

NANOTECNOLOGIA EM CONCRETOS: AVALIAÇÃO DE DOSAGENS E DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE UM NOVO TIPO DE ÓXIDO DE GRAFENO (CGO).

NANOTECHNOLOGY IN CONCRETES:
EVALUATION OF DOSAGES AND THERMAL CONDUCTIVITY OF
CONCRETES WITH THE INCORPORATION OF A NEW TYPE OF
GRAPHENE OXIDE (CGO)

Natâny Pinho Rosa¹
Marina Costa Totti²
Letícia Lopardi Leal³
Nayton Claudinei Vicentini⁴
Alessandro Henrique de Lima⁵
Pedro Kopschitz Xavier Bastos⁶
Michèle Cristina Resende Farage⁷
Welber Gianini Quirino⁸ Thaís Mayra de Oliveira⁹

DOI: 10.34019/2179-
3700.2024.v24.46203 ENVIADO EM:
7/10/2024
APROVADO EM: 11/11/2024

RESUMO

Pesquisas em concreto vêm sendo desenvolvidas cada vez mais através de tecnologias que visam melhorar suas propriedades. As adições e aditivos são os grandes

¹Engenheira Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Foi bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (BIC/UFJF) no projeto premiado no XXIX SEMIC-UFJF. E-mail: natanypinhorosa@gmail.com

²Mestre em Física pela Universidade Federal de Juiz de Fora, Doutoranda no Grupo de Nanociências e Nanotecnologia da UFJF e colaboradora do projeto. E-mail: marinatotti26@gmail.com.

³Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora e colaboradora do projeto. Email: leticia.leal@engenharia.ufjf.

⁴Mestre em Física pela Universidade Federal de Juiz de Fora, Doutorando no Grupo de Nanociências e Nanotecnologia da UFJF e colaborador do projeto. E-mail: naytonvicentini@hotmail.com.

⁵ Doutor em Física pela Universidade Federal de Juiz de Fora, Pós-doutorando do Departamento de Física da UFJF e colaborador do projeto. Email: alessandrohlima@gmail.com.

⁶ Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo, professor do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora e colaborador do projeto. Email: pedrokop@ufjf.br.

⁷ Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, professora do Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora e colaboradora do projeto E-mail: michele.farage@ufjf.edu.br.

⁸ Doutor em Física pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, professor do Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora e colaborador do projeto. E-mail: wgquirino@ice.ufjf.br.

⁹Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense, professora do Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora e orientadora do projeto premiado no XXIX SEMIC-UFJF. E-mail: thais.mayra@ufjf.br. Endereço profissional: Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Construção Civil, Martelos, 36036330 - Juiz de Fora, MG – Brasil.

parte das vezes, por proporcionar a evolução do concreto. Uma dessas adições é o óxido de grafeno (GO) que consegue melhorar as características do concreto devido às suas excelentes propriedades elétricas, térmicas, mecânicas e óticas, como relatado na literatura. Esse estudo de inovação tecnológica, além de fomentar a pesquisa, tem como objetivo analisar o impacto da incorporação de óxido de grafeno rico em carbonila (CGO) no concreto, avaliando suas propriedades mecânicas e determinando a dosagem ideal para otimizar essas características. Além disso, busca-se investigar a condutividade térmica do concreto com CGO na dosagem considerada ótima. O CGO é uma variação do óxido de grafeno, onde há uma predominância da carbonila ligados a estrutura de carbono em comparação aos demais grupos oxigenados. Foram realizados ensaios de massa específica, índice de vazios, absorção de água por imersão, velocidade de pulso ultrassônico, resistência de compressão axial, resistência de tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático. A concentração de 0,02% de CGO foi definida como dosagem ótima por apresentar os melhores resultados, com aumento de 33,2% de resistência à compressão, 17,9% de resistência à tração, 28,1% de módulo de elasticidade estático, além de redução de 36,2% em índice de vazios, 1,2% em massa específica e 35,7% em absorção de água. O estudo de condutividade térmica do CGO em dosagem ótima no concreto foi limitado à adoção de um Aparato Térmico Alternativo (ATA) e sua comparação foi feita com base apenas no concreto de referência.

Palavras-chave: Concreto. Óxido de grafeno rico em carbonila. Condutividade térmica. Tecnologia.

