

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO RICO
EM CARBONILA AO CONCRETO SOB ÓTICAS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

NATÂNY PINHO ROSA

JUIZ DE FORA

2023

ESTUDO DA VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO RICO
EM CARBONILA AO CONCRETO SOB ÓTICAS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

NATÂNY PINHO ROSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Juiz de Fora, como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Construção Civil

Orientador: Prof. Thaís Mayra de Oliveira, D.Sc.

JUIZ DE FORA

2023

ESTUDO DA VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO RICO
EM CARBONILA AO CONCRETO SOB ÓTICAS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

NATÂNY PINHO ROSA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução N° 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 06/07/2023

Por:

Documento assinado digitalmente
 MICHELE CRISTINA RESENDE FARAGE
Data: 07/07/2023 14:46:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) MICHÈLE CRISTINA RESENDE FARAGE, D.Sc (Examinador 01)

Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 WELBER GIANINI QUIRINO
Data: 10/07/2023 16:41:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. WELBER GIANINI QUIRINO, D.Sc (Examinador 02)

Universidade Federal de Juiz de Fora

ALDO RIBEIRO DE
CARVALHO:14902
817705

Assinado de forma digital por
ALDO RIBEIRO DE
CARVALHO:14902817705
Dados: 2023.07.07 14:51:30
0300

Eng. ALDO RIBEIRO DE CARVALHO, M.Sc (Examinador 03)

Universidade Federal de Ouro Preto

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, quem me guiou e iluminou meu caminho, além de nunca ter me deixado sozinha.

Agradeço aos meus pais, Tânia e Milton Carlos, que nunca permitiram que eu desistisse dessa trajetória acadêmica e nunca mediram esforços para que eu pudesse ter um estudo de qualidade.

À minha irmã, Natália, quem me vê como Engenheira antes mesmo de eu escolher a Engenharia, sempre me incentivando e estando presente em todos os momentos.

Ao meu namorado, Victor, por me apoiar, ser um ponto de refúgio e ter me ajudado em algumas correções de escrita deste trabalho.

Aos amigos da engenharia que compartilharam boa parte dos momentos da faculdade, sejam bons ou ruins, e contribuíram para que minha formação fosse mais completa através de troca de experiências.

À minha orientadora, Thaís, que além de ter me dado a oportunidade de aprender a pesquisar através da Iniciação Científica, me ajudou em diversos ensaios e se mostrou muito presente, disponível em todos os processos e muito preocupada com a qualidade do trabalho. À Marcela, que esteve junto comigo em parte da pesquisa e durante a iniciação científica, me auxiliando com o andamento dos ensaios.

A todos do Laboratório de Materiais de Construção Civil que contribuíram para minha pesquisa e facilitaram diversos processos. Em especial, gostaria de agradecer à Romilda, quem me ensinou boa parte dos ensaios e me ajudou no desenvolvimento prático deste trabalho.

Ao grupo Nano, do departamento de Física da UFJF, pelo fornecimento de parte do objeto de estudo deste trabalho e em especial, à Marina, por sua disponibilidade e paciência com minhas dúvidas.

Agradeço também ao Aldo, professora Michèle e professor Welber por aceitarem o convite como examinadores da banca.

E por último, à UFJF, por ter me proporcionado um ensino gratuito e de qualidade, dando a oportunidade de realizar um trabalho de conclusão de curso com custos envolvidos no desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

O concreto é um material construtivo largamente utilizado no Brasil e no mundo. Esse material está em constante evolução, se tornando mais resistente e eficaz ao contribuir para o avanço do setor da construção civil, onde são vistos edifícios mais altos e com arquiteturas mais ousadas com o passar dos anos. Além de proporcionar o desenvolvimento do campo da construção, inovações no concreto estão diretamente ligadas à sua tecnologia. Grande parte do seu desenvolvimento é atribuído à aditivos ou adições incorporadas à mistura. Relata-se na literatura que a adição de óxido de grafeno (GO) ao concreto é capaz de melhorar suas propriedades devido às excelentes características elétricas, térmicas, mecânicas e óticas do nano-material. O objetivo desta pesquisa é estudar a incorporação do óxido de grafeno rico em grupos de carbonila (CGO) ao concreto, determinando sua dosagem ótima, e comparar os resultados obtidos com os da literatura relacionada ao GO. Essa variação do óxido de grafeno rico em carbonila, desenvolvida pelo grupo de Nanociências e Nanotecnologia da UFJF, possui propriedades distintas que nunca foram incorporadas a matrizes cimentícias. Para o desenvolvimento do trabalho foram testadas as concentrações de 0,02%, 0,03% e 0,05% de CGO em relação ao peso de cimento e comparadas às propriedades de uma amostra de referência sem adição desse material. 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 e dinâmico. As amostras com concentração de 0,02% de CGO apresentaram excelentes resultados, com aumento de 33,2% de resistência à compressão, 17,9% de resistência à tração, 28,1% de módulo de elasticidade estático e 32,7% em módulo de elasticidade dinâmico, além de redução de 36,2% em índice de vazios, 1,2% em massa específica e 35,7% em absorção de água. As amostras com concentração de 0,03% de CGO também apresentaram ganhos em resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, mas houve aumento no índice de vazios e na absorção de água que não são desejáveis. As amostras com concentração de 0,05% de CGO não apresentaram resultados promissores, que podem ser justificados pela maior dificuldade de dispersão do nano-material na mistura. O CGO, portanto, apresentou resultados semelhantes aos do GO relatados na literatura, sendo, na maioria das vezes, superior.

Palavras chave: Tecnologia; Concreto; Óxido de grafeno rico em carbonila.

ABSTRACT

The concrete is a construction material largely applied in Brazil and worldwide. This material is constantly evolving, with better and better properties, being more resistant and more effective by contributing to the development of civil construction sector, in which higher and architecturally bolder buildings are observed over the years. In addition to providing the development of the construction sector, concrete innovations are directly connected to its technology. A large portion of its development is due to additions incorporated to the mixture. It is reported in the literature that the addition of Graphene Oxide (GO) to the concrete is capable of enhancing its properties due to the excellent electrical, thermic, mechanical and optic characteristics of the nano-material. This research's goal is to study the incorporation of the carbonyl-rich graphene oxide (CGO) to the concrete, by determining its optimal dosage, and comparing the obtained results with the ones provided in literature related to the GO. This variation of the graphene oxide, developed by the nanoscience and nanotechnology group at UFJF, has distinct properties that were never before incorporated to cement matrices. In order to develop the work the concentrations of 0,02%, 0,03% and 0,05% of CGO in relation to the weight of cement were tested and compared to the properties of a reference sample that has no addition of this material. Experiments were performed to determine the bulk density, void index, water absorption through immersion, ultrasonic pulse velocity, axial compression strength, tensile strength by diametral compression and static and dynamic modulus of elasticity. Samples with a concentration of 0,02% of CGO demonstrated excellent results, with a 33,2% increase in compressive strength, 17,9% increase in tensile strength, 28,1% increase in static modulus of elasticity and 32,7% increase in dynamic modulus of elasticity. Additionally, there was a reduction of 36,2% in void index, 1,2% in bulk density and 35,7% in water absorption. The samples with a concentration of 0,03% of CGO also showed gains in compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity, but undesired increases were observed in void index and water absorption. On the other hand, samples with a concentration of 0,05% of CGO did not yield promising results, which may be attributed to the greater difficulty in dispersing the nano-material in the mixture. Therefore, CGO exhibited results as good as those reported in the literature for GO, and in most cases, it demonstrated superior performance.

Keywords: Technology; Concrete; Carbonyl-rich graphene oxide.

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 - Estrutura tridimensional do grafite e bidimensional do grafeno, da esquerda para a direita.....	18
Imagem 2 - Imagens de pastas de cimento aos 28 dias misturados em concentração de GO igual: (A) 0% GO (referência); (B) 0,01%; (C) 0,02%; (D) 0,03%; (E) 0,04%; e (F) 0,05%.....	19
Imagem 3 - Imagens de concreto com incorporação de GO em concentração igual a A) 0%; B) 0,025%; C) 0,05%; D) 0,075% e E) 0,1%.....	19
Imagem 4 - Representação do modelo estrutural do óxido de grafeno.	27
Imagem 5 - Representação gráfica da estrutura do óxido de grafeno (A) e do óxido de grafeno rico em carbonila (B). Esferas cinzas, vermelhas e brancas representam os carbonos, oxigênios e hidrogênios, respectivamente.....	28
Imagem 6 - Medidas de óxido de grafeno rico em grupos de carbonila disperso em água para serem usados em diferentes dopagens.	35
Imagem 7 - Organização dos materiais para virada do concreto.....	36
Imagem 8 - Inserção do CGO na mistura de concreto.	37
Imagem 9 - Concreto pronto.....	37
Imagem 10 - Execução ensaio de pulso ultrassônico.	40
Imagem 11 - Ensaio de Resistência à Compressão Axial.	41
Imagem 12 – Pós ruptura dos corpos de prova por compressão axial.....	42
Imagem 13 - Ensaio de tração por compressão diametral.	43
Imagem 14 - Execução ensaio de módulo de elasticidade estático.	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diferenças percentuais das resistências à compressão e à tração das amostras de concreto com incorporação de GO em diferentes concentrações em relação as amostras sem adição de GO retiradas dos estudos de Devi e Khan (2020).	20
Gráfico 2 - Velocidade de pulso ultrassônico em km/s para as amostras em diferentes concentrações de GO nos estudos de Devi e Khan (2020).	21
Gráfico 3- Diferenças percentuais das resistências à compressão e à tração das amostras de concreto com incorporação de GO em diferentes concentrações em relação as amostras sem adição de GO retiradas dos estudos de Devasena e Karthikevan (2015).	22
Gráfico 4 - Diferenças percentuais das resistências à compressão e à tração das amostras de concreto com incorporação de GO em diferentes concentrações em relação as amostras sem adição de GO retiradas dos estudos de Reddy e Prasad (2022).	22
Gráfico 5- Velocidade de pulso ultrassônico em km/s para as amostras em diferentes concentrações de GO nos estudos de Reddy e Prasad (2022).	23
Gráfico 6 - Diferenças percentuais das resistências à compressão e à tração das amostras de concreto com incorporação de GO em diferentes concentrações em relação as amostras sem adição de GO retiradas dos estudos de Jyothimol <i>et al.</i> (2020).	23
Gráfico 7 - Diferenças percentuais das resistências à compressão e à tração das amostras de concreto com incorporação de GO em diferentes concentrações em relação as amostras sem adição de GO retiradas dos estudos de Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022).	24
Gráfico 8 – Curva Granulométrica Areia Natural.	31
Gráfico 9 – Curva Granulométrica da Brita 0.	33
Gráfico 10 - Ciclo de aplicação de tensão para determinação do módulo de elasticidade estático.	45
Gráfico 11 - Diferenças percentuais das propriedades obtidas por ensaios não destrutivos em relação as amostras de referência para as concentrações de 0,02%, 0,03% e 0,05% de CGO.	54
Gráfico 12 - Diferenças percentuais das propriedades obtidas por ensaios destrutivos em relação as amostras de referência para as concentrações de 0,02%, 0,03% e 0,05% de CGO.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo resultados relatados na literatura para resistência à compressão com determinada dosagem de GO.....	25
Tabela 2 - Resumo resultados relatados na literatura para resistência à tração com determinada dosagem de GO.	25
Tabela 3 - Composição granulométrica Areia Natural.....	31
Tabela 4 - Propriedades físicas Areia Natural.....	32
Tabela 5 - Composição Granulométrica Brita 0.....	32
Tabela 6 - Propriedades físicas Brita 0.....	33
Tabela 7 - Traço utilizados na confecção do concreto	35
Tabela 8 - Resultados índice de vazios, absorção de água e massa específica - Ref-CGO.....	47
Tabela 9 - Resultados índice de vazios, absorção de água e massa específica - 0.02-CGO, 0.03-CGO e 0.05-CGO.	47
Tabela 10 - Resultados de velocidade de pulso ultrassônico.....	49
Tabela 11 – Classificação da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação do pulso ultrassônico.	49
Tabela 12 - Resultados resistência à compressão axial.....	50
Tabela 13 - Resultados resistência à tração por compressão diametral.....	51
Tabela 14 - Resultado módulo de elasticidade estático e dinâmico - Ref-CGO.....	52
Tabela 15 - Resultado módulo de elasticidade estático e dinâmico - 0.02-CGO.....	52
Tabela 16 - Resultado módulo de elasticidade estático e dinâmico - 0.03-CGO.....	53
Tabela 17 – Resultado módulo de elasticidade estático e dinâmico - 0.05-CGO.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CESAMA	Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora - MG
CGO	Óxido de Grafeno rico em grupos de carbonila
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
GO	Óxido de Grafeno
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
Nano	Grupo de Nanociências e Nanotecnologia
NBR	Norma Brasileira
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	ÓXIDO DE GRAFENO.....	18
2.1	ÓXIDO DE GRAFENO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS.....	18
2.2	ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM GRUPOS DE CARBONILA.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO.....	29
3.1	MATERIAIS	29
3.1.1	ÁGUA.....	29
3.1.2	CIMENTO	29
3.1.3	AGREGADOS	30
3.1.3.1	Agregado Miúdo	31
3.1.3.2	Agregado Graúdo	32
3.1.4	ADITIVO	33
3.1.5	ÓXIDO DE GRAFENO	34
3.2	DOSAGEM DO CONCRETO.....	35
3.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	36
3.4	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	36
3.5	MÉTODOS DE ENSAIO	38
3.5.1	ENSAIO DE ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E MASSA ESPECÍFICA REAL	38
3.5.2	ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO	39
3.5.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	40

3.5.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	42
3.5.5	ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO ...	44
4	RESULTADOS E ANÁLISES	47
4.1	ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA REAL	47
4.2	ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO.....	48
4.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	50
4.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	51
4.5	ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO	52
4.6	RESUMO DOS RESULTADOS.....	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
5.1	CONCLUSÕES.....	56
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	57
6	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O material mais utilizado no mundo, atualmente, com exceção da água é o concreto (GARCIA; SPIM, SANTOS; 2012), com consumo em mais de 11 bilhões de toneladas métricas a cada ano (ALLEN; THOMAS; JENNINGS, 2007). Segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção, entre 2015 e 2021, foram produzidos anualmente, no Brasil, cerca de 59 milhões de toneladas, em média, do principal componente do concreto: o cimento.

O concreto consiste, em uma mistura de aglomerante, água e agregados, tendo a possibilidade de receber aditivos e adições (PORTO; FERNANDES, 2016). Na antiguidade, os aglomerantes utilizados pelos romanos eram cal e pozolana e a partir de 1824, o concreto como conhecido hoje começou a ser produzido por todo o mundo ao se utilizar o cimento Portland, patenteado por John Aspdin, na Inglaterra (TEATINI, 2005). Desde então, a tecnologia do concreto evoluiu em paralelo ao avanço da construção civil com edifícios cada vez mais altos, mais carregados e com arquiteturas mais ousadas que exigem resistências maiores.

