaquetas de grafeno” para se referirem a utilização de camadas de grafeno, e neste artigo, utilizaremos os termos dos autores de cada artigo referenciado.

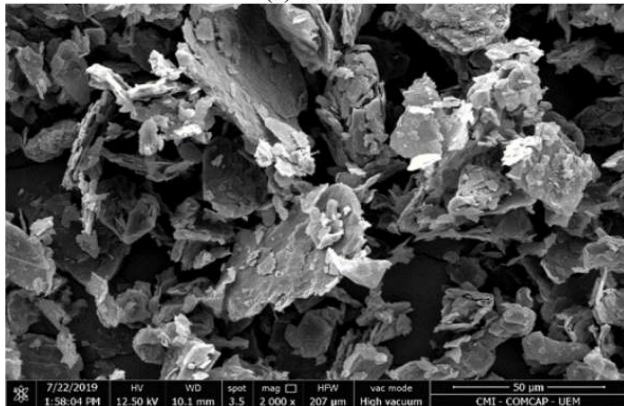
Uso de grafeno no concreto

Para Ruivo (2021): As propriedades dos produtos de cimento Portland vêm cada vez mais sendo melhoradas para determinados usos na construção civil, para isso foram desenvolvidos diversos compostos químicos que podem ser adicionados na mistura e durante a aplicação dos produtos cimentícios. Estes compostos são chamados de aditivos. A ABNT NBR 11768 (2011) define aditivos como “[...] Produtos que adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”. Segundo Lin e Du (2020), diferentes tipos de derivados de grafeno também são empregados como nanoaditivos em materiais à base de cimento, óxido de grafeno (OG) por exemplo, é o nanomaterial à base de grafeno mais pesquisado em compósitos de cimento, devido a estudos apontarem que o OG pode ser mais facilmente disperso na água devido à presença de grupos funcionais hidrofílicos contendo oxigênio, e é comprovado com a capacidade de melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade dos compósitos de cimento de forma eficaz. Sabe-se que o óxido de grafeno (OG) pode ser utilizado em pequenas quantidades em relação a massa de cimento e causa notáveis mudanças em algumas propriedades, por isso, é possível considerá-lo um aditivo químico para argamassas e concretos de cimento Portland (RUIVO, 2021). A ação química do OG com a matriz cimentícia, se dá com o aumento da velocidade de reações de hidratação nas idades curtas. Essas reações favorecem o aumento da resistência à compressão - fator que contribui ainda para o ganho de resistência mecânica da matriz em idades avançadas (BUENO, 2020).

Dentre alguns resultados encontrados ao associar OG com cimento, os mais significativos são aqueles relacionados às resistências à tração na flexão (+52,9%), resistência à compressão (+38,2%) apresentados nas pesquisas de Lvet *et al.* (2014) e a manutenção da trabalhabilidade quando superplastificantes poliacarboxilatos são utilizados em conjunto; desta forma é interessante estudar como o OG pode ser uma alternativa para aumentar o desempenho de argamassas a serem utilizadas em reforço de estruturas. A figura 2 apresenta a diferente morfologia do grafite antes e após a oxidação. O cimento também passa pelo efeito de nano-enchimento, onde ocorre o refinamento na porosidade total e diâmetro de poro dos compósitos de cimento reforçado com grafeno, que pode preencher e dividir os poros mais grossos em poros mais finos, a grande área de superfície específica do



(a) Grafite

(b) Grafite após oxidação – óxido de grafeno
Fonte: Corso et al. (2020)**Figura 2. Morfologia**

grafeno também promove a reação de hidratação do cimento precoce para gerar mais produtos de hidratação como resultado do efeito de nucleação que aumenta a compactação dos compósitos de cimento significativamente (WANG, 2016). Lin e Du (2020) citam que a adição do grafeno proporciona o mecanismo de melhoria da resistência do concreto à entrada de água e elementos agressivos, que é atribuído principalmente ao aumento do caminho de tortuosidade. Acompanhado dos grandes benefícios da introdução do grafeno nos compósitos de cimento está a dispersão homogênea do grafeno na água (DU, 2018). A dispersão efetiva das nanopartículas pode ser classificada como o maior obstáculo no emprego em concreto (BUENO, 2019). Segundo Veras-Agulho et al. (2009), o emprego de pequenas partículas nas misturas cimentícias podem proporcionar elevado grau de hidratação do cimento, entretanto para que isso ocorra é preciso que haja uma dispersão efetiva dos nanomateriais. Esse nanomaterial com grande área superficial é um excelente sítio para reações de hidratação. No compósito de cimento com OG, esses grupos fazem interações fortes com moléculas de água, estabilizando sua absorção e gerando um reservatório de água e canais de transporte de água. Por esses motivos, o OG aumenta o teor de água não evaporável dentro da pasta de cimento e também induz o crescimento ordenado das fases de silicatos de cálcio hidratado (CSH) e de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CHUAH, 2014). As técnicas de dispersão comumente empregadas para dispersar grafeno ou OG são as mesmas. No entanto, OG exibe alta dispersibilidade quando comparado ao grafeno em água devido à presença de grupos funcionais hidrofílicos contendo oxigênio. Como resultado da dispersibilidade superior do OG em água, os compósitos de cimento infundidos com OG mostram uma melhoria mais significativa nas propriedades mecânicas dos compósitos de cimento atribuídas ao efeito nanofiller, efeito de nucleação, efeito de ponte e efeito de ligação. A má dispersão do grafeno na matriz de cimento pode resultar em defeitos e limitar o efeito de nanoreforço do grafeno nos compósitos de cimento, visto que devido à forte força de van der Waals (força de atração que atuam entre moléculas, átomos ou íons), entre as folhas de grafeno e a sua natureza hidrofóbica, o grafeno tenderá a se aglomerar, precipitar e flutuar na água. Lin e Du (2020) comparam as formas de dispersão do grafeno no cimento, e como as

