



2023

## Análise das Propriedades Físicas e Mecânicas de Concretos com Adição de Óxido de Grafeno

Gustavo Barbosa Lucas Ribeiro <sup>a</sup>; Sidiclei Formagini <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Aluno de Graduação em Engenharia Civil, [glucasribeiro.gr@gmail.com](mailto:glucasribeiro.gr@gmail.com)

<sup>b</sup> Professor Orientador, Dr. Eng. Civil, [sidiclei.formagini@ufms.br](mailto:sidiclei.formagini@ufms.br)

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

---

### RESUMO

O cimento Portland é um dos materiais mais amplamente difundidos na construção civil em todo o mundo, indispensável a fabricação do concreto. Buscando alternativas que ofereçam a produção de um concreto mais econômico e sustentável, com o objetivo de reduzir custos e alcançar propriedades mecânicas satisfatórias, foi proposta a utilização do óxido de grafeno (OG) é um nanomaterial que tem despertado o interesse da indústria da construção devido às melhorias significativas que pode proporcionar nas propriedades do concreto. Neste estudo, se investiga os efeitos da adição de OG nas propriedades físicas e mecânicas de concretos de resistência de 30 e 35 MPa, aplicados em materiais de Campo Grande - MS, com adições de OG variando de 0,00% a 0,09% em peso de cimento. O estudo demonstra que o OG influenciou na diminuição da trabalhabilidade do concreto em estado fresco. A adição de 0,09% de OG foi capaz de reduzir a absorção de água, com valores de redução de 0,76% (C30) e 0,64% (C35), além de aumentar a resistência à compressão em até 12,85% (C30) e 13,64% (C35) aos 28 dias. Além disso, foi possível observar o efeito catalítico na hidratação do OG e a estabilização nos valores de resistência na idade de 63 dias. Os módulos de elasticidade estática, dinâmico e velocidade de pulso ultrassônico (UVP) aumentaram com a presença de adições de OG, o que pode estar relacionado ao aumento da resistência à compressão. Estudos adicionais são necessários para compreender a resistência à tração, pois os dados foram inconclusivos.

**Palavras-chave:** Óxido de grafeno; resistência à compressão e tração; módulos de elasticidade; velocidade de pulso.

### ABSTRACT

Portland cement is one of the most widely used materials in civil construction worldwide, essential for concrete production. In order to reduce costs and achieve satisfactory mechanical properties, the use of graphene oxide (GO) has been proposed. Graphene oxide is a nanomaterial that has recently gained attention from the construction industry due to its significant improvements in concrete properties. This study investigates the effects of adding GO on the physical and mechanical properties of concrete with compressive strengths of 30 and 35 MPa, applied in materials from Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brazil, with GO additions ranging from 0.00% to 0.09% by weight of cement. The study demonstrates that GO influenced the decrease in workability of fresh concrete. The addition of 0.09% GO was able to reduce water absorption, with reduction values of 0.76% (C30) and 0.64% (C35), as well as increase compressive strength by up to 12.85% (C30) and 13.64% (C35) at 28 days. Furthermore, a catalytic effect on GO hydration and stabilization in strength values at 63 days was observed. The static and dynamic of young's modulus and ultrasonic velocity pulse (UVP) increased with the presence of GO additions, which may be related to the increase in compressive strength. Further studies are necessary to understand tensile strength, as the data obtained was inconclusive.

**Keywords:** Graphene oxide; compressive and tensile strength; young's modulus; ultrasonic velocity pulse.

## 1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um dos materiais mais amplamente difundidos na construção civil em todo o mundo, servindo como base para a fabricação do concreto. As características que contribuem para o seu sucesso, são: disponibilidade, versatilidade, facilidade de execução, durabilidade, custo, boa resistência mecânica à compressão e, ao adicionar armaduras de aço, o material adquire a capacidade de resistir a esforços de tração (SANTOS, 2015).