ABSTRACT

Research into concrete has been increasingly developed through technologies that aim to improve their properties. Additions and admixtures are often the main contributors to the evolution of concrete. One such addition is graphene oxide (GO), which can enhance the characteristics of concrete due to its excellent electrical, thermal, mechanical, and optical properties, as reported in the literature. This technological innovation study, in addition to promoting research, aims to analyze the impact of incorporating carbonyl-rich graphene oxide (CGO) into concrete, evaluating its mechanical properties and determining the optimal dosage to optimize these characteristics. Additionally, the study seeks to investigate the thermal conductivity of CGO concrete at the optimal dosage. CGO is a variation of graphene oxide, where there is a predominance of carbonyl groups attached to the carbon structure compared to the oxygen

ated groups. Tests were conducted for specific mass, void index, water absorption by immersion, ultrasonic pulse velocity, axial compressive strength, splitting tensile strength, and static modulus of elasticity. The concentration of 0.02% CGO was defined as the optimal dosage, presenting the best results, with a 33.2% increase in compressive strength, 17.9% increase in tensile strength, 28.1% increase in static modulus of elasticity, along with a reduction of 36.2% in void index, 1.2% in specific mass, and 35.7% in water absorption. The study of thermal conductivity of CGO at optimal dosage in concrete was limited to the adoption of an Alternative Thermal Apparatus (ATA), and its comparison was made solely based on the reference concrete.

Keywords: Concrete. Carbonyl-rich graphene oxide. Thermal conductivity. Technology.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é uma mistura de cimento Portland, agregados e água que se torna resistente conforme endurece ao longo do tempo. Segundo Allen, Thomas e Jennings (2007), o consumo anual de concreto atinge 11 bilhões de toneladas métricas no mundo, explicado por sua resistência à compressão e comportamento em meio aquoso.

Ao longo dos anos, o concreto evoluiu junto com o avanço da construção civil, onde há uma procura por edifícios mais altos e mais carregados que requerem resistências maiores. A tecnologia envolvida nessa evolução, muitas vezes, advém do uso de aditivos e adições de substâncias, que individualmente têm características desejais ao concreto. Uma dessas substâncias é o óxido de grafeno, que recentemente tem sido foco de diversas pesquisas que possibilitam extrair o seu melhor.

De acordo com Segundo e Vilar (2017), a resistência mecânica do grafeno é maior que a do aço, sua condutividade é maior que do cobre e é um dos materiais mais leves já encontrados. A oxidação química do grafite usando reagentes altamente oxidantes é um método complexo que resulta no óxido de grafeno em formato de pó, dispersível em solventes polares (HUANG et al., 2011). A propriedade hidrofílica do GO é a responsável pela viabilidade de ser

incorporado ao concreto segundo Mohammed et al. (2015).

Na Tabela 1, são exibidos resultados de diversas pesquisas referente ao efeito que o GO tem sobre o concreto em relação à resistência à compressão e tração. A concentração de GO está ordenada de forma crescente correlacionando ao resultado de aumento percentual, com números positivos, ou redução percentual, com números negativos, das resistências em relação à amostra de referência que não contém GO.

Tabela 1 - Resultados da literatura do concreto com GO em relação à resistência

Concentração GO (%)	Aumento/Redução (%)		Fonte
	Resistência à compressão	Resistência à tração	
0,01	42,4	69,7	Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022)
0,02	10	7	Devi e Khan (2020)
0,025	15	2,5	Reddy e Prasad (2022)
0,03	6	6	Jyothimol et al. (2020)
0,03	-25,4	-2,2	Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022)
0,04	11	8	Devi e Khan (2020)
0,05	2,8	-2,5	Devasena e Karthikeyan (2015)
0,05	20	5	Reddy e Prasad (2022)
0,05	10	13	Jyothimol et al. (2020)
0,06	12	14	Devi e Khan (2020)
0,07	6	5	Jyothimol et al. (2020)
0,075	27	6	Reddy e Prasad (2022)
0,08	21	18	Devi e Khan (2020)
0,1	10	1	Devasena e Karthikeyan (2015)
0,1	38	10	Devi e Khan (2020)
0,2	8,33	-3,2	Devasena e Karthikeyan (2015)

Fonte: Autora (2024)

A melhoria na condutividade térmica que o GO pode proporcionar ao concreto reduz seu gradiente de temperatura causado pelo calor de hidratação do cimento, o que pode diminuir a fissuração (SEDAGHAT *et al.*, 2014). No estudo de Sedaghat *et al.* (2014), parte do cimento foi substituída por GO, e foi percebido que 1% de grafeno não afetou significativamente a difusividade térmica, o que é diferente para 5% e 10% de adição. Dessa forma, a condutividade térmica aumentou com a intensidade de grafeno na mistura.