Países desenvolvidos, como Estados Unidos e Canadá, ainda consideram vantajoso o investimento na tecnologia do concreto, dado que esse material permanece em processo de evolução com limites não definidos e não estimados, de acordo com Helene e Andrade (2017). Parte dessa evolução advém de aditivos e adições de substâncias que são acrescentadas ao concreto e possuem a capacidade de alterar suas propriedades, seja no estado fresco ou endurecido, como definido na NBR 11768-1 (ABNT, 2019). Conforme Mehta e Monteiro (2014), “hoje, em todo o mundo, a maior parte do concreto produzido contém um ou mais aditivos/adições; estima-se que de 80 a 90% do concreto produzido nos países desenvolvidos contenham aditivos químicos”.

Adições com nano-materiais tem sido cada vez mais presentes nas pesquisas envolvendo matrizes cimentícias e concreto. Chuah *et al.* (2014) dizem que os nano-materiais tem condições de intensificar a resistência e a durabilidade dos compostos cimentícios quando bem dispersos. Há uma dificuldade envolvida ao explicar a nanotecnologia por ser complexa e multidisciplinar, mas Ramsden (2011) traz a definição mais básica como a “tecnologia em nano-escala”, com partículas menores que 100 nanômetros (nm), sendo 1 nanômetro correspondente a 1 bilionésimo de 1 metro.

Ghafari *et al.* (2014), Singh *et al.* (2013) e Said *et al.* (2012), como exemplo, estudaram os efeitos da adição da nano-sílica ao concreto, enquanto Nasser *et al.* (2022) revisaram sobre essa mesma adição e efeito no concreto exposto a elevadas temperaturas. Al-Hub *et al.* (2012) também estudaram as características mecânicas do concreto nano-composto utilizando nano-fibras e nanotubos de carbono e obtiveram melhoria nas suas propriedades. Já Lu, Ouyang e Xu (2016) mostram o fruto da incorporação de nanotubos de carbono em concretos de alta resistência mecânica.

Uma dessas substâncias em nano-escala que são incorporadas à mistura do concreto é o óxido de grafeno, que é um material inovador do ponto de vista da ciência e tem sido foco de diversas pesquisas recentemente. Liu *et al.* (2012), por exemplo, investigaram sobre as propriedades mecânicas do óxido de grafeno, enquanto Zhu *et al.* (2010), além dessas propriedades, também estudaram outras como eletrônicas, ópticas e térmicas do grafeno e do óxido de grafeno junto com as suas aplicações. Im e Kim (2012) pesquisaram sobre a condutividade térmica do óxido de grafeno, assim como Yu *et al.* (2011), que chegaram a um valor estimado de $6,8 \pm 0,8$ W/m K e $4,9 \pm 0,6$ W/m K, respectivamente. Lee *et al.* (2008) estudaram sobre a elasticidade e força do grafeno, relatando que este é o material mais forte já medido, possuindo módulo de Yang igual a 1 TPa e força intrínseca de 130 GPa.

Segundo e Vilar (2016) fizeram um levantamento sobre o tema grafeno no Brasil e relataram que entre 2010 e 2015, houve 526 publicações de pesquisas brasileiras em âmbito nacional e internacional. De Jesus, Freire e Guimarães (2012) mostraram em seu artigo que entre 2004 e 2011, houve um aumento de patentes concedidas em grafeno de 398% e apenas no ano de 2012, havia cerca de 12 grupos de pesquisa nesta área perante ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

O grafeno consiste em um alótropo bidimensional de carbono em estrutura hexagonal cristalina com espessura de um átomo e possui excelentes propriedades elétricas, térmicas, mecânicas e ópticas que o torna altamente atraente, conforme Sun, Wu e Shi (2011) explicam. O grafeno é mais resistente que o aço, possui condutividade térmica superior ao cobre, maior área superficial que o grafite e é um dos materiais mais leves já encontrados (SEGUNDO; VILAR, 2016). Todas essas características são desejáveis ao concreto, o que torna a adição interessante, uma vez que existe a possibilidade de deixá-lo mais resistente sem aumento significativo do seu peso.

Embora muito utilizado, mais desenvolvido e conhecido no meio de dispositivos eletrônicos, o grafeno é um material versátil que não se aplica apenas a esse contexto. 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). É devido a essa propriedade hidrofílica que é possível dispersar o GO em água, o que viabiliza sua adição à pasta de cimento, trazendo melhorias na estrutura de poros da matriz que a deixa mais resistente a entrada de fluidos e ataques químicos, portanto, aumentando sua durabilidade (MOHAMMED *et al.*, 2015). Além disso, a produção do óxido de grafeno, ao contrário do grafeno puro, pode ser realizada em larga escala, com menor impacto ambiental e com baixo custo (LUCAS, 2018).

Akardh *et al.* (2022), através de uma revisão bibliográfica, comentaram que a incorporação do óxido de grafeno ao concreto é benéfica no ponto de vista sustentável. Segundo eles, o GO proporciona aumento nas resistências mecânicas e maior durabilidade, sendo que é necessária uma menor quantidade em massa de GO para obter resultados promissores semelhantes em relação a outros nano-materiais. Dessa forma, como o óxido de grafeno na composição do concreto melhora a resistência mecânica da mistura, há uma possibilidade de diminuir o consumo de cimento ao manter a resistência desejada através de cálculos que possibilitem essa substituição.

O grupo de Nanociências e Nanotecnologia (Nano) do departamento de física de Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) vem estudando o grafeno em suas diversas formas e desenvolveu uma modificação do método de Hummers que o faz ser rico em grupos de carbonila (CGO), como é relatado por De Lima (2017). Segundo De Lima *et al.* (2020), a composição química do GO interfere nas suas propriedades físico-químicas, ou seja, há diferença entre o GO sem nenhuma predominância de um grupo oxigenado, assim como em GO com predominância de diferentes grupos oxigenados. Como ainda não é conhecido o comportamento desta nova variação de óxido de grafeno incorporada a uma matriz cimentícia, esse objetivo se torna parte do atual trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVA

Assim como o concreto é objeto de pesquisa de muitos projetos, o óxido de grafeno também vem sendo muito estudado, principalmente em métodos de sintetizá-lo com intuito de trazer melhorias onde quer que seja inserido. Essa pesquisa não consiste em reproduzir o que já foi

relatado na literatura, mas sim em investigar as mesmas propriedades relatadas do concreto aditivado com uma nova sintase de óxido de grafeno que ainda não foi vista nesse âmbito.

Segundo Loos (2014), “o Brasil dispõe de razoável infraestrutura científica e de pessoal altamente qualificado em nanociência e nanotecnologia, porém ainda precisa superar grandes desafios para vir a se tornar competitivo nessas áreas”. Portanto, esta pesquisa compõe o desenvolvimento brasileiro em nanotecnologia, onde leva estudos realizados dentro da própria universidade para um âmbito mais específico e técnico dentro da Engenharia Civil.

De Azevedo *et al.* (2020) afirmam que para experimentos em concreto, é viável a utilização de corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, mais conhecidos como corpos de prova de argamassa, sendo possível ter resultados palpáveis. Dito isso, adotou-se essa metodologia a fim de diminuir a quantidade de matérias primas e custos envolvidos, tornando a pesquisa vantajosa economicamente, já que existe limitações financeiras no estudo.

Embora na literatura exista diversas pesquisas com perspectivas promissoras sobre a incorporação de GO em matrizes cimentícias, esses efeitos não se aplicam da mesma forma aos concretos devido a sua complexidade. Dessa forma, essa pesquisa fomenta o desenvolvimento brasileiro na área de nanotecnologia ao trazer visibilidade para a universidade, já que se refere a um nano-material desenvolvido pela própria UFJF e explora os conhecimentos da nanotecnologia em uma estrutura mais complexa que é o concreto, tendo a possibilidade de redução no consumo do material, mantendo um viés sustentável.

1.3 OBJETIVOS

Essa pesquisa tem como objetivo investigar a viabilidade técnica da incorporação do óxido de grafeno rico em grupos de carbonila, elaborado pelo grupo Nano, ao concreto de 35 MPa, analisando suas propriedades mecânicas sob diferentes perspectivas e determinando sua dosagem ótima.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura dessa pesquisa consiste em 5 capítulos para melhor entendimento do desenvolvimento da mesma. O presente capítulo, Introdução, contextualiza o tema ao mostrar sua importância na atualidade e a justificativa de sua relevância, assim como apresenta os objetivos e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo, são abordados tanto os efeitos do óxido de grafeno na incorporação ao concreto, conforme relatados na literatura, quanto sua variação, desenvolvida pelo grupo Nano, que possui alta presença de grupos de carbonila.

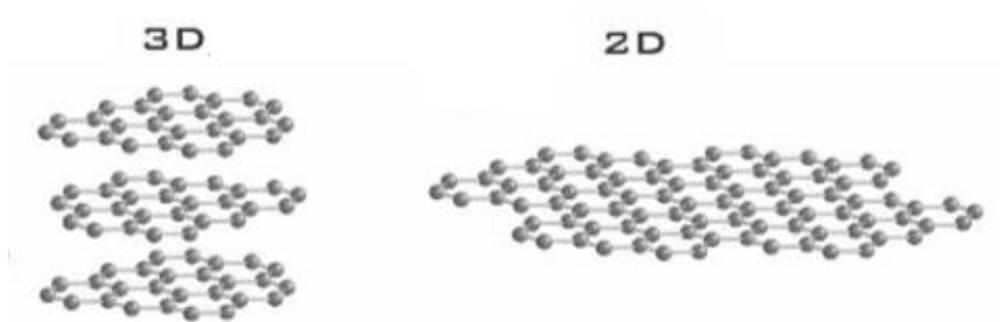
O terceiro capítulo caracteriza os Materiais utilizados na pesquisa e explica os Métodos de Ensaio adotados para a elaboração do estudo, referenciando as normas técnicas utilizadas. O quarto capítulo traz os Resultados obtidos nos ensaios e expõe Análises baseadas nos dados da literatura.

O quinto capítulo finaliza o trabalho ao resumir as Conclusões encontradas a cerca a viabilidade da utilização do CGO produzido pelo Nano da UFJF ao ser incorporado ao concreto, que é um dos principais materiais da construção civil. Além disso, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros no tema.

2 ÓXIDO DE GRAFENO

O grafeno consiste em uma camada bidimensional com espessura de um átomo formado apenas por carbono, ao contrário do grafite que está disposto em uma camada tridimensional também formado por carbonos, como pode ser visto na Imagem 1. As propriedades físicas do grafeno são excelentes, mas sua obtenção é através de um processo complexo e custoso.

Imagem 1 - Estrutura tridimensional do grafite e bidimensional do grafeno, da esquerda para a direita.



Fonte: Imagem retirada de Mikhail (2007).

Os óxidos de grafeno também são materiais bidimensionais, porém com a presença de grupos oxigenados derivados do processo de oxidação e esfoliação química do grafite (VICENTINI, 2019). São esses grupos funcionais, como hidroxila, epóxi, carbonila e carboxila que tornam o material hidrofílico, facilitando sua dispersão em água (STANKOVICH et al., 2006). Essa característica é de grande importância para a incorporação do óxido de grafeno em matrizes cimentícias, pois tem o potencial de melhorar as propriedades da mistura.

O óxido de grafeno não possui exatamente as mesmas propriedades que o grafeno, pois durante o processo de oxidação e esfoliação, surgem danos na estrutura. Porém, há relatos na literatura sobre processos químicos e térmicos capazes de melhorar e controlar algumas propriedades. Além disso, a estrutura do GO é influenciada pelo meio de oxidação, segundo Tavares (2021), que podem interferir nas suas propriedades.

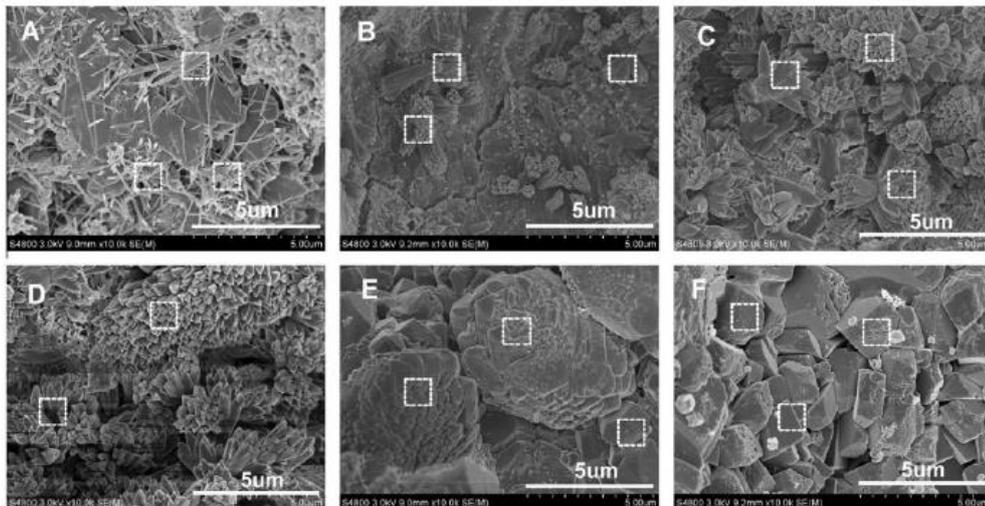
2.1 ÓXIDO DE GRAFENO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Segundo Lv *et al.* (2014), dentre os materiais que compõem o concreto, a pasta de cimento possui propriedades e estrutura com maior influência no todo. Dessa forma, o estudo dessa incorporação é proveitoso, visto que o desempenho do concreto está correlacionado ao da pasta de cimento e essa adição tende a melhorar suas características mecânicas (MOHAMMED; AL-

SAADI,; SANJAVAN, 2018). Kai Gong *et al.*, por exemplo, encontraram um aumento de 46% e 50% na resistência à compressão e à tração, respectivamente, na pasta de cimento com adição de GO.

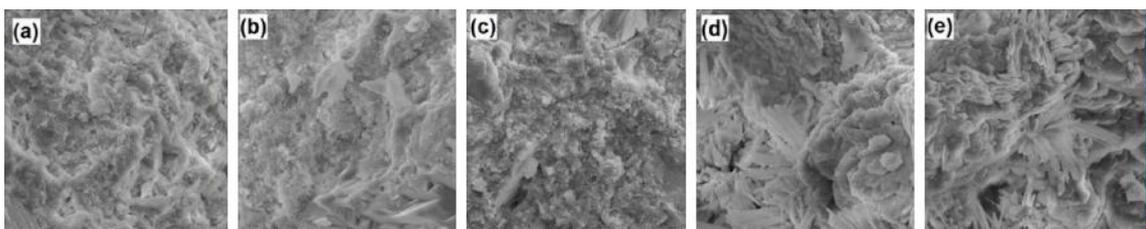
Lv *et al.* (2013), mostra a microestrutura é representado a microestrutura de pasta de cimento com adição de GO com diferentes concentrações através da Imagem 2. Nessa imagem é possível notar que o concreto de referência possui muitos cristais em forma de agulha. Com a presença do GO, essa microestrutura se modifica de forma que aparece a formação de cristais semelhantes a flores, quando em menor concentração, e com o seu aumento esses cristais se tornam mais densos e agregados. Segundo Lv *et al.* (2013), os cristais semelhantes a flores contribuem muito para a tenacidade da matriz. Já na Imagem 3, é exposto a microestrutura do concreto com adição de GO por Reddy e Prasad (2022), onde também é possível observar diferenças com o aumento da concentração, mas não exatamente igual à Imagem 2.