formas de dispersão impactam no resultado final, sendo elas: técnica de dispersão seca de grafeno; técnica de dispersão úmida de grafeno (surfactante + agitação mecânica); técnica de dispersão úmida de grafeno (surfactante + agitação mecânica + ultra-som), como visto na tabela abaixo. Lin e Du (2020) ainda completam que dentre as três técnicas de dispersão na tabela 2, o método de dispersão com uma combinação de surfactante, agitação mecânica e tratamento por ultrassom é comprovadamente a forma mais eficaz para a fabricação de solução de grafeno uniformemente dispersa, e o policarboxilato é sugerido como o surfactante mais adequado para a dispersão do grafeno em água, porque é originalmente projetado como o superplastificante para a matriz de cimento sem grandes efeitos colaterais nos compostos de cimento. Em termos de aumento de durabilidade, tanto o grafeno quanto o GO são capazes de fortalecer a durabilidade dos compostos de cimento como resultado do nano-enchimento e do efeito de tortuosidade. (LIN; DU, 2020).

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente artigo foi desenvolvido por meio de uma revisão sistemática - que é um tipo de revisão que se propõe a responder uma pergunta específica de forma objetiva e imparcial e, para isso, utiliza métodos sistemáticos e definidos a priori na identificação e seleção dos estudos, extração dos dados e análise dos resultados. O intuito é estar comparando artigos científicos que realizaram testes do uso de grafeno em estruturas de concreto, com foco nas características mecânicas do concreto com grafeno, quando comparado ao concreto comum. Primeiramente conduziu-se um levantamento bibliográfico em língua inglesa e portuguesa, buscando referências científicas publicadas na literatura sobre a utilização do grafeno na construção civil, fazendo inicialmente uma pesquisa sobre o material do grafeno, elucidando sua definição, características, propriedades e potencial tecnológico, além das diferentes aplicações. Para esta pesquisa foram retiradas citações de 27 artigos pesquisados por meio das palavras chaves “grafeno” e “nanotecnologia”; posteriormente, foi feito um levantamento bibliográfico sobre o uso grafeno nas estruturas. A seleção dos artigos foi feita com base nos termos em comum “grafeno”, “concreto”, “cimento”, e por meio de citações presentes em artigos pesquisados, buscando a fonte original da informação, os artigos pesquisados se encontram na tabela 3 apresentada a seguir. Com intuito de estar procurando estudos semelhantes, a metodologia de revisão sistemática da literatura foi a escolhida. Neste trabalho serão avaliados os resultados de pesquisas acerca do uso de concreto com grafeno por meio da adição de grafeno no cimento. Os artigos a serem comparados - apresentados na tabela 4 - foram escolhidos por meio de alguns parâmetros, que são: 1. Ter como objetivo os resultados adquiridos no concreto com a adição de grafeno. 2. Foco nos resultados mecânicos decorrentes da adição do grafeno no concreto. Os artigos de Vizini (2020), Tolentino (2018) e Costa (2019) se enquadram em todos os parâmetros analisados. Já o artigo escrito por Horta (2021) foi retirado do estudo devido a não avaliação da resistência mecânica dos corpos de prova.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilização do óxido de grafeno: Luo (2019) realizou testes para medir a influência do óxido de grafeno nas propriedades mecânicas, tenacidade à fratura e microdureza de concreto reciclado. Foi utilizada areia natural modificada (NS) e argamassas à base de areia reciclada (RS) com frações de óxido de grafeno (OG). Foram fabricados com intuito de explorar suas resistências mecânicas até 28 dias de cura. Um total de 30 mL de dispersão de OG puro (1 mg/mL) foi primeiro misturado em 80 mL de água e superplastificante e ultrassonicamente disperso por 1 h na frequência de 40 kHz e potência de 60 W, para preparar uma dispersão OG diluída para reserva. As pastas de argamassa de cimento de cada grupo de mistura com NS ou RS foram fabricadas por meio de um misturador de argamassa. Foram fabricados seis espécimes de prisma de 160mm×40mm×40mm, associação com compactação de lama facilitada e bolhas de ar internas reduzidas com mesa compacta vibratória.