O grupo de Nanociências e Nanotecnologia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) estudou o grafeno em suas diversas formas e desenvolveu uma modificação do método de Hummerstornando-o rico em grupos de carbonila (CGO), como relatado por De Lima (2017). Como composição química do GO

interfere em suas propriedades físico-químicas (De Lima *et al.*, 2020), essa pesquisa busca definir a dosagem ótima de CGO no concreto e estudar o impacto da condutividade térmica dessa mistura.

2 METODOLOGIA

Para a investigação da dosagem ótima, foram testadas 3 concentrações de CGO, sendo elas de 0,02%, 0,03% e 0,05%, em um concreto de 35 MPa. Para isso, produziu-se 9 corpos de prova, com dimensão de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para cada concentração que serão identificados neste trabalho como 0.02-CGO, 0.03- CGO e 0.05-CGO, além mais 9 corpos de prova de concreto de referência, sem incorporação de CGO, que será identificado como Ref-CGO. Para o estudo da condutividade térmica, moldou-se placas de 30cm x 30cm com concreto de referência e com CGO em dosagem ótima.

2.1 Ensaios

Para cada grupo de concentração, foram realizados os ensaios de índice de vazios, absorção de água por imersão, massa específica real, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2002) e velocidade de pulso ultrassônico, de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019) em todos os corpos de prova. Os ensaios de resistência à compressão axial conforme NBR 5739 (ABNT, 2018), resistência à tração por compressão diametral conforme NBR 7222 (ABNT, 2011) e módulo de elasticidade estático conforme NBR 8522-1 (ABNT, 2021) foram empregados em 3 corpos de prova de cada concentração. Para o estudo da condutividade térmica, foi utilizado o equipamento de Aparato Térmico Alternativo desenvolvido por Garcia (2021).

2.2 Dosagem do concreto

O traço do concreto da atual pesquisa, exibido na Tabela 2, é o mesmo para todas as amostras, variando apenas a quantidade de CGO. O traço utilizado foi baseado em estudos anteriores já desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF que utilizaram concretos convencionais.

Tabela 2 - Traço utilizado na confecção do concreto

Cimento	Areia Natural	Brita 0	Água/Cimento	Aditivo (%)	Cimento (kg/m³)
---------	---------------	---------	--------------	-------------	-----------------

1	2,577	3,047	0,52	0,35	340
---	-------	-------	------	------	-----

Fonte: Autora (2024)

Os materiais utilizados foram: água de abastecimento local, Cimento Portland CPV ARI Plus da Holcim do Brasil S.A., areia natural do Rio Preto, brita 0 da Pedra Sul Mineração, aditivo superplastificante ViscoCrete-3535 CB e CGO produzido pelo grupo Nano. A caracterização do CGO pormenorizada está descrita na tese de doutorado de De Lima (2017), onde é apresentado o procedimento de síntese e a comprovação sobre a predominância da carbonila em relação a outros grupos oxigenados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Índice de vazios, absorção e massa específica real

Na Tabela 3, são exibidos os valores de índice de vazios (I_V), absorção (A), e massa específica (ρ_r), de todos os corpos de prova.

Tabela 3 - Resultados índice de vazios, absorção e massa específica concreto com CGO.