Imagem 2 - Imagens de pastas de cimento aos 28 dias misturados em concentração de GO igual: (A) 0% GO (referência); (B) 0,01%; (C) 0,02%; (D) 0,03%; (E) 0,04%; e (F) 0,05%.



Fonte: Imagem retirada de Lv *et al.* (2013).

Imagem 3 - Imagens de concreto com incorporação de GO em concentração igual a A) 0%; B) 0,025%; C) 0,05%; D) 0,075% e E) 0,1%.

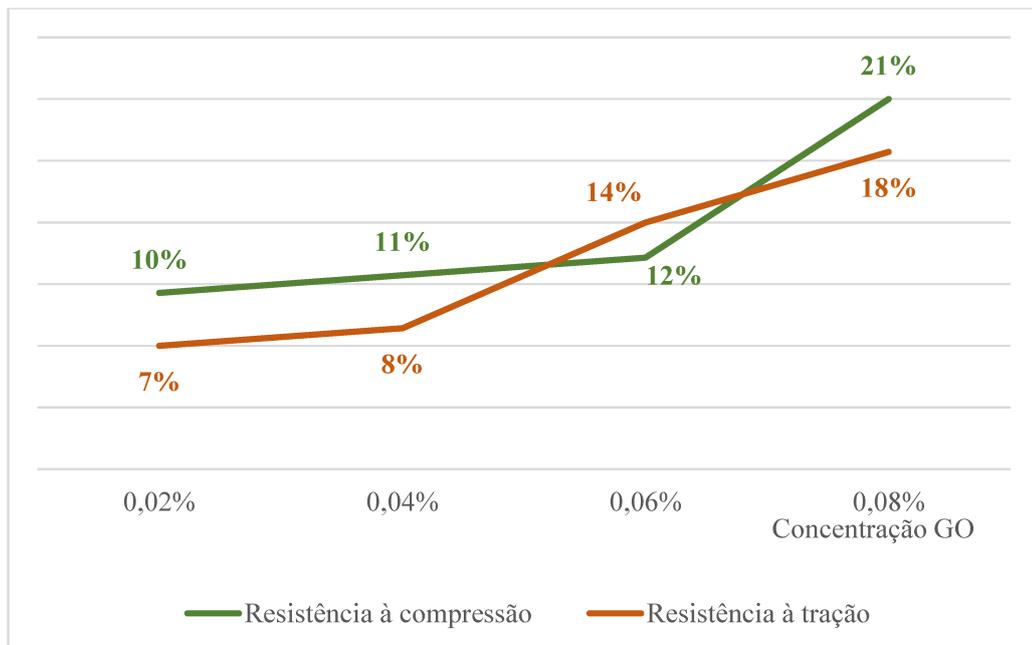


Fonte: Imagem retirada e adaptada de Reddy e Prasad (2022).

Portanto, como o concreto possui um grau de complexidade mais elevado, é crucial compreender o impacto direto do GO em sua estrutura, uma vez que pode apresentar comportamento distinto mesmo que haja uma tendência de similaridade. Devido essa maior complexidade, existem menos estudos da incorporação de GO diretamente ao concreto em comparação às pastas de cimento e argamassas. No entanto, dos poucos relatos encontrados, observa-se resultados interessantes sobre os efeitos de melhoria do GO no concreto, que serviram como base de dados comparativos para o atual trabalho.

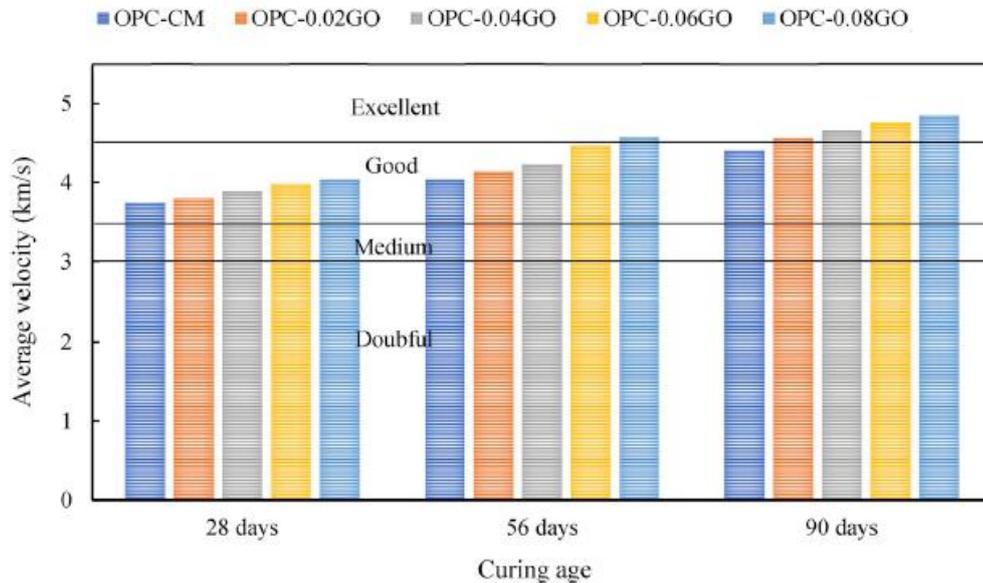
No gráfico 1, são exibidos os resultados dos estudos de Devi e Khan (2020), onde mostra o aumento da resistência à compressão e a tração do concreto com incorporação de GO em 0,02%, 0,04%, 0,06%, 0,07% e 0,1% em relação à massa de cimento, medidos aos 28 dias de idade deste composto. Além desses resultados, os autores também constataam que os concretos com GO tiveram uma queda em relação a absorção de água entre 6,5% e 34% para as menores e maiores dosagens, respectivamente. Nesse estudo também foi feito ensaio de velocidade de pulso ultrassônico nas amostras, onde obtiverem aumento na velocidade com o aumento da concentração de GO na mistura, como pode ser observado no Gráfico 2.

Gráfico 1 - Diferenças percentuais das resistências à compressão e à tração das amostras de concreto com incorporação de GO em diferentes concentrações em relação as amostras sem adição de GO retiradas dos estudos de Devi e Khan (2020).



Fonte: Gráfico retirado e adaptado de Devi e Khan (2020).

Gráfico 2 - Velocidade de pulso ultrassônico em km/s para as amostras em diferentes concentrações de GO nos estudos de Devi e Khan (2020).

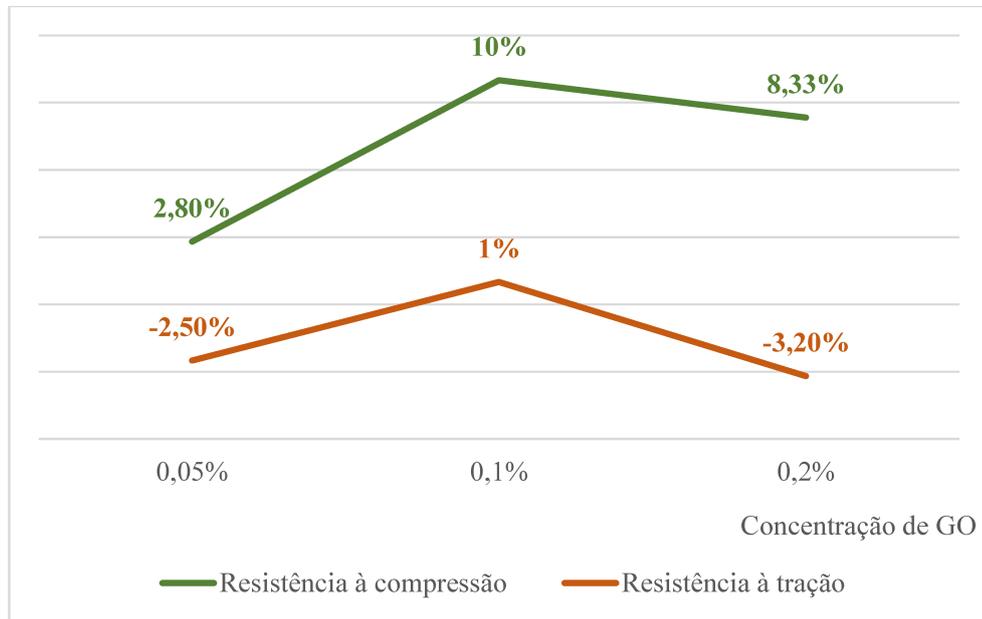


Fonte: Gráfico retirado de Devi e Khan (2020).

Devasena e Karthikeyan (2015), mostram resultados inferiores sobre a influência do GO em concretos utilizando concentrações maiores da adição. Ao analisar amostras de concreto com GO em concentrações de 0,05%, 0,1% e 0,2%, o aumento na resistência à compressão foi de 2,8%, 10% e 8,33%, respectivamente. E em relação a resistência à tração, houve melhoria apenas para 0,01% de concentração de GO, sendo 1% somente. Para 0,05% e 0,2% de GO no concreto, observaram redução de 2,5% e 3,2%, respectivamente, para a resistência à tração. Estes resultados estão representados através do Gráfico 3, onde indicam o aumento, representado por números positivos, ou redução, representada por números negativos, das resistências à tração e compressão para as concentrações de GO em relação à massa de cimento.

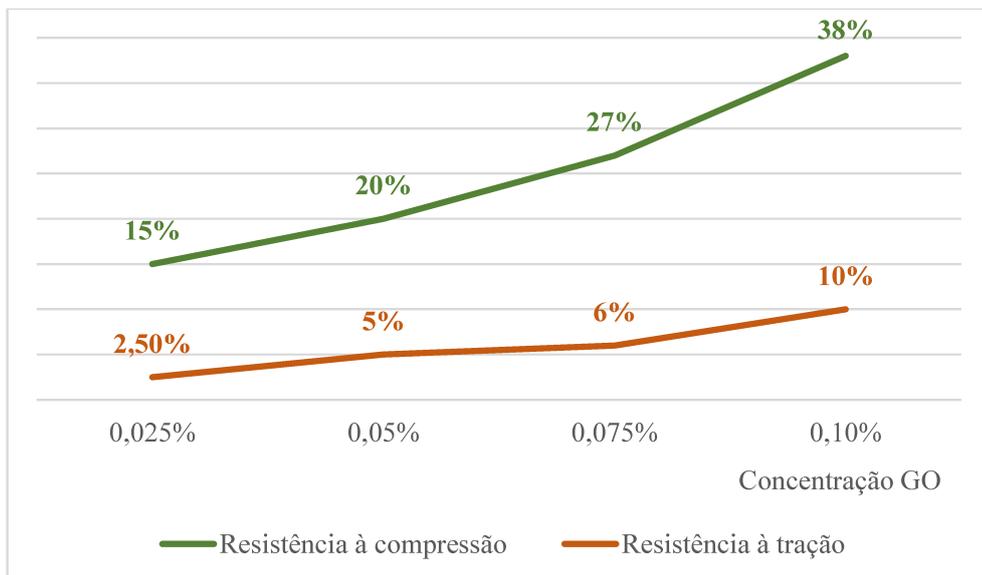
Reddy e Prasad (2022) também expõem resultados interessantes ao estudar o comportamento do concreto incorporado com GO nas concentrações de 0,025%, 0,05%, 0,075% e 0,1% com uso de superplastificante. Aos 28 dias de idade, as amostras contendo GO em 0,025%, 0,05%, 0,075% e 0,1% tiveram aumento de, aproximadamente, 15%, 20%, 27% e 38%, respectivamente em resistência à compressão e aumento de, aproximadamente, 2,5%, 5%, 6% e 10%, respectivamente em resistência à tração, como ilustrado no Gráfico 4. Além desse ensaio, também foi medida a velocidade de pulso ultrassônico das amostras, onde os resultados foram apresentados pelo Gráfico 5, como 3,75 km/s para amostra de referência e 3,9 km/s, 4,05 km/s, 4,3 km/s e 4,7 km/s, aproximadamente, para as concentrações em ordem crescente.

Gráfico 3- Diferenças percentuais das resistências à compressão e à tração das amostras de concreto com incorporação de GO em diferentes concentrações em relação as amostras sem adição de GO retiradas dos estudos de Devasena e Karthikeyan (2015).



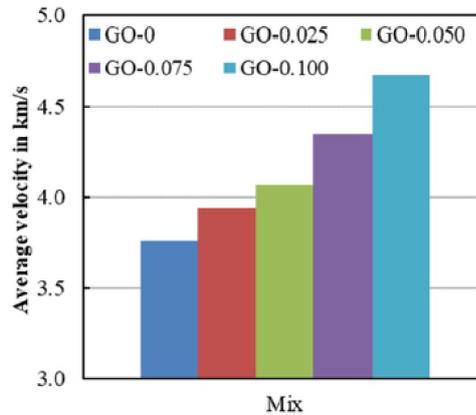
Fonte: Gráfico retirado e adaptado de Devasena e Karthikeyan (2015).

Gráfico 4 - Diferenças percentuais das resistências à compressão e à tração das amostras de concreto com incorporação de GO em diferentes concentrações em relação as amostras sem adição de GO retiradas dos estudos de Reddy e Prasad (2022).



Fonte: Gráfico retirado e adaptado de Reddy e Prasad (2022).

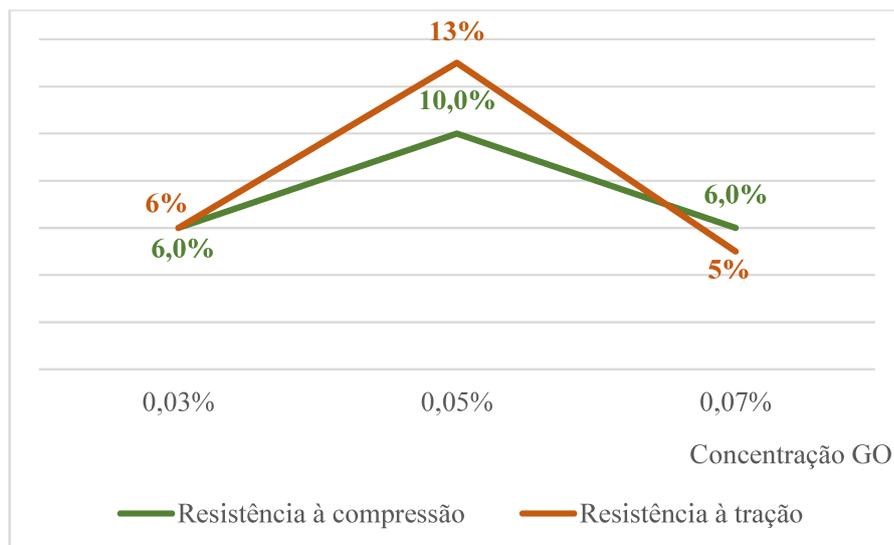
Gráfico 5- Velocidade de pulso ultrassônico em km/s para as amostras em diferentes concentrações de GO nos estudos de Reddy e Prasad (2022).