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

MATERIAIS	DEFINIÇÃO
Grafeno	Folha monoatômica com arranjo hexagonal cujas ligações atômicas presentes são do tipo sp ² que não é parte integrante de um material à base de carbono, pode encontrar-se em forma livre em suspensão ou depositado num substrato e as suas dimensões laterais podem variar entre o nanômetro até ao micrômetro.
Camada de grafeno	Folha com espessura monoatômica e com arranjo hexagonal, onde os átomos apresentam entre si ligações sp ² pode ser uma fração de um material que pode ser tridimensional (grafite).
Bicamada de grafeno	Folha bidimensional que pode estar sob a forma de filmes, flocos ou depositada num substrato, contendo uma ou duas camadas de grafeno bem definidas, com dimensões laterais alargadas.
Algumas camadas de grafeno (FLG)	Um subconjunto de camadas de grafeno, contendo entre 2 a 5 camadas de grafeno.
Multicamadas de grafeno (MLG)	Folha bidimensional que pode estar sob a forma de filmes, flocos ou depositada num substrato, contendo um número de camadas de grafeno, entre 2 e 10, bem definidas e contáveis, com dimensões laterais alargadas.
Óxido de grafeno (GO)	Grafeno modificado quimicamente, preparado por oxidação e exfoliação acompanhada por modificação oxidativa. É um material com um elevado teor em oxigénio, caracterizado tipicamente por razões atômicas C/O menores que 3 e próximas de 2.

Fonte: Adaptado de Bianco (2013)

Tabela 2. Compósitos de cimento reforçado com grafeno

TÉCNICA	APLICAÇÃO	RESULTADOS	CONSIDERAÇÕES
Dispersão seca de grafeno	Técnica de dispersão a seco para misturar diretamente o grafeno dentro do cimento Portland comum, usando um misturador elétrico de concreto	Adição de grafeno não causa muita diferença no grau de reação de hidratação do cimento, e a fluidez da pasta de cimento reforçado com grafeno diminui em 39,1% em comparação com a pasta de cimento simples.	Baixo desempenho para obter uma dispersão uniforme do grafeno na matriz de cimento. O grafeno aglomerado impedirá o movimento de compósitos de cimento fresco bloqueando a água dentro dos flocos e restringirá o desempenho do efeito de nucleação que ocorre na superfície do grafeno, pois o grafeno floculado oferece uma área de superfície menor em comparação com o grafeno uniformemente disperso para promover a hidratação do cimento
Dispersão úmida de grafeno (surfactante + agitação mecânica)	Uso de surfactante à base de sulfonato junto com agitação mecânica para a fabricação de solução de grafeno.	A resistência à compressão foi diminuída e nenhuma melhora óbvia para a resistência à flexão foi observada para a pasta de cimento reforçada com grafeno.	A aglomeração do grafeno causada pela má dispersão limitará o efeito do nano-reforço e resultará em zonas de fragilidade nos compósitos de cimento, o que explica as observações na resistência da pasta de cimento e da argamassa
	Solução de grafeno disperso com cimento para fundir a pasta de cimento em espécimes de argamassa para investigar as propriedades mecânicas.	Embora a resistência à compressão seja melhorada com a adição de 0,5% em peso de grafeno, aumentar ainda mais a dosagem de grafeno na matriz de cimento leva a uma redução na resistência à compressão. Este fenómeno pode ser atribuído ao fato da força de repulsão eletrostática criada pelo surfactante não ser forte o suficiente para descascar a monocamada de grafeno das pilhas de grafeno devido à força de van der Waals entre as folhas de grafeno, e o processo de agitação mecânica não ajuda muito para a dispersão do grafeno na água.	
Dispersão úmida de grafeno (surfactante + agitação mecânica + ultra-som)	Junto do surfactante e da agitação mecânica, aplica-se o tratamento ultrassônico.	Obtem-se a dispersão uniforme do grafeno na solução aquosa, pois a forte força de cisalhamento hidrodinâmica e efeito de cavitação criado durante o processo ultrassônico pode superar a força de van der Waals entre as folhas de grafeno para descascar a monocamada de grafeno de pilhas de grafeno.	Assim, mais moléculas de surfactantes são absorvidas na superfície de folhas de grafeno mais finas para alcançar melhor dispersibilidade e estabilidade do grafeno na solução aquosa

Fonte: Adaptado de Lin & Du (2020).