Amostras	Ref-CGO			0.02-CGO			0.03-CGO			0.05-CGO		
	I_V (%)	A (%)	ρ_r (g/cm ³)	I_V (%)	A (%)	ρ_r (g/cm ³)	I_V (%)	A (%)	ρ_r (g/cm ³)	I_V (%)	A (%)	ρ_r (g/cm ³)
CP 1	1,8	0,7	2,4	1,2	0,5	2,5	2,3	1,0	2,5	2,3	1,0	2,4
CP 2	1,0	0,4	2,5	0,8	0,3	2,4	2,2	0,9	2,4	2,3	1,0	2,4
CP 3	0,9	0,4	2,4	0,8	0,3	2,4	2,4	1,0	2,5	2,2	0,9	2,4
CP 4	1,1	0,5	2,5	0,7	0,3	2,4	2,3	1,0	2,4	2,3	1,0	2,4
CP 5	1,0	0,4	2,5	0,7	0,3	2,5	2,0	0,8	2,5	2,3	0,9	2,4
CP 6	1,0	0,4	2,5	0,7	0,3	2,5	2,1	0,9	2,5	2,1	0,9	2,4
CP 7	1,5	0,6	2,6	0,4	0,2	2,4	1,7	0,7	2,4	1,7	0,7	2,4
CP 8	0,9	0,4	2,5	0,4	0,2	2,4	2,1	0,9	2,5	1,8	0,8	2,4
CP 9	0,6	0,2	2,4	0,5	0,2	2,4	1,9	0,8	2,5	1,9	0,8	2,4
Média	1,1	0,4	2,5	0,7	0,3	2,4	2,1	0,9	2,5	2,1	0,88	2,4

Fonte: Autora (2024).

Nota-se que a amostra 0.02-CGO foi a única contendo CGO que apresentou índice de vazios inferior ao Ref-CGO, assim como uma menor absorção de água. Logo, apenas a presença de CGO na mistura não é suficiente para produzir o mesmo efeito, sendo a concentração um fator determinante. No entanto, a massa específica se manteve muito próxima em ambas as amostras, com variação entre 0,4% e 1,6% em relação ao Ref-CGO.

Embora esse resultado vá em desacordo aos resultados expostos por Devi e Khan (2020), onde se esperava que a diminuição na absorção de água fosse proporcional ao aumento da concentração de GO, constata-se que apenas 0,02% de CGO causa uma redução de 35,5%, superando os 34% promovida por 0,08% de GO. O mesmo acontece para os índices de vazios, onde Arcanjo e Rossi (2018) alcançaram diminuição de 28,86% com 0,05% de GO, enquanto apenas 0,02% de CGO proporcionou redução de 36,4%.

3.2 Velocidade de pulso ultrassônico

Os resultados obtidos no ensaio de velocidade de pulso ultrassônico são mostrados na Tabela 4. Sabe-se que quanto maior é a velocidade de propagação de pulso ultrassônico, melhores são as condições do concreto. As amostras 0.02-CGO e 0.03-CGO demonstraram melhorias em relação ao concreto de referência com aumento de 12,0% e 17,1%, respectivamente, na velocidade do pulso. De acordo Whitehurst (1966 *apud* Bauer, 2019), o concreto de referência já possui boa qualidade, mas as adições de CGO em 0,02% e 0,03% de concentração aumentaram consideravelmente esse valor.

Tabela 4 - Resultados de velocidade de pulso ultrassônico.

Amostras	Velocidade de pulso ultrassônico (m/s)			
	Ref-CGO	0.02-CGO	0.03-CGO	0.05-CGO
CP 1	3509	4695	4717	3623
CP 2	4950	4785	4695	2801
CP 3	3115	3600	4717	3058
CP 4	3676	4695	4739	3425
CP 5	4854	4831	4695	3040

CP 6	3891	3597	4692	3040
CP 7	3922	4831	4673	3058
CP 8	3571	4785	4695	3175
CP 9	4717	4717	4785	3125
Média	4022,8	4504,0	4712,0	3149,4

Fonte: Autora (2024).

O resultado com 0,05% de CGO se mostrou inferior e, provavelmente, devido a má dispersão de CGO em maior quantidade. Porém, a menor concentração de CGO foi suficiente para superar resultados relatados na literatura para maior quantidade de GO.

3.3 Resistência à compressão axial

Para os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial (Tabela 5), as amostras 0.02-CGO, 0.03-CGO e 0.05-CGO tiveram um aumento de resistência à compressão em relação à referência de 33,2%, 14,5% e 1,6%, respectivamente. O aumento da resistência com o aumento da concentração, como relatam Devi e Khan (2020) e Reddy e Prasad (2022), não foi observado nesse estudo.