Fonte: Gráfico retirado de Reddy e Prasad (2022).

Jyothimol *et al.* (2020) também fizeram estudos semelhantes e expõe que ao incorporar 0,03%, 0,05% e 0,07% de GO ao concreto simples, há incremento de, aproximadamente, 6%, 10%, e 6% na resistência à compressão e de 6%, 13% e 5% na resistência à tração, respectivamente, como ilustrado no Gráfico 6. Eles também realizaram ensaios para determinar o módulo de elasticidade dessas amostras, obtendo aumento de 12,2%, 18,2% e 3,0% para as amostras aditivadas com GO em ordem crescente de concentração.

Gráfico 6 - Diferenças percentuais das resistências à compressão e à tração das amostras de concreto com incorporação de GO em diferentes concentrações em relação as amostras sem adição de GO retiradas dos estudos de Jyothimol *et al.* (2020).

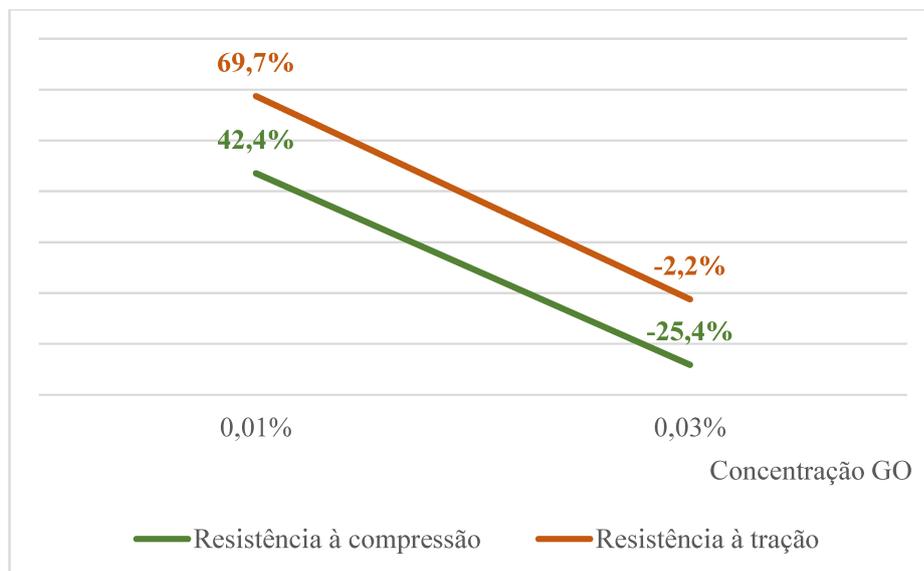


Fonte: Gráfico retirado e adaptado de Jyothimol *et al.* (2020).

Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022) chegaram a encontrar resultados desfavoráveis para a incorporação de GO com 0,03% de concentração, porém surpreendentes para a concentração

de 0,01. Ao incorporar 0,01% e 0,03% de GO, foi notado um aumento de 42,4% e uma diminuição de 25,4%, aproximadamente e respectivamente, para a resistência à compressão axial. Já para a resistência à tração notaram um aumento de 69,7% e redução de 2,2% com a incorporação de 0,01% e 0,03% de GO no concreto, respectivamente. Essa discrepância nos resultados se explica pelo fato de não terem mantido a relação água cimento, como comentado pelos autores. Os resultados deste estudo podem ser observados através do Gráfico 7.

Gráfico 7 - Diferenças percentuais das resistências à compressão e à tração das amostras de concreto com incorporação de GO em diferentes concentrações em relação as amostras sem adição de GO retiradas dos estudos de Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022).



Fonte: Gráfico retirado e adaptado de Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022).

Arcanjo e Rossi (2018) também encontraram alguns resultados desfavoráveis para a incorporação de GO em concreto. Ao incorporar 0,05% de GO, observaram uma redução 4,54% na resistência à compressão em corpos de prova com 28 dias de idade em relação a amostra de controle. Porém, em compensação, obtiveram redução de 28,86% no ensaio de absorção de água, redução de 25,54% no índice de vazios, redução de 24,36% na porosidade e aumento de 4,67% na massa específica.

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados um resumo dos resultados obtidos na literatura e citados neste texto sobre a resistência à compressão e à tração, respectivamente. Na primeira coluna das tabelas, as concentrações do óxido de grafeno em relação à massa de cimento estão dispostas em ordem crescente, enquanto na segunda coluna são indicados os respectivos impactos na resistência à compressão ou à tração. Os números negativos representam uma redução nas resistências, enquanto os positivos apontam para um aumento.

Tabela 1 - Resumo resultados relatados na literatura para resistência à compressão com determinada dosagem de GO.

Concentração GO (%)	Aumento/Redução - Resistência à compressão (%)	Fonte
0,01	42,4	Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022)
0,02	10	Devi e Khan (2020)
0,025	15	Reddy e Prasad (2022)
0,03	6	Jyothimol et al. (2020)
0,03	-25,4	Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022)
0,04	11	Devi e Khan (2020)
0,05	2,8	Devasena e Karthikevan (2015)
0,05	20	Reddy e Prasad (2022)
0,05	10	Jyothimol et al. (2020)
0,05	-4,54	Arcanjo e Rossi (2018)
0,06	12	Devi e Khan (2020)
0,07	6	Jyothimol et al. (2020)
0,075	27	Reddy e Prasad (2022)
0,08	21	Devi e Khan (2020)
0,1	10	Devasena e Karthikevan (2015)
0,1	38	Devi e Khan (2020)
0,2	8,33	Devasena e Karthikevan (2015)

Fonte: Autora (2023)

Tabela 2 - Resumo resultados relatados na literatura para resistência à tração com determinada dosagem de GO.

Concentração GO (%)	Aumento/Redução - Resistência à tração (%)	Fonte
0,01	69,7	Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022)
0,02	7	Devi e Khan (2020)
0,025	2,5	Reddy e Prasad (2022)
0,03	6	Jyothimol et al. (2020)
0,03	-2,2	Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022)
0,04	8	Devi e Khan (2020)
0,05	-2,5	Devasena e Karthikevan (2015)
0,05	5	Reddy e Prasad (2022)
0,05	13	Jyothimol et al. (2020)
0,06	14	Devi e Khan (2020)
0,07	5	Jyothimol et al. (2020)
0,075	6	Reddy e Prasad (2022)
0,08	18	Devi e Khan (2020)
0,1	1	Devasena e Karthikevan (2015)
0,1	10	Devi e Khan (2020)
0,2	-3,2	Devasena e Karthikevan (2015)

Fonte: Autora (2023)

Todos os trabalhos citados não abordam especificamente a predominância que um grupo oxigenado em relação a outro nos óxidos de grafeno. Isso significa que esses óxidos de grafeno podem ou não apresentar uma variabilidade de funções químicas oxigenadas. Assim, não é possível ter certeza quanto ao óxido de grafeno utilizado na literatura mencionada. No entanto, sabe-se que há poucos estudos acerca do óxido de grafeno com alguma predominância em sua estrutura química incorporado ao concreto. Em uma pesquisa realizada por Gholampour *et al.* (2017), foram investigadas matrizes cimentícias com óxido grafeno com diferentes níveis de grupos oxigenados, mas não foi abordado especificamente o óxido de grafeno rico em grupos de carbonila, que é o foco da pesquisa atual.

2.2 ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM GRUPOS DE CARBONILA

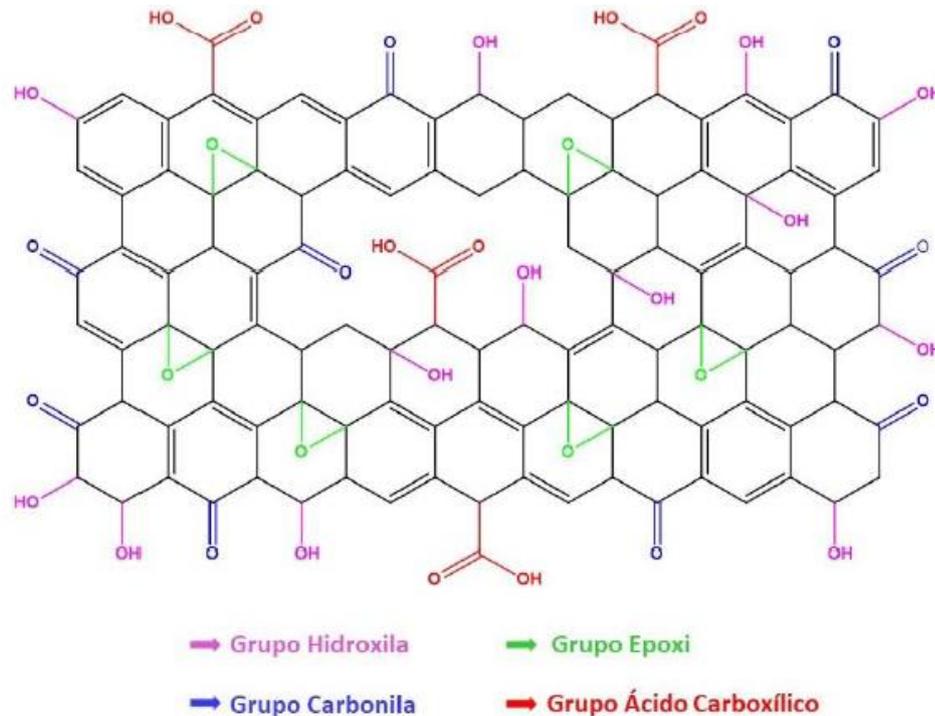
O grafeno é um nano-material com excelentes propriedades, mas sua obtenção ainda é um desafio para o setor industrial. Segundo De Lima (2017), uma das formas mais eficazes de se obter nano-folhas de grafeno em larga escala com baixos custos é por meio da esfoliação química do grafite que resulta em óxido de grafeno e óxidos de grafeno reduzidos. Segundo o autor, o óxido de grafeno possui defeitos na sua estrutura e os grupos oxigenados que surgem durante o forte processo de oxidação causam alterações em suas propriedades, tornando-as inferiores as propriedades do grafeno. No entanto, é possível remover grande parte desses grupos oxigenados e controlar sua quantidade e distribuição de forma que as propriedades do elemento se aproximem as do grafeno (TAVARES, 2021). Na imagem 4, é ilustrado o modelo da estrutura molecular no óxido de grafeno, onde é possível notar seus defeitos estruturais representados pelas falhas na cadeia de carbono.

O óxido de grafeno rico em grupos de carbonila (CGO) é produzido através de uma série de modificações no método de Hummers proposta pelo Nano-UFJF. Os procedimentos de produção deste material são descritos tecnicamente na tese de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Física da UFJF por De Lima (2017), onde também são detalhadas e justificadas as modificações propostas ao método original.

De uma forma simplificada, o CGO é obtido a partir da esfoliação e oxidação química do grafite em duas etapas. Na primeira etapa, os procedimentos do método de Hummers são seguidos ao realizar oxidação química do grafite em flocos, misturando nitrato de sódio e ácido sulfúrico concentrado sob agitação em água gelada e adicionando, posteriormente, permanganato de potássio lentamente. A segunda etapa consiste em adicionar gradualmente ácido sulfúrico com

menor grau de concentração, agitar a mistura em temperatura adequada até que o processo se interrompa ao adicionar peróxido de hidrogênio e submeter o produto a uma série de lavagens para remover íons metálicos e tornar o pH neutro (DE LIMA *et al.*, 2020).

Imagem 4 - Representação do modelo estrutural do óxido de grafeno.



Fonte: Imagem elaborada por Tavares (2021) baseada na proposta de Lerf-Klinowski.

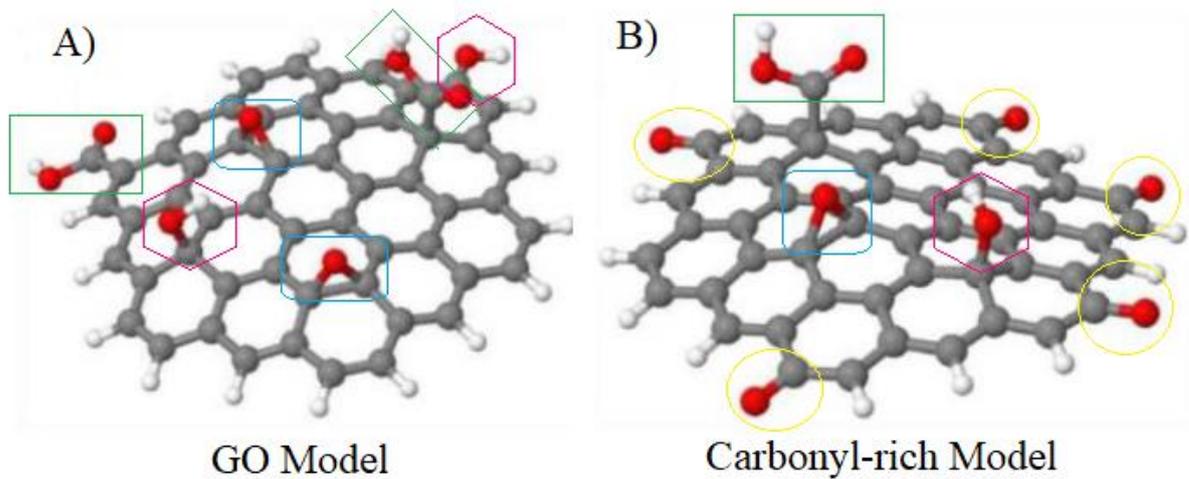
Portanto, os grupos oxigenados são inseridos na estrutura do grafite ainda na primeira fase de oxidação e a segunda é destinada a processos específicos que possibilitem a predominância do grupo oxigenado carbonila (C=O). Esses processos se diferem de outras metodologias de produção de GO, que são capazes de tornarem algum outro grupo oxigenado como predominante na estrutura.

Na imagem 5, é ilustrado a diferença entre a estrutura do óxido de grafeno e do óxido de grafeno rico em carbonila. Os grupos funcionais carbonila, hidroxila, epóxi e carboxila são identificados em ambas as representações por círculo amarelo, hexágono rosa, retângulo azul e retângulo verde, respectivamente. Pode-se observar que o GO possui diversos grupos funcionais, mas nenhum se destaca, enquanto CGO possui a carbonila em maior quantidade, embora também possua outros grupos oxigenados.