Tabela 3. Relação de escolha dos artigos científicos analisados

REFERÊNCIA	TÍTULO
JESUS, 2012	Grafeno: Aplicações e Tendências Tecnológicas.
BORSCHIVER, 2005	Patenteamento em Nanotecnologia: Estudo Do Setor De Materiais Poliméricos Nanoestruturados.
SOLDANO, 2010	Production, PropertiesAndPotentialOf Graphene.
NOVOSELOV, 2004	Electric Field Effect In AtomicallyThinCarbonFilms.
KAULING, 2018	The Worldwide Graphene FlakeProduction.
PASTRANA-MARTÍNEZ, 2013	Nanotubos e Grafeno: Os Primos Mais Jovens Na Família Do Carbono!
BIANCO, 2013	All In The Graphene Family - A RecommendedNomenclature For Two-Dimensional CarbonMaterials.
RUIVO, 2021	Desenvolvimento De Argamassa Para Reparo De Estruturas Na Construção Civil Utilizando Óxido De Grafeno Como Aditivo
DIMOV 2018	Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene–Concrete Composites For MultifunctionalApplications.
NA, 2019	Edge-Oxidized Graphene Oxide (EOGO) In CementComposites: CementHydrationAndMicrostructure
ACS (2010	ACS Nano 2010. 4, 7, Publicado Em 12 De Julho De 2010. P. 3580–3590.
SILVESTRE, 2016	Review On Concrete Nanotechnology, EuropeanJournalOf Environmental And Civil Engineering.
PAN, 2015	MechanicalPropertiesAndMicrostructureOf A Graphene Oxide–CementComposite.
ATALLAH, 1998	Revisão Sistemática E Metanálises, Em: Evidências Para Melhores Decisões Clínicas.
BUENO, 2019	A Influência Do Tempo E Velocidade De Mistura Na Dispersão De Óxido De Grafeno Em Compósitos Cimentícios.
DU, 2018	Dispersão E Estabilidade De Nanoplacas De Grafeno Em Água E Sua Influência Em Compósitos De Cimento.
VERAS-AGULHO, 2009	MortarAnd Concrete ReinforcedWithNanomaterials. Nanotechnology In Construction.
CHUAH, 2014.	Nano ReinforcedCementAnd Concrete CompositesAnd New Perspective From Graphene Oxide?.

Fonte: Autor (2021)

Tabela 4. Relação dos artigos científicos submetidos a revisão sistemática

REFERÊNCIA	TÍTULO
VIZINI 2020	Efeitos Do Reforço Na Pasta de Cimento Portland Com Óxido De Grafeno Obtido Por Métodos De Química Verde
HORTA, 2021	Avaliação Do Comportamento Reológico De Pastas De Cimento Com Adição De Óxido De Grafeno
TOLENTINO, 2018	Comportamento Mecânico De Compósito De Pasta de Cimento Reforçado Por Nanofolhas De Grafeno
COSTA, 2019	Grafeno E Suas Aplicações Na Construção Civil Teste De Bloco De Concreto Com Grafeno
WANG, 2016	InvestigationoftheMechanicalPropertiesandMicrostructureof Graphene Nanoplatelet–CementComposite
LUO, 2019	Influenceof Graphene Oxide ontheMechanicalProperties, FractureToughness, andMicrohardnessofRecycled

Fonte: Autor (2021)

Tabela 5. Taxa de aprimoramento do cimento com frações variadas de óxido de grafeno.

%GO P.ciment	NS (MPa)	RS (MPa)	Aprimoramento%	
			NS	RS
0	52,7	48,3	-	-
0,025	55,3	50,6	4,93	4,76
0,05	59,5	55	12,9	13,87

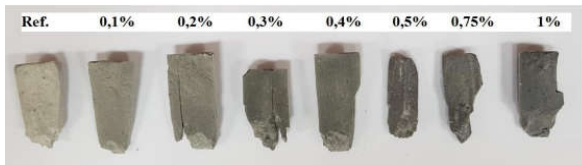
Fonte: Adaptado de Luo (2019).

Tabela 6. Comparação dos resultados de resistência à compressão da matriz cimentícia com adição do grafeno para os autores estudados

Autor	Aditivo	Qnt. Aditivo%	Aumento na média resistência (MPa)	Matriz cimentícia utilizada
Vizini,2020	OGv	0,10	14,7%	Pasta de cimento Portland
		0,30	65,6%	
		>0,30	56,7%	
Tolentino, 2018	Nanofolhas de OG	0,5	80%	Argamassa
		1,0	10%	
Costa,2019	OG - pó	0,001	41,05%	Concreto
Costa,2019	OG - água	0,001	23,20%	Concreto
Wang (2019)	Nanoplacas de OG	0,05	8%	Concreto
Luo (2016)		OG - NS	0,025	4,93%
Luo (2016)	OG - RS	0,05	12,90%	Concreto
		0,025	4,76%	
		0,05	13,87%	

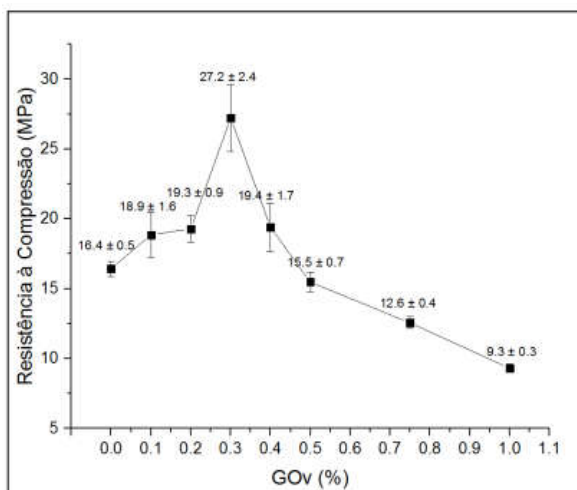
Fonte: Autor (2022)