O CGO demonstra um comportamento distinto em relação à resistência à compressão em relação ao GO. No entanto, os resultados obtidos com 0,02% de concentração de CGO são semelhantes aos melhores resultados encontrados na literatura, porém utilizando menos nano-material, exceto na pesquisa de Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022) que conseguiram alcançar resultados melhores usando menos material.

Tabela 5 - Resultados resistência à compressão axial.

Amostra	Resistência à compressão axial (MPa)			
	Ref-CGO	0.02-CGO	0.03-CGO	0.05-CGO
CP 1	37,69	50,32	42,68	37,74
CP 2	40,69	52,83	44,61	39,57
CP 3	37,23	50,86	44,87	40,13

Média	38,5	51,3	44,1	39,1
--------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Fonte: Autora (2024).

3.4 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial estão expostos na Tabela 6. Observa-se que a tendência de comportamento do material segue a mesma observada para resistência à compressão. Novamente, a amostra que possui um melhor resultado é a 0.02-CGO, com melhoria de 18,5% seguida por 0.03- CGO e 0.05-CGO, com 7,4% e 1,2% de aumento em relação ao concreto de referência, respectivamente.

Tabela 6 - Resultados resistência à tração por compressão diametral.

Amostra	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)			
	Ref-CGO	0.02-CGO	0.03-CGO	0.05-CGO
CP 4	8,79	9,97	8,76	8,46
CP 5	7,88	9,04	9	7,92
CP 6	7,63	9,65	8,23	8,19
Média	8,1	9,6	8,7	8,2

Fonte: Autora (2024).

Todas as concentrações foram eficazes em aumentar a resistência à tração, diferentemente do observado por Devasena e Karthikeyan (2015), como esperado. No entanto, apesar da melhoria na resistência à tração em todas as concentrações, o comportamento não foi similar ao observado por Devi e Khan (2020) e Reddy e Prasad (2022), que o aumento da resistência se deu com o aumento da concentração de GO.

A utilização de 0,02% de CGO proporcionou resultados semelhantes ao de Devi e Khan (2020) e superiores ao de Reddy e Prasad (2022) e Jythimolet *al.* (2020), que incorporaram exatamente o quádruplo, quántuplo e mais que o dobro de GO, respectivamente. Portanto, exceto pelos estudos de Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022), que obtiveram parte dos resultados mais promissores, a incorporação de CGO no concreto demonstra vantagens em relação ao GO relatado na literatura devido ao menor consumo de nano-material para alcançar

valores próximos ou até mesmo superiores.

3.5 Módulo de Elasticidade Estático

Na Tabela 7 são mostrados os resultados dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de cada corpo de prova das amostras Ref-CGO, 0.02-CGO, 0.03-CGO e 0.05- CGO, assim como seu valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação.

Os resultados evidenciam que as amostras 0.02-CGO, 0.03-CGO e 0.05-CGO apresentam aumento no módulo de elasticidade estático em 27,9%, 14,0% e 2%, respectivamente. Sabe-se que quanto maior o módulo de elasticidade do concreto, menor é sua capacidade de deformação. Dessa forma, a adição CGO ao concreto proporcionou melhorias para o material, em especial a concentração de 0,02%, uma vez que o tornou menos suscetível a deformação sob mesma tensão.

Tabela 7 - Resultado módulo de elasticidade estático.

Amostra	Módulo de elasticidade estático (GPa)			
	Ref-CGO	0.02-CGO	0.03-CGO	0.05-CGO
CP 7	33,51	45,85	36,88	35,13
CP 8	32,91	41,98	39,15	34,06
CP 9	36,86	44,48	41,71	36,26
Média	34,4	44,1	39,2	35,1

Fonte: Autora (2024).

3.6 Condutividade Térmica

Com uma espessura média de 0,084m e 0,089m² de área, a condutividade térmica calculada para a placa de concreto de referência foi de 0,869 W/(m.K). A placa de concreto com adição de CGO em 0,02% com espessura média de 0,087 m e área de 0,089 m², apresentou condutividade térmica calculada de 0,888 W/(m.K). Esse aumento de aproximadamente 2,19% na condutividade térmica não se mostrou significativo, corroborando as conclusões de Sedaghat et al. (2014).