Essas variações químicas e estruturais resultantes das modificações no método de Hummers alteram as propriedades físicas do grafeno, levando a elementos com características físicas

distintas. Conseqüentemente, sua aplicação em diferentes contextos pode resultar em efeitos diversos, com alguns óxidos apresentando vantagens sobre outros em determinadas situações. No entanto, até o momento, não há estudos sobre a incorporação do óxido de grafeno rico em grupos de carbonila, produzido pelo grupo Nano-UFJF, no concreto. Dado que essa variação possui propriedades diferentes do óxido de grafeno produzido convencionalmente, é de grande interesse estudar essa adição a fim avaliar seu comportamento de maneira comparativa.

Imagem 5 - Representação gráfica da estrutura do óxido de grafeno (A) e do óxido de grafeno rico em carbonila (B). Esferas cinzas, vermelhas e brancas representam os carbonos, oxigênios e hidrogênios, respectivamente.



Fonte: Imagem retirada e adaptada de De Lima *et al.* (2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

Neste capítulo são caracterizados todos os materiais que foram utilizados na produção do concreto, de acordo com as Normas Brasileiras ou por dados disponibilizados pelos fornecedores. Os ensaios de caracterização de materiais e ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Faculdade de Engenharia e o óxido de grafeno foi produzido pelo grupo Nano, ambos da Universidade Federal de Juiz de Fora. Além disso, no presente capítulo é exposto a dosagem do concreto utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa assim como a sequência experimental para que seja possível replicar o estudo em um futuro trabalho complementar.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 ÁGUA

Segundo Garcia, Spim e Dos Santos (2012), a água tem a função de proporcionar trabalhabilidade à mistura e reagir quimicamente com o cimento, hidratando-o e dando origem às propriedades desejáveis ao concreto. A água utilizada na mistura do traço do concreto e imersão para dos corpos de prova é de origem da rede pública de abastecimento, com administração feita pela Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora - MG (CESAMA).

3.1.2 CIMENTO

O cimento é o aglomerante hidráulico do concreto, ou seja, ao reagir com a água consegue envolver as partículas de agregados e mantê-los unidos. Com a hidratação do cimento, forma-se a pasta de cimento hidratada, que é um composto firme, resistente e que possui grande influência na resistência final do concreto (NEVILLE, 2016).

O cimento utilizado nessa pesquisa, o Cimento Portland CPV ARI Plus da Holcim do Brasil S.A, possui como característica proporcionar elevado ganho de resistência nas primeiras idades, alcançando resistência mínima à compressão de 51 MPA aos 28 dias de idade após cura. Por ser considerado um cimento puro, o CPV ARI é uma das melhores escolhas em pesquisas visto que haverá uma menor influência de fatores externos desconhecidos.

As análises físicas e químicas fornecidas pelo fabricante, caracterizam o material da seguinte forma:

a) Análise física:

- Finura (superfície específica) = 5155 cm²/g - NBR 16372 (ABNT, 2015);
- Finura (resíduo na peneira #400) = 1,2%;
- Tempo de Início de Pega = 158 minutos - NBR NM 65 (ABNT, 2003);
- Expansibilidade a quente = 0 mm - NBR 11582 (ABNT, 2016)
- Resistência à compressão para as seguintes idades - NBR 7215 (ABNT, 2019):
 - 1 Dia = 28,9 MPa;
 - 3 Dias = 38,8 MPa;
 - 7 Dias = 44,6 MPa;
 - 28 Dias = 51,4 MPa.

b) Análise química:

- Resíduo insolúvel = 0,73%;
- Perda ao fogo (1000°C) = 2,45%;
- Perda ao fogo (500°C) = 0,87%;
- Óxido de alumínio, Al₂O₃ = 4,95%;
- Dióxido de silício, SiO₂ = 21,07%;
- Óxido de ferro, Fe₂O₃ = 2,86%;
- Óxido de cálcio, CaO = 63,37%;
- Óxido de magnésio, MgO = 3,43 %;
- Óxido sulfúrico, SO₃ = 1,50%;
- Dióxido de carbono, CO₂ = 0%;
- Óxido de potássio, K₂O = 0,89%.

3.1.3 AGREGADOS

O custo relacionado à pesquisa para a produção do concreto e óxido de grafeno é considerável no quesito matéria prima, visto que há outros trabalhos sendo desenvolvidos nos laboratórios que também necessitam utilizar matéria. Dessa forma, com o objetivo de diminuir os custos sem comprometer a qualidade da pesquisa, de acordo com Azevedo *et al.* (2020), as formas usadas possuem dimensões iguais a 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, sendo necessário um menor volume de concreto.

Devido ao tamanho das formas, foi considerado para o traço do concreto apenas um tipo de agregado miúdo e um tipo de agregado graúdo. Os agregados além de serem materiais de baixo custo e proporcionarem um grande volume na mistura, melhoram a estabilidade dimensional do concreto e interferem em sua durabilidade (NEVILLE; BROOKS, 2013).

3.1.3.1 Agregado Miúdo

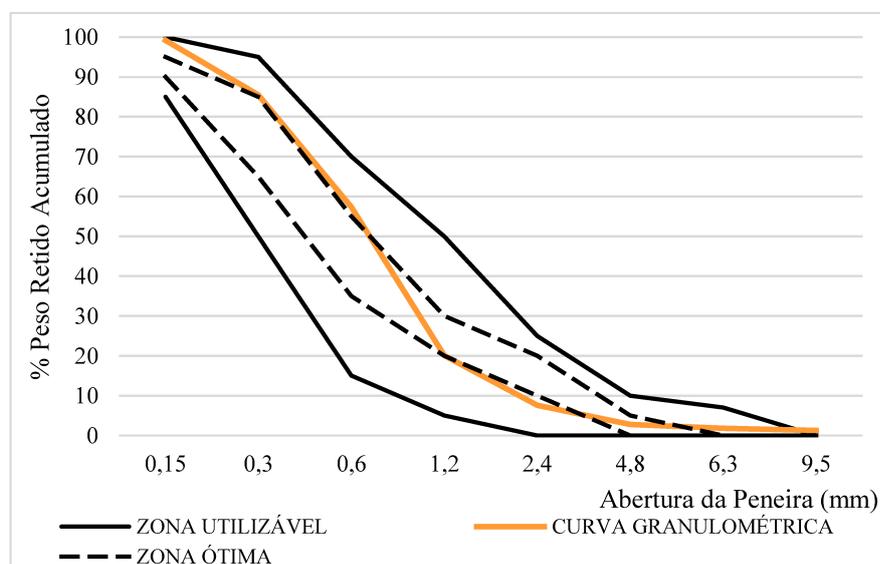
O agregado miúdo do concreto produzido consiste na areia natural com origem no Rio Preto. Os ensaios foram realizados em duas amostras do material e na Tabela 3 são apresentados os resultados médios da análise de composição granulométrica de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022).

Tabela 3 - Composição granulométrica Areia Natural.

Peneiras (mm)	% Retida	% Acumulada
12,5	0	0
9,5	1	1
6,3	1	2
4,8	1	3
2,4	5	8
1,2	12	20
0,6	37	57
0,3	28	85
0,15	14	99
Fundo	1	100

Fonte: Autora (2023).

Gráfico 8 – Curva Granulométrica Areia Natural.



Fonte: Autora (2023).

No Gráfico 8, são apresentados os limites de zona utilizável e ótima para agregados miúdos de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022), além da caracterização do material utilizado na pesquisa que se encontra em conformidade com a mesma. Na Tabela 4, são expostos os resultados médios de duas amostras dos demais ensaios de caracterização física com a respectiva Norma Brasileira de referência.

Tabela 4 - Propriedades físicas Areia Natural.

Propriedades Físicas	Resultados	Normas de Referência
Módulo de Finura	2,69	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Dimensão Máxima Característica	4,8 mm	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Massa Específica	2,656 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2021)
Massa Unitária Seca	1,483 g/cm ³	NBR 16973 (ABNT, 2021)
Argila em torrões	4,575%	NBR 7218 (ABNT, 2010)
Material Pulverulento	1,04%	NBR 16973 (ABNT, 2021)
Matéria orgânica	≤ 300 ppm	NBR NM 49 (ABNT)

Fonte: Autora (2023).

3.1.3.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado no desenvolvimento deste trabalho consiste em brita 0 fabricada pela Pedra Sul Mineração. Os ensaios também foram realizados em duas amostras do material e na Tabela 5 são apresentados os resultados médios da análise de composição granulométrica de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022).

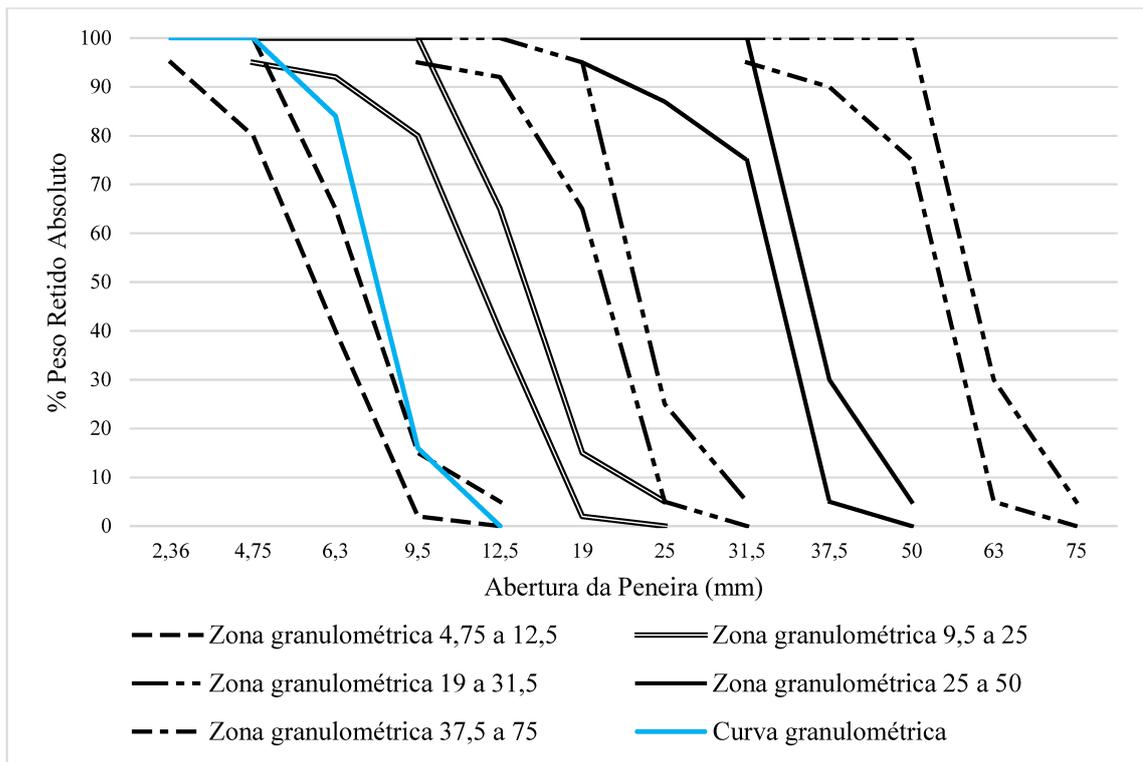
Tabela 5 - Composição Granulométrica Brita 0.

Peneiras (mm)	% Retida	% Acumulada
12,5	0	0
9,5	16	16
6,3	68	84
4,8	15	100
Fundo	0	100

Fonte: Autora (2023).

No Gráfico 9, são apresentados os limites das zonas de distribuições granulométricas definidas segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022), além da caracterização do material utilizado na pesquisa. Ao analisar o gráfico, pode-se dizer que o agregado em questão se encontra próximo a zona de granulometria entre 4,72 mm e 12,5 mm, correspondente a brita 0. Na Tabela 6, são expostos os resultados médios de duas amostras dos demais ensaios de caracterização física com a respectiva Norma Brasileira de referência.

Gráfico 9 – Curva Granulométrica da Brita 0.



Fonte: Autora (2023).

Tabela 6 - Propriedades físicas Brita 0.

Propriedade Física	Resultado	Norma de Referência
Módulo de Finura	6,14	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Dimensão Máxima Característica	12,5 mm	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Densidade – condição saturada superfície seca	2,769 g/cm ³	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Densidade – condição seca	2,755 g/cm ²	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Massa Unitária Seca	1,463 g/cm ³	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Material Pulverulento	0,40%	NBR 16973 (ABNT, 2021)
Absorção	0,51 %	NBR 16917 (ABNT, 2021)

Fonte: Autora (2023).

3.1.4 ADITIVO

Kai Gong *et al.* (2014) relatam que o GO pode afetar a trabalhabilidade dos compostos cimentícios, pois devido à grande área superficial do nano-material, é necessária uma maior quantidade de água. Essa perda de fluidez em matrizes cimentícias pode ser compensada com a utilização de aditivos a base de policarboxilato (Lv *et al.*, 2016) com dosagem de quatro vezes a quantidade utilizada de GO, aproximadamente, a fim de garantir uma melhor dispersão do nano-material na mistura (Valluruparelli *et al.*, 2020). Segundo Bauer (2019), o aditivo

superplastificante tem a função de proporcionar maior consistência e trabalhabilidade ao reduzir a quantidade de água da mistura.

Como o foco desta pesquisa está no efeito que o óxido de grafeno em diferentes concentrações provoca no concreto em relação ao seu comportamento mecânico, a única variável na composição das amostras precisa ser o nano-material. Portanto, optou-se por utilizar o aditivo superplastificante, em todas as amostras a fim de garantir uma boa dispersão da adição e tê-la como única variável, sem afetar a relação água/cimento que também é uma variável importante no ponto de vista mecânico.

Desde modo, foi escolhido o aditivo ViscoCrete-3535 CB que possui compatibilidade com o cimento CPV ARI da Holcim. Esse produto consiste em uma solução de policarboxilato em meio aquoso com efeito plastificante. De acordo com a fabricante Sika S.A (2022), o produto deve ser consumido com dosagem entre 0,3 e 1,5% em relação a massa dos aglomerantes e possui densidade igual a $1,08 \pm 0,02$ kg/L. Portanto, utilizou-se 0,35% deste aditivo em relação à massa de cimento em todas as amostras

3.1.5 ÓXIDO DE GRAFENO

Para o desenvolvimento desta pesquisa, a produção do CGO foi totalmente realizada pelo Nano da UFJF e, posteriormente, disponibilizado para que fosse incorporado ao concreto. Devido a propriedade hidrofílica dos óxidos de grafeno, que permite sua dissolução em água, é possível adicioná-los ao concreto. Dessa forma, o grupo Nano forneceu o material por meio de de uma solução de CGO e água com concentração de 5mg/ml. Essa quantidade de água foi contabilizada para a quantidade total, respeitando a relação água/cimento do traço de concreto.

Para o desenvolvimento do estudo, foram testadas três concentrações de CGO em relação a massa de cimento: 0,02%, 0,03% e 0,05%. Para isso, a solução contendo CGO foi disponibilizada em recipientes esterilizados, sem qualquer risco de contaminação e com o volume exato para cada dopagem conforme é mostrado na Imagem 6. Durante todo o processo de produção, cuidou-se para garantir que não houvesse nenhuma contaminação com o recipiente fornecido para que possa ser devolvido e reutilizado pelo grupo Nano sem nenhum prejuízo.