Todos os espécimes foram desmoldados após 24 horas imersos em água para cura a 28 dias. Após os testes de resistência mecânica a compactação dos corpos de prova, chegou-se nos resultados apresentados na Tabela 5. Vizini (2020), em seu artigo “Efeitos do reforço na matriz cimentícia portland com óxido de grafeno obtido por métodos de química verde” propôs um estudo utilizando uma forma diferente na obtenção do OG, que o autor chama de óxido de grafeno verde (OGv), que tem o intuito de reduzir a produção de resíduo aquoso ácido no processo de neutralização convencional. Neste substituiu-se as etapas de sucessivas lavagens com água, no método de hammer, pela adição de uma determinada quantidade de carbonato de cálcio. Para isso foi adicionada CaCO_3 na proporção mássica de 1:1 de grafite inicial para CaCO_3 . Esse procedimento elevou o pH da suspensão para 7, gerando o OGv. Ademais, foi realizado um ciclo de lavagem com centrifugação; por fim, essa suspensão neutra de OGv foi diluída com água deionizada. Para o teste da efetividade do OGv em relação ao OG, foram caracterizadas técnicas de espectroscopia vibracional difratométricas e por microscopia. Essas caracterizações ilustraram a equivalência entre as espécies produzidas, permitindo a comparação dos resultados obtidos com outros autores que usaram métodos convencionais de obtenção de OG. Ambos os corpos de prova foram preparados em moldes cilíndricos de PVC de 2,2 mm de diâmetro e 4,4 mm de altura. Para a confecção dos corpos de prova (Figura 3) foi estimado o volume necessário a ser retirado da suspensão estoque neutralizada a fim de se obter a massa de OGv para os traços de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,75; 1,0% de OGv para 80 g de cimento e 40 g de água, em uma relação água/cimento (a/c) de 0,5. O tempo de cura foi de 28 dias em uma solução saturada de hidróxido de cálcio até serem realizados os ensaios de propriedade mecânica dos corpos de prova. Os resultados obtidos de resistência à compressão dos corpos de prova de matriz cimentícia Portland com o OGv são apresentados na Figura 4.



Fonte: (VIZINI, 2020)

Figura 3. Corpos de prova com diferentes colorações devido a adição do OGv



Fonte: (VIZINI, 2020)

Figura 4. Descrição do comportamento da resistência à compressão média em relação a adição de OGv ao traço

Observou-se que para os corpos de prova de referência (sem adição de OGv) a resistência à compressão foi de $16,4 \pm 0,5$ MPa. Quando foi adicionado 0,10% de OGv à matriz cimentícia, observou-se um aumento de 14,7% na resistência mecânica. A série de ensaios mostrou um pico de resistência à compressão, quando foi adicionado

0,30% de OGv à matriz cimentícia, com incremento de 65,6% na resistência à compressão em relação ao material de referência. Ademais, observou-se o aumento no teor de OGv em traços superiores a 0,30% resultou em redução da resistência à compressão da matriz cimentícia em até 56,7%, quando comparado com o valor de referência. De acordo com o autor, a causa desse efeito é a aglomeração de OGv nos capilares do cimento, dificultando sua interação com as fases do cimento - que suas principais são: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2(\text{C3S})$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2(\text{C2S})$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3(\text{C3A})$ e $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{C4AF})$ (BARBOSA & PORTELLA, 2019). Costa (2019) em “Grafeno E Suas Aplicações Na Construção Civil Teste De Bloco De Concreto Com Grafeno” propôs realizar teste com bloco de concreto com a adição de grafeno, comparando a diferença da adição de Óxido de Grafeno em Pó e de Óxido de Grafeno diluído em água com o bloco sem a adição de grafeno.

O traço utilizado foi de 1:2:3. Para cada variação do experimento (corpos de prova sem aditivo para atuarem como amostras base, corpos com 0,001% de aditivo (óxido de grafeno em pó) em relação ao cimento e corpos com 0,001% de aditivo (óxido de grafeno diluído em água)) foram moldados 4 corpos-de-prova (figura 5), aos quais foram rompidos após uma idade de 14 dias (aditivos acrescentados no mesmo traço de concreto dos corpos de prova sem aditivo). Os 12 moldes com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, foram submetidos à câmara úmida para cura de 14 dias.



Fonte: COSTA, 2019.