Buscando melhoras nas propriedades e qualidades do cimento Portland, surgiram pesquisas voltadas para o desenvolvimento de alternativas mais econômicas e sustentáveis na produção de concreto, com o objetivo de reduzir custos e alcançar propriedades mecânicas satisfatórias (CABRAL; AZEVEDO, 2011). Ainda de acordo com Cabral e Azevedo (2011) diversos materiais têm sido alvo dessas investigações recentes, como a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, a cinza da folha de bananeira, a cinza da casca de arroz, o resíduo cerâmico moído, a borracha de pneus usados, e nanomateriais a base carbono, entre outros.

A utilização de nanomateriais na indústria da construção tem se mostrado uma prática recente e promissora, devido as suas numerosas qualidades. Esses materiais têm a capacidade de melhorar o desempenho mecânico ao preencher vazios no concreto em escala nanométrica e promover avanços nos compósitos de concreto. Um exemplo de nanomaterial é o óxido de grafeno (OG), conhecido por suas propriedades à base de carbono e alta área de superfície específica. A incorporação de nanomateriais em compósitos de concreto também tem contribuído para melhorias significativas nas propriedades do concreto, como flexão, durabilidade, tenacidade e características de tensão, impactando positivamente a escala nano do material (ZAIS et al., 2022).

O grafeno é um material composto por uma única camada plana de carbono com uma estrutura cristalina e eletrônica de alta qualidade. O OG consiste em folhas com grupos funcionais de oxigênio em sua estrutura, o que facilita sua dispersão em água. Essas características fazem do OG um agente eficiente para melhorar as propriedades de interfaces entre fibras e matrizes em materiais compósitos (ROY et al., 2018). A estrutura aromática do óxido de grafeno é semelhante a outros materiais derivados do grafeno, mas devido à reação química que ocorre, algumas ligações de pares de elétrons são quebradas e grupos funcionais, como fenol e carbonila, são ligados à

estrutura aromática de camada única de  $sp^2$  (ZAIS et al., 2022).

O OG possui diversas formas de atuação no reforço de materiais cimentícios, que segundo Rocha et al. (2021) são: a morfologia rugosa do óxido de grafeno que facilita o intertravamento com a matriz do cimento; os grupos funcionais de oxigênio funcionam como sítios de adsorção para moléculas de água e componentes do cimento, promovendo a reação de hidratação e formação dos cristais de C-S-H; as moléculas de água adsorvidas na superfície do OG atuam como reservatório e canais de transporte de água, reduzindo a retração; e a regulação do processo de nucleação e formação dos cristais de C-S-H, pelo OG, que atua aumentando a resistência à tração e flexão do compósito de cimento; as folhas de OG são capazes de absorver e transmitir os esforços de tração, prevenindo fissuras em escala nanométrica; e por fim, a adição do OG que resulta em uma microestrutura com menos defeitos, o que melhora a condução de tensões térmicas no compósito.

Na revisão realizada por Rocha et al. (2021), foi observado um aumento significativo de 62% nas publicações relacionadas ao uso de óxido de grafeno como adição em matrizes cimentícias no período de 2018 a 2021. No entanto, o estudo ressalta que, dentre essas publicações, 60% se concentraram em análises envolvendo pasta de cimento, 36% abordaram argamassas, apenas 4% exploraram ambos os materiais e nenhuma estudava adições em concretos. Surpreendentemente, ao realizar uma busca em repositórios como o ScienceDirect e Scielo, foram encontrados poucos artigos que abordaram o uso de óxido de grafeno em concretos, a grande maioria das pesquisas disponíveis está relacionada a argamassas e pastas cimentícias. Diante desse cenário, torna-se essencial o presente trabalho, que tem como objetivo investigar os efeitos da adição de um produto comercial a base de óxido de grafeno nas propriedades físicas e mecânicas do concreto de resistências na ordem de 30 e 35 MPa.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização dos materiais

Para a produção do concreto, utilizaram-se os agregados disponíveis na região de Campo Grande - MS. Os agregados utilizados incluem brita 9,25/25 e pedrisco 4,75/12,5 provenientes de formações basálticas e a areia fina de cava. O cimento selecionado foi o CP II 32 E, da marca Itaú, e o aditivo utilizado foi o Muraplast FK 300 da MC-Bauchemie.