Imagem 6 - Medidas de óxido de grafeno rico em grupos de carbonila disperso em água para serem usados em diferentes dopagens.



Fonte: Autora (2023).

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. Além disso, De Lima *et al.* (2020) aprofunda os estudos sobre as propriedades físico-químicas do CGO, assim como de outros óxidos de grafeno rico em outros grupos oxigenados resultantes de diferentes condições oxidativas.

3.2 DOSAGEM DO CONCRETO

O traço do concreto define qual a quantidade de cada material que compõe o concreto para cada unidade de cimento, podendo ser expresso em massa ou volume. O traço do concreto da atual pesquisa é o mesmo para todas as amostras, variando apenas a quantidade de CGO da mistura. 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. Dessa forma, o traço utilizado é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Traço utilizados na confecção do concreto

Cimento	Areia Natural	Brita 0	Fator Água/Cimento	Aditivo Superplastificante (%)	Cimento (kg/m ³)
1	2,577	3,047	0,52	0,35	340

Fonte: Autora (2023)

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Na literatura, muitos artigos tem como objetivo encontrar a dosagem ótima do óxido de grafeno para ser incorporado ao concreto em relação a massa de cimento da mistura, como Devi e Khan (2020) fizeram. Como este trabalho tem como objetivo comparar o óxido de grafeno rico em grupos de carbonila com resultados anteriores já realizados, também se torna um objetivo encontrar sua dosagem ótima para adicioná-lo ao concreto e comparar sua eficiência com o GO exposto na literatura.

Sendo assim, foram testadas 3 concentrações de óxido de grafeno sobre a massa de cimento, sendo elas de 0,02%, 0,03% e 0,05%. 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 como amostras que referência que será identificada como Ref-CGO. Nas amostras de referência não há incorporação de CGO.

3.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Para a virada do concreto, utilizou-se uma argamassadeira, uma vez que a quantidade produzida foi de pequeno volume. Inicialmente, todos os materiais foram pesados e reservados, como pode ser observado na Imagem 7. É importante ressaltar, que a quantidade de água utilizada na solução de CGO em meio aquoso foi descontada do volume total. Parte da água pesada foi usada para diluir o aditivo superplastificante em quantidade aquedada conforme o traço do concreto.

Imagem 7 - Organização dos materiais para virada do concreto.



Fonte: Autora (2023).

Primeiramente, misturou-se a seco os agregados, gráúdo e miúdos, e o cimento até que se tornasse em uma mistura uniforme. Em sequência, essa mistura foi levada à argamassadeira, adicionou-se a água reservada e ligou-se o equipamento para iniciar a produção do composto. De tempos em tempos, desligou-se o equipamento para desgrudar qualquer material das bordas do recipiente com auxílio de uma colher.

Posteriormente, inseriu-se o aditivo diluído em água no recipiente da argamassadeira e por último, adicionou-se o CGO, como ilustrado na Imagem 8 após seu frasco ser agitado manualmente com movimentos circulares a fim de eliminar a possibilidade de decantação da solução e perda do material. A água utilizada para diluir o aditivo foi contabilizada no traço do concreto para que não afetasse a relação água/cimento. Na Imagem 9 é mostrado, como exemplo, o concreto pronto após toda a etapa de fabricação.

Após todas as formas receberem uma camada de desmoldante para facilitar a etapa de desforma, o concreto foi moldado como o prescrito na NBR 7215 (ABNT, 2019) e devidamente identificado. Em seguida, todos os corpos de prova foram levados para câmara úmida até que pudessem ser desenformados, capeados e submersos em tanque d'água, garantindo a cura até aos 28 dias de idade.

Imagem 8 - Inserção do CGO na mistura de concreto.



Fonte: Autora (2023).

Imagem 9 - Concreto pronto.



Fonte: Autora (2023).

3.5 MÉTODOS DE ENSAIO

3.5.1 ENSAIO DE ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E MASSA ESPECÍFICA REAL

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica são qualitativos, sendo importante para analisar e caracterizar o comportamento do concreto, sobretudo em relação à sua durabilidade. O índice de vazios demonstra qual a porcentagem do volume poros em relação ao volume do elemento. A absorção de água traduz a facilidade com que a água penetra no material e ocupa seus poros permeáveis. Já a massa específica real exprime a relação entre massa e volume do material desconsiderando os poros permeáveis. Dessa forma, quanto maior a absorção, o índice de vazios e a massa específica, mais fácil será a penetração de água no material, maior será sua porosidade e densidade, respectivamente.

Assim, esses ensaios aprimoram as análises do efeito do CGO adicionado ao concreto ao compará-lo com a amostra de referência. Além disso, a massa específica é um parâmetro importante para calcular o módulo de elasticidade dinâmico a partir de dados da velocidade de pulso ultrassônico.

Ambas as características são obtidas por equações matemáticas cujos dados de entradas são os pesos dos corpos de prova em determinadas condições, como descrito na NBR 9778 (ABNT, 2005). Por ser um ensaio simples e não destrutivo, calculou-se esses parâmetros para todos os corpos de prova de referência e com adição de CGO em todas as concentrações. As pesagens foram realizadas após os 28 dias de idade.

Para a determinação do índice de vazios, teor de absorção de água e massa específica real, utiliza-se as equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$I_V = \frac{m_{SSS} - m_s}{m_{SSS} - m_{sub}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$A = \frac{m_{SSS} - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_{sub}} \quad (3)$$

onde,

I_V é o índice de vazios, expresso em porcentagem;

A é a absorção de água por imersão, expressa em porcentagem;

ρ_r é a massa específica real, expressa em g/cm^3 ;

m_{SSS} é a massa da amostra saturada superfície seca, expressa em gramas (g);

m_s é a massa da amostra seca em estufa, expressa em gramas (g);

m_{sub} é a massa da amostra saturada imersa em água, expressa em gramas (g).

3.5.2 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

Uma vez que a propagação das ondas é influenciada pelo meio em que se encontra, ao examinar a forma como elas refletem e refratam no concreto, é possível realizar uma análise interna do material e estudar sua heterogeneidade. Segundo Bauer (2019), a velocidade de pulso ultrassônico em concretos é a medida de propagação de ondas mais utilizada no Brasil, já que é possível correlacioná-la com a resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade dinâmico, além de detectar falhas de concretagem no seu interior e estimar profundidade de fissuras.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), fatores como idade, porosidade e massa específica do concreto, além das características dos agregados e cimento, umidade, temperatura, adensamento, cura, presença de armadura na peça e direção da execução do ensaio interferem na velocidade de propagação das ondas. Como o CGO e sua concentração afetam a estrutura do concreto e são as variáveis desta pesquisa, esse ensaio se torna relevante por possibilitar a investigação dos efeitos dessa incorporação, além de ser de fácil execução.

O ensaio consiste em medir o tempo em que uma onda longitudinal atravessa o concreto, sendo possível obter a velocidade através das dimensões do corpo de prova. Para isso, os transdutores são posicionados nas faces planas opostas do cilindro com auxílio de gel acoplantes para medir a transmissão direta como é descrito na NBR 8802 (ABNT, 2019) e mostrado na Imagem 10. Por ser um ensaio não destrutivo, optou-se por realizá-lo em todos os corpos de prova, de referência e com adição de CGO em todas as concentrações, para uma maior quantidade de dados. O ensaio foi realizado aos 28 dias de idade em temperatura ambiente.

Imagem 10 - Execução ensaio de pulso ultrassônico.



Fonte: Autora (2023).

3.5.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O concreto possui uma excelente resistência à compressão e através dos traços, é possível predefinir seus valores. A evolução do concreto muito se dá em torno dessa propriedade, uma vez que a resistência característica do concreto é uma variável de extrema importância para cálculos de estruturas em concreto armado.

Uma investigação quantitativa à cerva dos efeitos da incorporação do CGO ao concreto quando comparados ao de referência é um dos objetivos dessa pesquisa. Segundo Mehta e Monteiro (2014), “os ensaios de compressão uniaxial são mais fáceis de realizar em laboratórios, e o ensaio da resistência à compressão para o concreto aos 28 dias é aceito universalmente como um índice geral da resistência do concreto”. Dessa forma, o ensaio de resistência à compressão axial foi escolhido para auxiliar na investigação desse parâmetro nessa pesquisa.

O ensaio consiste, portanto, em aplicar uma carga axial no corpo de prova centralizado na prensa hidráulica, como mostrado na Imagem 11, até que ocorra a ruptura. Com o valor da carga máxima causadora da ruptura, emitida pelo equipamento de prensa hidráulica, e os dados geométricos da seção do cilindro, é possível encontrar a resistência característica expressa pela Equação 4.

Imagem 11 - Ensaio de Resistência à Compressão Axial.



Fonte: Autora (2023).

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} \quad (4)$$

onde,

f_c é a resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa);

F é a força máxima aplicada, expressa em newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova cilíndrico, expresso em milímetros (mm).

As prescrições normativas da NBR 5739 (ABNT, 2018) foram seguidas a fim de garantir a técnica e qualidade do procedimento e resultados. Por ser destrutivo, como é mostrado na Imagem 12, o ensaio foi realizado em 3 corpos de prova de concreto de referência e 3 corpos de prova de cada concentração de CGO, após os 28 dias de idade em temperatura ambiente, obtendo-se uma média aritmética dos resultados.

Imagem 12 – Pós ruptura dos corpos de prova por compressão axial.



Fonte: Autora (2023).

3.5.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As fissuras nos elementos de concreto ocorrem devido a sua baixa resistência à tração, pois mesmo utilizando-se o aço para compensar essa deficiência, não é suficiente. Dessa forma, torna-se interessante dar atenção a incorporação do CGO ao concreto, uma vez que essa adição pode interferir nessa propriedade e melhorar o desempenho do material.

Segundo Dos Santos, Bandeira e Kostascki (2017), o ensaio de tração por compressão diametral, também conhecido como ensaio brasileiro, é a forma mais usual para determinar a resistência à tração do concreto, já que os equipamentos para sua realização são os mesmos do ensaio de compressão axial e é simples de ser executado. Portanto, esse foi o ensaio escolhido para essa pesquisa devido as vantagens mencionadas pelos autores.

Para sua realização, o corpo de prova deve ser posicionado na prensa hidráulica de forma que as cargas sejam aplicadas nas geratrizes opostas do corpo de prova cilíndrico até que ocorra a ruptura de acordo com as diretrizes contidas na NBR 7222 (ABNT, 2011), como é mostrado na Imagem 13. Assim como para o ensaio anterior, 3 corpos de prova de cada amostra foram submetidos ao ensaio de tração após os 28 dias de idade em temperatura ambiente.

Imagem 13 - Ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: Autora (2023).

Este ensaio é uma maneira de obter-se a tração indireta do concreto através da Equação 5. As dimensões do corpo de prova devem ser medidas e a força é emitida pelo equipamento de prensa hidráulica. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), é possível determinar a tração direta do concreto pela Equação 6.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot l} \quad (5)$$

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} \quad (6)$$

onde,

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração indireta, medida pelo ensaio de compressão diametral, expressa em megapascals (MPa);

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração direta, expressa em megapascals (MPa);

F é a força máxima aplicada, expressa em newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova cilíndrico, expresso em milímetros (mm)

l é a altura do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

3.5.5 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

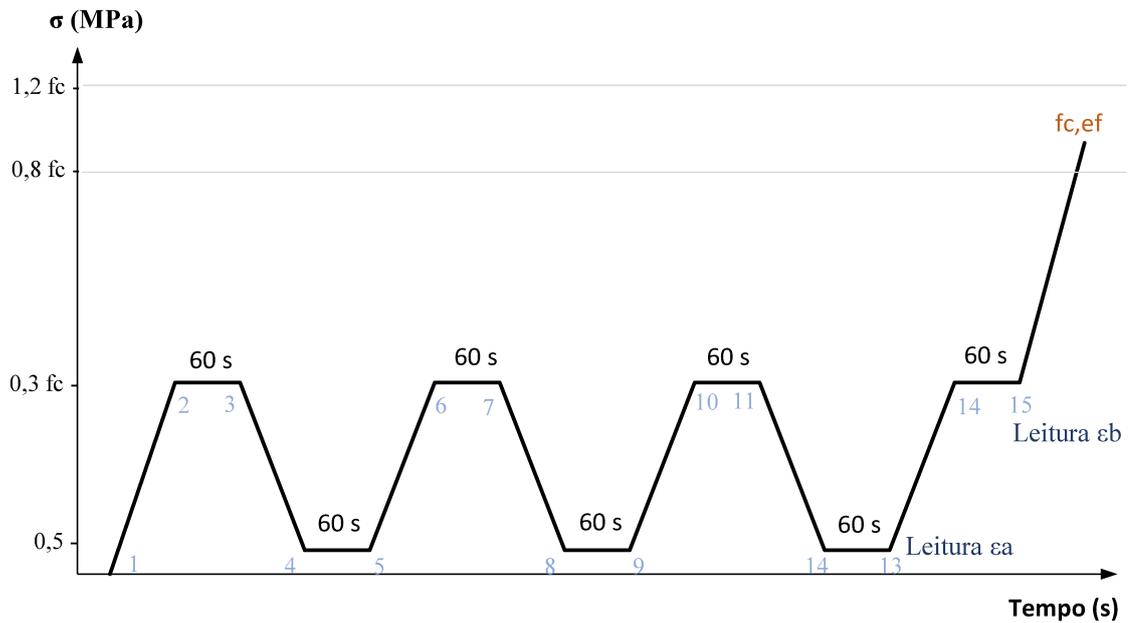
O módulo de elasticidade quantifica o comportamento elástico de um material sólido relacionando tensão e deformação. Esse é um parâmetro importante tanto para analisar o comportamento do material quanto para cálculos estruturais que o possuem como variável. O módulo de elasticidade estático do concreto se dá pelo coeficiente angular da reta tangente à curva tensão x deformação durante a simplificação de regime elástico, de acordo com a NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o módulo de elasticidade está relacionado à microestrutura do concreto, tendo interferência, portanto, dos agregados, pasta de cimento e zona de transição da mistura. Como o CGO incorporado ao concreto modifica sua microestrutura, o módulo de elasticidade se altera e se faz necessário analisá-lo para compor um estudo mais completo à cerca dos efeitos dessa adição.

O módulo de elasticidade estático nessa pesquisa foi determinado através da metodologia A descrita na NBR 8522-1 (ABNT, 2021), onde métodos de validade do ensaio são sugeridos a fim de garantir a qualidade. Esse é um ensaio destrutivo e, portanto, apenas 3 corpos de prova de cada grupo de amostras foram submetidos a ele após os 28 dias de idade em temperatura ambiente. O ensaio consiste em três ciclos de aplicação de carga equivalente à 30% da ruptura média à compressão axial por um intervalo de tempo de 60 segundos e descarga até 0,5 MPa por mais 60 segundos, conforme é ilustrado no Gráfico 10.