Figura 5. Corpos de prova desmoldados

Analisando os resultados (figura 6), pode-se afirmar que foram obtidos valores bastante coerentes com cada classe de amostra. Ao efetuando um cálculo de média dos valores de cada categoria de corpo de prova, detecta-se uma melhoria de 23,20% na amostra de óxido de grafeno diluído em água; já na amostra de óxido de grafeno em pó adicionado ao corpo de prova, temos 41,05% em média - um resultado significativo e relevante considerando quantidade de óxido utilizada no teste. Salientando acerca das amostras sem aditivo, os resultados se apresentaram similares segundo a composição do traço, tempo de cura controlada em câmara automática e o tipo de cimento utilizado.

Utilização denanoplacas/nanofolhas de grafeno: Tolentino (2018) em “Comportamento Mecânico De Compósito De Matriz Cimentícia Reforçado Por Nanofolhas De Grafeno” propôs reforçar a matriz cimentícia com nanofolhas de grafeno.

Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Carga (kgf)	Resistência (Mpa)	Diferença resistência (%)
0 A	49,52	860	43,80	-
0 B	49,36	880	44,82	-
0 C	49,25	820	41,80	-
0 D	49,16	970	49,40	-
0,001% A (em água)	49,05	1230	62,64	39,34 %
0,001% B (em água)	49,02	930	47,36	5,37%
0,001% C (em água)	49,08	1240	63,15	40,48%
0,001% D (em água)	49,11	950	48,38	7,62%
0,001% A (em pó)	49,86	1190	60,61	34,83%
0,001% B (em pó)	49,78	1160	59,08	31,43%
0,001% C (em pó)	49,89	1240	63,15	40,48%
0,001% D (em pó)	49,92	1390	70,79	57,47%

A diferença foi baseada na média das resistências dos cps sem aditivo (44,955 Mpa)

Fonte: COSTA, 2019.

Figura 6. Diferença de resistência dos corpos de prova

As amostras de grafeno usadas nos experimentos foram disponibilizadas pela Nacional de Grafite Ltda. Com o intuito de promover uma melhor dispersão das nanofolhas na mistura, foi desenvolvido um moinho de bolas. O moinho é dotado de um jarro de vidro para moagem, um motor de 9 CV e de esferas de alumina. No interior do moinho foi despejado o grafite expandido, juntamente com a areia e o cimento Portland, para um tempo de moagem de 2h. Foi definido um traço de 1:3:0,48. As dosagens de grafeno utilizadas, em relação ao peso do cimento, foram de 0,5% e 1,0%. Logo após a moldagem, os corpos-de-prova, ainda no molde (figura 7), foram colocados em câmara úmida, onde permaneceram durante 24 h, com a face superior protegida por uma placa de vidro plano, para serem submetidos à cura inicial ao ar. Terminado o período inicial de cura, os corpos-de-prova foram retirados do molde e submetidos a cura final em água saturada de cal, por 28 dias.



Fonte: (TOLENTINO, 2018)

Figura 7. Detalhe de corpos-de-prova cilíndricos após sua moldagem em molde de silicone

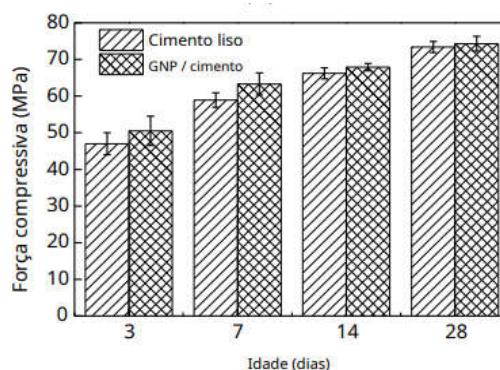
Após o período de cura final, os corpos de prova tiveram sua altura reduzida para 30 mm (por desbaste), para que a razão altura/diâmetro se igualasse a dois, com base na NBR 7215 “Cimento Portland - Determinação de resistência à compressão”. Após tais etapas, o rompimento por meio de compressão axial dos corpos de prova foi efetuado através de uma prensa hidráulica universal, para que então pudesse ser determinada a resistência à compressão e a deformação dos corpos de prova, gerando os dados apresentados na figura 8. Tolentino constatou que as concentrações do grafeno foram favoráveis à propriedade de resistência à compressão do compósito. Analisando as médias dos resultados obtidos através de sua pesquisa, nota-se que para a quantidade de 0,5% de concentração de grafeno, o valor ultrapassou em 80% (ideal) a resistência à compressão axial dos corpos de sem grafeno, enquanto as amostras com a concentração de 1% ultrapassaram em 10%. Wang (2019) testou o concreto com grafeno, onde nanoplaquetas de grafeno (GNPs) foram dispersas

uniformemente em solução aquosa usando metilcelulose (MC) como agente dispersante via processamento ultrassônico. Suspensões homogêneas de GNP foram incorporadas à matriz de cimento para investigar o efeito dos GNPs no comportamento mecânico da pasta de cimento. A proporção ótima de concentração de GNPs para MC foi confirmada como 1: 7 por espectroscopia ultravioleta visível (UV-Vis), e as imagens de microscópio óptico e microscopia eletrônica de transmissão (TEM) exibiram notável desempenho de dispersão. O composto GNP-cimento exibiu melhores propriedades mecânicas com a ajuda de GNPs de superfície modificada. Com 0,05% em peso de GNPs (por peso de cimento) a resistência à compressão do compósito GNP-cimento aumentou até 3-8%, como descrito na figura 9 abaixo.