4 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho, que consistia em definir sua dosagem ótima do CGO no concreto e analisar a condutividade térmica, foram alcançados. Portanto, conclui-se:

- A concentração do CGO incorporado ao concreto é ponto muito relevante;
- Define-se a concentração de 0,02% de CGO como dosagem ótima por ser a única com resultados de melhoria em todos os parâmetros analisados;
- O resultado da amostra de 0,05% de CGO, que não foi positivo, pode ter sido acarretado pela maior dificuldade de dispersão do nano-material;
- Obteve-se resultados semelhantes ou superiores na incorporação de CGO ao concreto, usando menos material em comparação à incorporação de GO relatada na literatura, com exceção do estudo de Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022);
- A incorporação de CGO em dosagem ótima eleva a qualidade do concreto para excelente, o torna mais durável e com menor suscetibilidade à corrosão, aumenta a resistência à compressão, à tração e reduz sua deformabilidade.
- A condutividade térmica do concreto em dosagem ótima de CGO apresentou um aumento de 2,19%. Sugere-se estudo mais aprofundado sobre o tema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao departamento de Física da UFJF que proporcionou os materiais necessários para que esse estudo fosse realizado através do grupo de Nanociências e Nanotecnologias (Nano), ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Faculdade de Engenharia da UFJF onde foram desenvolvidos todos os ensaios do estudo e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) junto com a Universidade Federal de Juiz de Fora pelo incentivo e financiamento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALLEN, A.; THOMAS, J.; JENNINGS, H.
Composition and density of nanoscale calcium-silicate-hydrate in cement. *Nature Mater*, v. 6, p. 311–316 (2007). DOI:

<https://doi.org/10.1038/nmat1871>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2005.

BAUER, L. **Materiais de Construção**. 6. ed. atual. Rio de Janeiro: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora, 2019. v. 1. ISBN 978-85-216-3662-5.

DE LIMA, A. H. **Síntese e Caracterização de Óxido de Grafeno e Aplicações em Eletrônica Orgânica**. Tese (Doutorado em Física) - Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

DE LIMA, A. H. *et al.* **Origin of optical bandgap fluctuations in graphene oxide**. *EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B*, v. 93, n. 105, 10 jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjb/e2020-100578-7>.

DEVASENA, M.; KARTHIKEYAN, J. **Investigation on Strength Properties of Graphene Oxide Concrete**. *International Journal of Engineering Science Invention Research & Development*, v. I, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274066457_Investigation_on_strength_properties_of_Graphene_Oxide_Concrete. Acesso em: 30 mar. 2023.

DEVI, S.C.; KHAN, R.A. **Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete.** *Journal of Building Engineering*, v. 27, n. 101007, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101007>.

DUTRA, P.; BERNARDINO, E.; YAMAGUCHI, N. **Incorporação de óxido de grafeno em concreto: avaliação das resistências à compressão e tração.** *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 14, n.1, 2022. ISSN 2176-7270. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/19887>. Acesso em: 27 set. 2022.

GARCIA, D. **Desenvolvimento de Aparato Térmico Alternativo de Baixo Custo para Medição da Condutividade Térmica de Materiais de Construção Isolantes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2021.

HUANG, NM *et al.* **Simpler room-temperature preparation of high-yield large-area graphene oxide.** *Int J Nanomedicine*. 2011;6:3443-8. DOI: <https://doi.org/10.2147/ijn.s26812>.

JYOTHIMOL, P. et al. **Effect of reduced graphene oxide on the mechanical properties of concrete**. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 5th International Conference on MODELING AND SIMULATION IN CIVIL ENGINEERING*, v. 491, n. 012038, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/491/1/012038>

MOHAMMED, A. et al. **Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties**. *Construction and Building Materials*, v. 84, p. 341–347, 1 jun. 2015.

REDDY, P.V.R.K., PRASAD, D. **Investigation on the impact of graphene oxide on microstructure and mechanical behaviour of concrete**. *J Build Rehabil* 7, 30 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41024-022-00166-1>.

SEDAGHAT, A. et al. **Investigation of Physical Properties of Graphene-Cement Composite for Structural Applications**. *Open Journal of Composite Materials*, v. 4, n. 1, p. 12-21, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ojcm.2014.41002>.

SEGUNDO, J.; VILAR, E. **Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos**. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos, América do Sul*, v. 11, ed. 2, p. 54-67, 2016. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/493>. Acesso em: 19 mar. 2023.