Para a realização do ensaio, utilizou-se a prensa hidráulica, conforme Imagem 14 e o software *TestMod*, desenvolvido pela DINATEST, para captar as deformações com auxílio de extensômetros do tipo *strain gages* ligados ao corpo de prova. A partir dos dados, obtém-se o módulo de elasticidade dado pela Equação 7.

Gráfico 10 - Ciclo de aplicação de tensão para determinação do módulo de elasticidade estático.



Fonte: NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

$$E_{ci} = \frac{0,3 \cdot f_c - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

onde,

E_{ci} é o módulo de elasticidade estático, expresso em gigapascoals (GPa);

f_c é a média da resistência à compressão axial, expressa em megapascoals (MPa);

ε_b é a deformação específica média do corpo de prova sob maior tensão ($\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$);

ε_a é a deformação específica média do corpo de prova sob tensão básica ($\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$).

Imagem 14 - Execução ensaio de módulo de elasticidade estático.



Fonte: Autora (2023).

O módulo de elasticidade dinâmico, é obtido através dos dados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico e massa específica através da Equação 8, de acordo com Bauer (2019).

$$E_d = \frac{V^2 \cdot \rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \cdot 10^6 \quad (8)$$

onde,

E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, expresso em GPa;

V é a velocidade de pulso ultrassônico, expressa em m/s.

ρ é a massa específica do concreto, expressa em g/cm³;

μ é o coeficiente de Poisson, sugerido como $\mu = 0,2$ por Mehta e Monteiro (2014).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA REAL

Na Tabela 8, são exibidos os valores de índice de vazios (I_V), absorção (A), e massa específica (ρ_r), de todos os corpos de prova de referência, assim como a média, desvio padrão e o coeficiente de variação. Já na Tabela 9 são mostrados os mesmos dados finais para as amostras 0.02-CGO, 0.03-CGO e 0.05-CGO.

Tabela 8 - Resultados índice de vazios, absorção de água e massa específica - Ref-CGO.

Amostra	I_V (%)	A (%)	ρ_r (g/cm ³)
CP 1	1,76	0,74	2,44
CP 2	1,04	0,43	2,45
CP 3	0,93	0,38	2,44
CP 4	1,13	0,47	2,46
CP 5	0,99	0,40	2,49
CP 6	1,03	0,42	2,47
CP 7	1,51	0,60	2,55
CP 8	0,90	0,36	2,51
CP 9	0,60	0,25	2,44
Média	1,10	0,45	2,47
Desvio padrão	0,32	0,13	0,03
Coeficiente de Variação	29,48%	29,83%	1,40%

Fonte: Autora (2023).

Tabela 9 - Resultados índice de vazios, absorção de água e massa específica - 0.02-CGO, 0.03-CGO e 0.05-CGO.

Amostra	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)
CP 1	1,22	0,50	2,48	2,32	0,96	2,47	2,32	0,97	2,44
CP 2	0,82	0,34	2,43	2,16	0,91	2,44	2,34	0,99	2,43
CP 3	0,76	0,32	2,41	2,38	0,99	2,47	2,20	0,92	2,44
CP 4	0,75	0,31	2,42	2,35	0,98	2,45	2,29	0,96	2,43
CP 5	0,73	0,30	2,48	1,99	0,83	2,46	2,15	0,90	2,43
CP 6	0,73	0,30	2,47	2,05	0,85	2,46	2,10	0,88	2,43
CP 7	0,42	0,17	2,44	1,73	0,72	2,44	1,70	0,72	2,42
CP 8	0,41	0,17	2,43	2,06	0,85	2,47	1,83	0,77	2,43
CP 9	0,48	0,20	2,42	1,89	0,78	2,47	1,91	0,80	2,43
Média	0,70	0,29	2,44	2,11	0,87	2,46	2,09	0,88	2,43
Desvio padrão	0,24	0,10	0,02	0,21	0,09	0,01	0,22	0,09	0,01
Coeficiente de Variação	33,62%	33,30%	0,96%	9,89%	9,97%	0,49%	10,33%	10,38%	0,23%

Fonte: Autora (2023).

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 desencontro 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%.

As amostras 0.03-CGO e 0.05-CGO apresentaram resultados contrários, sendo um aumento de 91,6% e 90,4% para índice de vazios e 94,5% e 95,5% para absorção de água, respectivamente. Uma possível justificativa para a discrepância dos resultados seria a geração de microporos na matriz de concreto de forma exagerada que permitiria a percolação de água, causada pela a adição de CGO.

4.2 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

Os resultados medidos no ensaio de velocidade de pulso ultrassônico, de todas as amostras, são mostrados na tabela 10, assim como sua média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Sabe-se que quanto maior é a velocidade de propagação de pulso ultrassônico, melhores são as condições do concreto. Dessa forma, entende-se que as amostras 0.02-CGO e 0.03-CGO apresentam melhorias em relação ao concreto de referência com aumento de 12,0% e 17,1%, respectivamente, na velocidade. 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 foram suficientes para os classificarem como excelentes, como consta na Tabela 11.

Tabela 10 - 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
Desvio padrão	658,8	516,0	33,3	240,7
Coefficiente de variação	16,38%	11,46%	0,71%	7,64%

Fonte: Autora (2023).

Tabela 11 – Classificação da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

Velocidade de propagação (m/s)	Condições do concreto
Superior a 4500	Excelente
3500 a 4500	Boa
3000 a 3500	Regular (duvidosa)
2000 a 3000	Geralmente ruim
Inferior a 2000	Ruim

Fonte: Whitehurst (1966 *apud* Bauer, 2019, p. 391).

O resultado com 0,05% de CGO se mostrou inferior e pode ser fruto de uma má dispersão de CGO por estar em maior quantidade. Todavia, mesmo com a possível ocorrência desse problema, verificou-se que uma menor concentração de CGO foi suficiente para superar resultados relatados na literatura ao utilizar uma maior quantidade de GO. Por exemplo, Devi e Khan (2020), não obtiveram valores suficientes em nenhuma das amostras analisadas para classificá-las como de excelente qualidade, ao contrário do ocorrido na atual pesquisa. Além disso, Reddy e Prasad (2022) concluíram que 0,025% de GO causou um aumento de apenas 4% da velocidade de propagação, e foi necessário 0,1% de concentração de GO para ter uma classificação excelente, ao alcançar 4700 m/s como velocidade de propagação.

4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial estão expostos na Tabela 12, assim como sua média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 12 - 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
Desvio padrão	1,9	1,3	1,2	1,2
Coeficiente de Variação	4,88%	2,57%	2,72%	3,19%

Fonte: Autora (2023).

Os resultados obtidos mostram que as amostras 0.02-CGO, 0.03-CGO e 0.05-CGO possuem um aumento de resistência à compressão em relação à amostra de referência de 33,2%, 14,5% e 1,6%, respectivamente. Novamente, a concentração da adição é importante no resultado, embora todas tenham acarretado incremento na resistência à compressão, indo em desacordo com Arcanjo e Rossi (2018) que obtiveram apenas diminuição de resistência, como se esperava.

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, quando na verdade o comportamento foi o oposto. No entanto, o resultado de 0,02% de CGO se mostrou próximo ao obtido por Reddy e Prasad (2022) com 0,1% de GO e superior aos resultados de Devi e Khan (2020) e Jyothimol *et al.* (2020) com 0,08% e 0,05% de GO, respectivamente.

O aumento da resistência para a concentração de 0,05% de CGO é comparativamente menor, mas em ordem de grandeza semelhante ao encontrado por Devasena e Karthikeyan (2015). Embora esse estudo tenha obtido valores mais elevados com concentrações superiores, não ultrapassam os valores alcançados com 0,02% e 0,03% de CGO da atual pesquisa. Assim, a ideia de má dispersão acometida para a amostra de 0.05-CGO é reforçada, salienta-se que não se pode atribuir todos resultados a esse possível problema, uma vez que o aumento da resistência com 0,03% de CGO também foi inferior ao proporcionado pela concentração de 0,02%, mas não é observado esse comportamento para o ensaio de pulso ultrassônico já analisado, por exemplo.

Com base nisso, o CGO demonstra um comportamento distinto em relação à resistência à compressão em comparação ao GO. No entanto, os resultados obtidos com 0,02% de concentração de CGO são semelhantes aos melhores encontrados na literatura, porém utilizando uma concentração inferior de nano-material, exceto na pesquisa de Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022) que conseguiram alcançar um aumento maior com menor quantidade de material, como pode ser observado através da Tabela 1.

4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial estão expostos na Tabela 13, assim como sua média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 13 - 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
Desvio padrão	0,6	0,5	0,4	0,3
Coeficiente de Variação	7,54%	4,95%	4,55%	3,30%

Fonte: Autora (2023).

Observa-se que a tendência de comportamento do material segue a mesma observada para resistência à compressão e isso se explica pela relação entre as duas resistências. 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.

Este ensaio reforça a ideia que a concentração da substância adicionada ao concreto interfere substancialmente no resultado final. Todas as concentrações foram suficientemente eficientes para que ocorresse aumento na resistência à tração, diferentemente de Devasena e Karthikeyan (2015), como esperado. Embora todas as concentrações tenham sido eficientes para melhorar a resistência à tração, não houve comportamento similar ao observado por Devi e Khan (2020) e Reddy e Prasad (2022), onde o crescimento da resistência se deu à medida que aumentasse a 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 Jythimol *et al.* (2020), que incorporaram exatamente o quádruplo, quádruplo e mais que o dobro de GO, respectivamente, como pode ser observado na Tabela 2. 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.

4.5 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

Nas Tabelas 14, 15, 16 e 17 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. Todos os ensaios foram validados conforme a NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

Tabela 14 - Resultado módulo de elasticidade estático e dinâmico - Ref-CGO.

Ref-CGO							
Amostra	f_c (MPa)	$0,3 \cdot f_c$ (MPa)	$0,8 \cdot f_c$ (MPa)	$1,2 \cdot f_c$ (MPa)	f_c, ef (MPa)	E_{ci} (GPa)	E_d (GPa)
CP 7					38,18	33,51	35,23
CP 8	38,5	11,6	30,8	46,2	37,98	32,91	28,82
CP 9					40,15	36,86	48,90
Média						34,4	37,7
Desvio padrão						2,1	10,3
Coeficiente de variação						6,18%	27,25%

Fonte: Autora (2023).

Tabela 15 - Resultado módulo de elasticidade estático e dinâmico - 0.02-CGO.

0.02-CGO							
Amostra	f_c (MPa)	$0,3 \cdot f_c$ (MPa)	$0,8 \cdot f_c$ (MPa)	$1,2 \cdot f_c$ (MPa)	f_c, ef (MPa)	E_{ci} (GPa)	E_d (GPa)
CP 7					52,24	45,85	51,31
CP 8	51,3	15,4	41,1	61,6	51,12	41,98	50,10
CP 9					52,01	44,48	48,51
Média						44,1	50,0
Desvio padrão						2,0	1,4
Coeficiente de variação						2,46%	2,80%

Fonte: Autora (2023).

Tabela 16 - Resultado módulo de elasticidade estático e dinâmico - 0.03-CGO.

0.03-CGO							
Amostra	f_c (MPa)	$0,3 \cdot f_c$ (MPa)	$0,8 \cdot f_c$ (MPa)	$1,2 \cdot f_c$ (MPa)	f_c, ef (MPa)	E_{ci} (GPa)	E_d (GPa)
CP 7					42,97	36,88	48,05
CP 8	44,1	13,2	35,2	52,9	43,13	39,15	49,00
CP 9					44,42	41,71	50,92
Média						39,2	49,3
Desvio padrão						2,4	1,5
Coefficiente de variação						6,17%	2,97%

Fonte: Autora (2023).

Tabela 17 – Resultado módulo de elasticidade estático e dinâmico - 0.05-CGO.

0.05-CGO							
Amostra	f_c (MPa)	$0,3 \cdot f_c$ (MPa)	$0,8 \cdot f_c$ (MPa)	$1,2 \cdot f_c$ (MPa)	f_c, ef (MPa)	E_{ci} (GPa)	E_d (GPa)
CP 7					40,24	35,13	20,35
CP 8	39,1	11,7	31,3	47,00	40,01	34,06	22,04
CP 9					41,22	36,26	21,36
Média						35,1	21,2
Desvio padrão						1,1	0,8
Coefficiente de variação						3,13%	4,00%

Fonte: Autora (2023).

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.

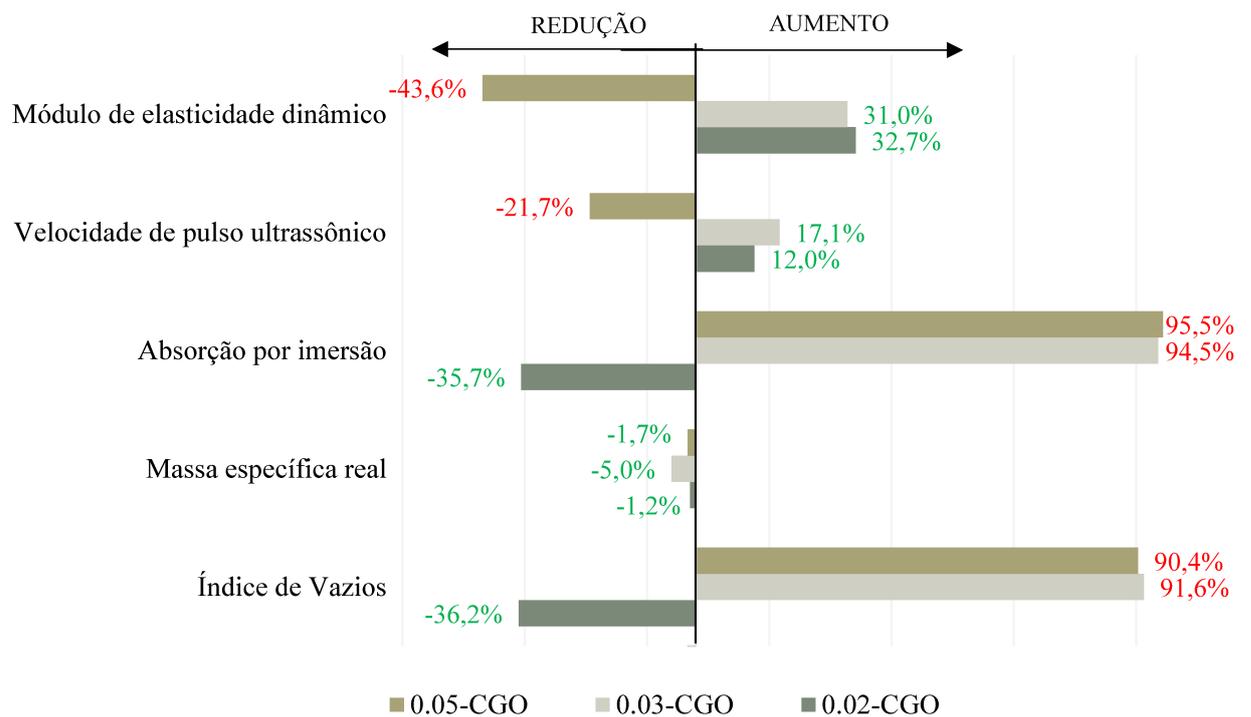
O módulo de elasticidade dinâmico não acompanhou o mesmo crescimento que o estático, mas é um resultado esperado, uma vez que é consequência de cálculos que estimam seu valor através do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico. Mesmo assim, observou-se um aumento de 32,6%, 30,8% e diminuição em 43,8% para as concentrações de 0,02%, 0,03% e 0,05% de CGO em relação ao peso de cimento na mistura.