Corpo-de-prova	Concentração de grafeno		
	0,0%	0,5%	1,0%
1	4,0	5,4	2,6
2	2,2	4,3	2,5
3	1,4	3,4	2,1
4	1,4	2,7	2,0
5	1,2	2,2	2,0
Média	2,0	3,6	2,2
Desvio-padrão	1,1	1,3	0,3
Intervalo de confiança para a média populacional	0,5 < μ < 3,5	1,8 < μ < 5,4	1,8 < μ < 2,6

Fonte: (TOLENTINO, 2018)

Figura 8. Resultados de resistência à compressão axial (em MPa)



Fonte: (WANG, 2016).

Figura 9. Resistência à compressão de cimento simples e compósito GNP-cimento em várias idades

Comparações entre os resultados da revisão sistemática: Comparando os resultados das pesquisas destrinchadas nos tópicos anteriores, tem-se a tabela abaixo:

Analisando a tabela acima, é interessante avaliar que, dentre os artigos Vizini (2020) e Tolentino (2018), as melhores resistências se encontram em quantidades de 0,03% a 0,05% de grafeno em formas de OG e nanofolhas em relação a quantidade de cimento, e valores superiores a essa quantia de material acabam gerando uma menor resistência, apesar da quantia a mais de material. Luo (2016), assim como Wang (2019), em seus trabalhos referentes ao uso de grafeno na matriz cimentícia concreto, também puderam conhecer um ganho na resistência do material, apresentando uma taxa de aumento da resistência considerável. Além disso, percebe-se que, apesar das diferentes variações de materiais na produção da matriz cimentícia em ambos os trabalhos dos autores, trabalhando com 0,05% do peso total em aditivo, o resultado apresentou acréscimo da resistência. Costa (2019), corrobora com a perspectiva que baixas quantidade de OG melhoram a resistência do concreto. Os resultados estão de acordo com as considerações feitas por Lin e Du (2020), onde o grafeno aumenta a resistência do concreto diretamente proporcional a sua quantidade, porém a melhora para de acontecer a uma certa quantidade devido às dificuldades tecnológicas de dispersão do grafeno no cimento, para que alcance seu máximo potencial de melhoria no concreto.

Considerações Finais: O desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao grafeno pode promover a difusão de conhecimento técnico-científico numa área promissora dentro da Engenharia Civil. Dentro dos artigos submetidos a revisão sistemática, é possível perceber que a utilização do grafeno promove uma melhoria na resistência à compressão do concreto, se essa adição for feita com um percentual adequado. Nota-se, também, que ainda há uma dificuldade de se fazer dispersão do grafeno na matriz cimentícia, de forma que o grafeno fique homogêneo disperso, o que interfere na adição de maiores quantidades de grafeno no cimento. É possível concluir então que a utilização do grafeno representa uma possibilidade promissora na Engenharia Civil, no sentido de otimizar os métodos construtivos atingindo altos níveis de resistência e é preciso salientar que torna-se necessário que o composto seja melhor explorado cientificamente quanto aos seus métodos de extração, obtenção e dispersão no cimento, para que suas propriedades sejam potencializadas e para que seu uso de fato represente uma opção a ser mais considerada pelo setor da construção civil. Ademais, incentiva-se a busca por mais pesquisas, tanto acerca do seu uso no concreto com diferentes variáveis quanto na própria melhoria do material - tornando seu uso mais democrático e viável.

REFERÊNCIAS

- ACS Nano (2010). p. 3580–3590. <https://doi.org/10.1021/nn100866w>
- An, J.; Nam, B.H.; Alharbi, Y.; Cho, B.H.; Khawaji, M. (2019). Edge-oxidized graphene oxide (EOGO) in cement composites: Cement hydration and microstructure. *Compos. Part B Eng.*
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 (1996). Cimento Portland – Determinação de resistência à compressão..
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2011). NBR 11768: Aditivos para concreto de cimento Portland.
- BARBOSA, W.; PORTELLA, K. F. (2019). Síntese e caracterização das fases minerais C3S, C2S, C3A e C4AF para utilização em cimento tipo Portland. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653732460>.
- Bianco, A., Cheng, H. M., Enoki, T., Gogotsi, Y., Hurt, R. H., Koratkar, N., Kyotani, T., Monthieux, M., Park, C. R., Tascon, J. M. D., & Zhang, J. (2013). All in the graphene family - A recommended nomenclature for two-dimensional carbon materials. *Carbon*, 65, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.08.038>
- Borschiver S, Guimarães MJOC, Santos TN, Silva FC; Brum PRC. (2005). Patenteamento em nanotecnologia: estudo do setor de materiais poliméricos nanoestruturados. *Polímeros*.
- BUENO, R.M.; MARTINI, S.; SALVADOR, R P. (2019). A INFLUÊNCIA DO TEMPO E VELOCIDADE DE MISTURA NA DISPERSÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS. *Tecsic*.
- BUENO, Roberto Munhoz (2020). A influência do óxido de grafeno e sílica coloidal nas propriedades químicas e mecânicas de matrizes cimentícias”, orientado pelo professor “Renan Pícolo Salvador.. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade São Judas..
- CHUAH, SAMUEL, et al. (2014). “Nano Reinforced Cement and Concrete Composites and New Perspective from Graphene Oxide”. *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 113-24.
- CORSO, M.; BERTO, L. K.; ALBUQUERQUE, A. C. D. de; OLIVEIRA, J. H. de; FAVARO, S. L.; 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. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000100375>
- Costa, Giovani de Oliveira (2019). GRAFENO E SUAS APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL TESTE DE BLOCO DE CONCRETO COM GRAFENO. *Dspace*.
- Dimov, D.; Amit, I.; Gorrie, O.; Barnes, M.D.; Townsend, N.J.; Neves, A.I.; Withers, F.; Russo, S.; Craciun, M.F. (2018). Ultrahigh performance nanoengineered graphene-concrete composites for multifunctional applications. *Adv. Funct. Mater.* 1705183.
- Du, H. Dai Pang S. (2018). Dispersão e estabilidade de nanoplaquetas de grafeno em água e sua influência em compósitos de cimento, *Constr. Construir. Mater.* 167, 403-413.
- Jesus K.A., Freire E. and Guimarães M.J. (2012). Grafeno: aplicações e tendências tecnológicas. *Revista de Química Industrial*. 737:14-19.
- Kauling AP, Seefeldt AT, Pisoni DP, et al. The worldwide graphene flake production. *Adv Mater*. 2018
- Lin, Y.; Du, H. Graphene reinforced cement composites: A review (2020). *Constr. Build. Mater.*, 265.
- Luo, Jianlin & Chen, Shuaichao & Li, Qiuyi & Liu, Chao & Gao, Song & Zhang, Jigang & Guo, Junbing (2019). Influence of Graphene Oxide on the Mechanical Properties, Fracture Toughness, and Microhardness of Recycled Concrete. *Nanomaterials*. 9. 325. 10.3390/nano9030325.
- Novoselov. K.S et al., (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*. https://www.science.org/doi/10.1126/science.1102896?url_ver=Z39.88-2003&rft_id=ori:rid:crossref.org&rft_dat=cr_pub%20%20pubmed.
- Pan Z, He L, Qiu L, Korayem AH, Li G, Zhu JW, Collins F, Li D, Duan WH, Wang MC (2015). Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite. *Cement Concr Compos*.
- Pastrana-Martínez, Luisa; Morales-Torres, Sergio; Gomes, Helder; Silva, Adrián (2013). Nanotubos e grafeno: os primos mais jovens na família do carbono!. *QUÍMICA*. 128, p. 21-27
- RUIVO. Carlos César González Piccoli (2021). Desenvolvimento de argamassa para reparo de estruturas na construção civil utilizando óxido de grafeno como aditivo. *Brazilian Journal of Development*. Curitiba, v.7, n.1, p. 8082-8100.
- Silvestre, J. Silvestre, N. & Brito, J. de. (2016). Review on concrete nanotechnology, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20:4. p. 455-485, DOI: 10.1080/19648189.2015.1042070
- Soldano C, Mahmood A, Dujardin E. (2010). Production, properties and potential of graphene. *Science Direct*.
- Tolentino, Evandro; Santos, Kesley Antônio; Oliveira, André Maurício de; Amaral, Erriston Campos; Silva Neto, Almir (2018). COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITO DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADO POR NANOFOLHAS DE GRAFENO, p. 501-509. In: *73º Congresso Anual da ABM*. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-31402
- VERAS-AGULHO, J; CHOZAS-LIGERO, V.; PORTILLO-RICO, D.; GARCIA-CASAS, M.; GUTIERREZ-MARTINEZ, A.; MIERES-ROYO, J. (2009). Mortar and Concrete Reinforced with Nanomaterials. *Nanotechnology in construction*, vol. 3 Springer. Berlin Heidelberg.
- Vizini, Correa Neto, M., Cristina de Souza, K., Franco Massante, F., Helena Heino Coelho, A., Ariel Ponzio, E., & Antônio Lamounier Camargos Resende, J. (2020). Efeitos do reforço na pasta de cimento portland com óxido de grafeno obtido por métodos de química verde. *Revista Matéria*, 25.
- Wang, Baomin, Ruishuang Jiang, and Zhenlin Wu. 2016. "Investigation of the Mechanical Properties and Microstructure of Graphene Nanoplatelet-Cement Composite" *Nanomaterials* 6, no. 11: 200. <https://doi.org/10.3390/nano61102>