4.6 RESUMO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios não destrutivos e destrutivos, realizados de acordo com as prescrições normativas para a caracterização do concreto, estão resumidos no Gráfico 11 e 12,

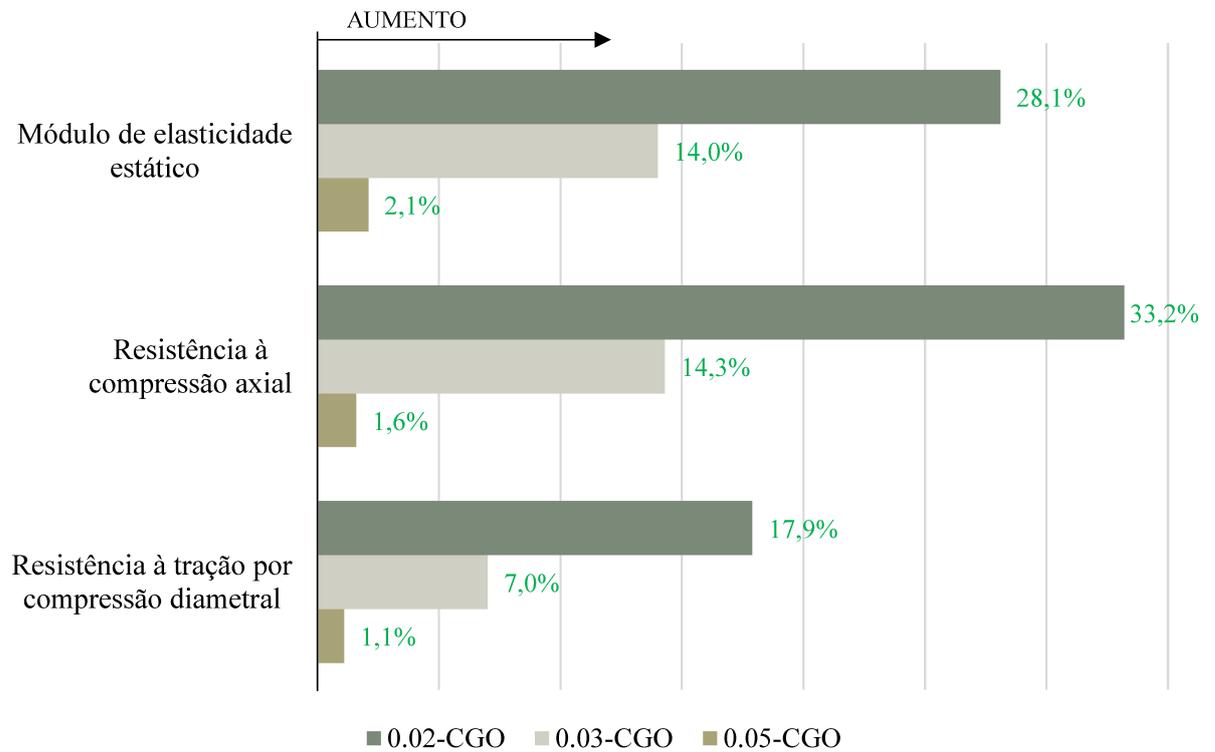
respectivamente. Nessa representação, os números positivos indicam um aumento percentual e os negativos, uma redução percentual em relação as mesmas propriedades obtidas para a amostra de referência. Para facilitar a interpretação, os dados que indicam melhorias no desempenho do concreto devido na incorporação de CGO estão destacados em verde, enquanto os dados que indicam impacto negativo estão em vermelho.

Gráfico 11 - Diferenças percentuais das propriedades obtidas por ensaios não destrutivos em relação as amostras de referência para as concentrações de 0,02%, 0,03% e 0,05% de CGO.



Fonte: Autora (2023).

Gráfico 12 - Diferenças percentuais das propriedades obtidas por ensaios destrutivos em relação as amostras de referência para as concentrações de 0,02%, 0,03% e 0,05% de CGO.



Fonte: Autora (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho, que consistia em investigar os efeitos que o óxido de grafeno rico em carbonila (CGO) causam ao concreto, definir sua dosagem ótima e comparar seu desempenho com o óxido de grafeno (GO) relatado na literatura como uma incorporação ao concreto, foram alcançados. Assim, a partir dos resultados obtidos, pode-se concluir:

- A concentração do CGO incorporado ao concreto é um fator muito relevante para a melhoria de seu desempenho;
- A concentração de 0,02% de CGO incorporada ao concreto é a única que gerou resultados de melhoria em todos os parâmetros analisados com valores significativos. Portanto, considera-se essa concentração como a dosagem ótima ao proporcionar os melhores resultados;
- Os parâmetros de índice de vazios e absorção de água por imersão são os únicos que representam impacto negativo para a concentração de 0,03% de CGO. O CGO nessa concentração, assim como em 0,05%, pode ter promovido microporos em quantidade significativa facilitando a percolação de água. Para um estudo mais completo, é necessário estudar de forma mais aprofundada e técnica a microestrutura da mistura com objetivo de entender os efeitos proporcionados nesse sentido;
- A amostra contendo 0,05% de CGO em sua mistura não apresentou ganho de melhoria para o desempenho do material ao analisar o conjunto de dados. Este resultado pode ter sido acarretado pela maior dificuldade de dispersão do nano-material em maior quantidade, além da hipótese descrita anteriormente;
- É possível obter resultados semelhantes ou até superiores na incorporação de CGO ao concreto usando uma quantidade menor desse material em comparação à incorporação de GO relatada na literatura, exceção do estudo de Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022);
- A incorporação de CGO em dosagem ótima eleva a qualidade do concreto para excelente, ao analisar sua velocidade de pulso ultrassônico acima de 4500 m/s, assim como o torna mais durável e com menor suscetibilidade à corrosão, ao diminuir os vazios, a porosidade e absorção de água. Além desses benefícios, essa adição resulta em aumento de 33,2% na resistência à compressão axial e de 17,9% na resistência à tração por compressão diametral. Observa-se também um aumento no módulo de elasticidade

estático em 28,1%, o que indica uma redução em sua deformabilidade. Vale ressaltar que todos esses benefícios são acompanhados por uma redução de 1,2% na massa específica do concreto, tornando-o mais leve.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se:

- Verificar os efeitos da incorporação do CGO ao concreto sobre a condutividade térmica;
- Estudar a microestrutura do concreto com incorporação de CGO;
- Avaliar das propriedades mecânicas em concreto de alto desempenho com incorporação de CGO;
- Estudar o impacto do CGO no combate do efeito *spawling* sobre gradientes de altas temperaturas em concretos convencionais e de alto desempenho;
- Analisar a trabalhabilidade do concreto com incorporação de CGO com e sem a utilização de aditivo superplastificante.

6 REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7218: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. 2019.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16973: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Métodos de ensaio. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. 2002.

AL-RUB, R. K. A. *et al.* *Mechanical Properties of Nanocomposite Cement Incorporating Surface-Treated and Untreated Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers.* **Journal of Nanomechanics and Micromechanics**, v. 2, n. 1, p. 1-6, 2012. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29NM.2153-5477.0000041>. Acesso em: 1 abr. 2023.

ARCANJO, Y.; ROSSI, M. Estudo da Porosidade, Permeabilidade e Absorção do Concreto com Adição de Óxido de Grafeno. **Jornada de Iniciação Científica e Mostra de Iniciação Tecnológica** - ISSN 2526-4699, Brasil, dez. 2018. Disponível em: <http://eventoscopq.mackenzie.br/index.php/jornada/xivjornada/paper/view/840/617>. Acesso 30 Mar. 2023.

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>

BAUER, L. **Materiais de Construção**. 6. ed. atual. Rio de Janeiro: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora, 20akII19. v. 1. ISBN 978-85-216-3662-5.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. “**Cimento, Produção e Valores de Materiais de Construção**”. 13 fev. 2023. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>. Acesso Mar. 2023.

CHUAH, S. *et al.* *Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide.* **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 113-124, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040>

DE AZEVEDO, C. F. *et al.* *Compressive strength of reduced concrete specimens considering dimensional distortion of coarse aggregates.* **Construction and Building Materials**, v. 257, n. 119448, 10 out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119448>.

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>.

DE JESUS, K.; FREIRE, E.; GUIMARÃES, M. J. OC. Grafeno: aplicações e tendências tecnológicas. **Dep. Process. Orgânicos**, v. 737, p. 14-19, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/download/55125259/grafeno_1.pdf. Acesso em: 16 mar. 2023

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.jobe.2019.101007>.

DOS SANTOS, F.; BANDEIRA, M.; KOSTESKI, L. Estudo do ensaio brasileiro aplicado ao concreto através da técnica de correlação digital de imagens. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 2, 3 mar. 2020. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/SIEPE/article/view/98502>. Acesso em: 14 mai. 2023.

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, A.; SPIM, J.; DOS SANTOS, C. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed.: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2012.

GHAFFARI, E. et al. *The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete*. **Materials & Design**, v. 59, p. 1-9, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.051>

GHOLAMPOUR et al. *From graphene oxide to reduced graphene oxide: impact on the physiochemical and mechanical properties of graphene–cement composites*. **ACS applied materials & interfaces**, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b16736>.

HELENE, P.; ANDRADE, T.. Concreto de cimento Portland. Separata de: INO, Akemi et al. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3ª. ed. rev. São Paulo: IBRACON, 2017. v. VI, p. 905-944. ISBN 978-85-98576-27-5.

HUANG, NM et al. *Simple 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>.

IM, H.; KIM, J. *Thermal conductivity of a graphene oxide–carbon nanotube hybrid/epoxy composite*. **Carbon**, v. 50, ed. 15, p. 5429-5440, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.07.029>.

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>.

KAI GONG, S. M. A.. *Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273311680_Reinforcing_Effects_of_Graphene_Oxide_on_Portland_Cement_Paste. Acesso em: 26 fev. 2023.

LEE, C. *et al.* *Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene*. *Science*, 2008 Jul 18;321(5887):385-8. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1157996>. PMID: 18635798.

LIU, L; *et al.* *Mechanical properties of graphene oxides*. *Nanoscale*, v. 4, p. 5910-5916, 30 jul. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/C2NR31164J>.

LOOS, Marcio Rodrigues. *Nanociência e Nanotecnologia: Compósitos Termofixos Reforçados com Nanotubos de Carbono*. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. ISBN 978-85-7193-319-4.

LU, L.; OUYANG, D.; XU, Weiting. *Mechanical Properties and Durability of Ultra High Strength Concrete Incorporating Multi-Walled Carbon Nanotubes*. *Materials*, [s. l.], v. 9, n. 419, ed. 6, 27 maio 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9060419>.

LUCAS, J. L. C. **Síntese e Caracterização de Dispersões Coloidais de Óxido de Grafeno Reduzido e Dopado com Nitrogênio para Aplicação em Eletrônica Orgânica**. Dissertação (Mestrado em Física) - Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

LV, S. *et al.* *Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites*. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 121-127, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.022>.

LV, S. *et al.* *Effect of GO nanosheets on shapes of cement hydration crystals and their formation process*. *Construction and Building Materials*, v. 64, p. 231-239, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.061>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181400378X>. Acesso em: 19 mar. 2023

LV, S. *et al.* *Fabrication of polycarboxylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement composites*. *Cement and Concrete Composites*, v. 66, p. 1-9, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.007>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIKHAIL, I. *Graphene: carbon in two dimensions*. *Materials Today*, v. 10, n. 1-2, p. 20-27, 2007. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(06\)71788-6](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(06)71788-6).

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.083>

MOHAMMED, A.; AL-SAAD, N. T. K.; SANJAYAN, J. *Inclusion of graphene oxide in cementitious composites: state-of-the-art review*. *Australian Journal of Civil Engineering*, v. 16, n. 2, p. 81-95, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/14488353.2018.1450699>.

NASSER, I.M. et al. *The effect of nanosilica incorporation on the mechanical Properties of concrete exposed to elevated temperature: a review*. **Environ Sci Pollut Res**, v. 29, p. 15318-15336, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18310-8>.

NEVILLE, A.; BROOKS, J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Brokman, 2013. ISBN 978-85-8260-072-6.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. ISBN 978-85-8260-366-6.

PORTO, P. B.; FERNANDES, D. S. G. **Curso Básico de Concreto Armado**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. ISBN 978-85-7875-5.

REDDY, P.V.R.K., PRASAD, D.R *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>.

RAMSDEN, J. **Nanotechnology: An Introduction**. New York: William Andrew, 2011. ISBN: 978-0-08-098447-8.

SAID, A.M. et al. *Properties of concrete incorporating nano-silica*. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 838-844, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.044>.

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.

SIKA S.A. Sika ViscoCrete - 3535 CB. 2022. Disponível em: <https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/s/sika-viscocrete-3535cb.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2022

SINGH, L.P. et al. *Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review*. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1069-1077, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.052>.

STANKOVICH, S. et al. Graphene-based composite materials. *Nature*, v. 442, p. 282-286, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04969>.

SUN, Y.; WU, Q.; SHI, G. *Graphene based new energy materials*. **Energy & Environmental Science**, ed. 4, p. 1113-1132, 2011. DOI 10.1039/c0ee00683a. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/ee/c0ee00683a>. Acesso em: 5 jan. 2023.

TAVARES, C. **Investigação dos efeitos da inserção de melamina no meio reacional da síntese de Óxido de Grafeno rico em grupos carbonila**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em física) - Departamento de Física, UFJF, Juiz de Fora - MG, p. 52. 2021.

TEATINI, J. C.. **ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: Fundamentos de Projeto, Dimensionamento e Verificação**. 3ª Ed: UnB, 2005. ISBN 978-85-352-8576-5.

VALLURUPALLI, K. *et al.* *Effect of graphene oxide on rheology hydration and strenght development of cement paste.* **Construction and Building Materials**, v. 265, n. 120311, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120311>.

VICENTINI, N. C. Síntese e Caracterização de Óxido de Grafeno Reduzido e Sulfonado via Sal Arildiazônio de Ácido Sulfanílico para aplicações em Eletrônica Orgânica. Dissertação (Mestrado em Física) - Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019.

YU, W. *et al.* *Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets.* **Physics Letters A**, v. 375, ed. 10, p. 1323-1328, 7 mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.01.040>

ZHU, Y. *et al.* *Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications.* **Advanced Materials**, v. 22, ed. 35, p. 3906-3924, 29 jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201001068>.