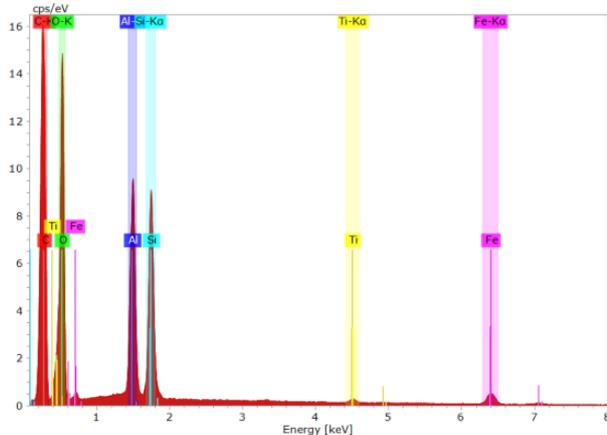
Os agregados utilizados nos traços foram caracterizados de acordo com as normas vigentes da ABNT: massa unitária (NBR 16972:2021), densidade (NBR 16916:2021 para agregados miúdos e NBR 16917:2021 para agregados graúdos), distribuição granulométrica, módulo de finura e diâmetro máximo característico (NBR 7211:2022). Os resultados dessas caracterizações estão apresentados na seção de Resultados e Discussões.

O Óxido de grafeno constitui de um produto comercial produzido pela empresa Yahalom. Ele apresenta característica de um pó homogêneo diluído em uma solução aquosa, com uma coloração predominantemente cinza, conforme é visto na Figura 1. O fabricante forneceu um relatório de composição elaborado pelo Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno da UFMG. Nesse relatório, foi realizada uma análise de Espectroscopia de Dispersão de Raio-X, que revelou a presença dos seguintes elementos no pó de OG: Alumínio (Al), Carbono (C), Ferro (Fe), Oxigênio (O), Silício (Si) e Titânio (Ti). A Figura 2 exibe a análise de Espectroscopia de Dispersão de Raio-X.

Figura 1- Óxido de grafeno fornecido. Fonte: Autor.



Figura 2 - Espectroscopia fornecido. Fonte: CTNANO/UFMG.



## 2.2. Dosagem do Concreto, preparo, cura e moldagem dos corpos de prova

Para um melhor entendimento da influência do óxido de grafeno nas propriedades do concreto, foram selecionadas duas faixas de dosagem distintas. A dosagem foi realizada de acordo com o método ABCP/ACI, seguindo um desvio padrão (SD) de 4 MPa, conforme estabelecido pela norma NBR 12655 (ABNT, 2022). As resistências características iniciais aos 28 dias foram de 30 MPa e 35 MPa, com uma classe de abatimento S100.

Os traços utilizados foram definidos, levando em consideração as proporções de cimento, areia, brita e pedrisco, respectivamente. Para o traço de 30 MPa, as proporções foram de 1:1,97:1,8:0,99, com um fator água-cimento de 0,45. Já para o traço de 35 MPa, as proporções foram de 1:1,65:1,4:1,08, com um fator água-cimento de 0,40. Em ambos os traços, utilizou-se uma proporção de aditivo de 0,55% em relação ao peso do cimento.

As porcentagens de adição de óxido de grafeno foram determinadas com base nos estudos de Zais et al. (2022) e Wu et al. (2019), nos quais os pesquisadores investigaram adições no intervalo de 0,0% a 1,2% e 0,0% a 0,08%, respectivamente em concretos. Portanto, os teores de OG assumidos nesse estudo foram os que apresentaram os melhores resultados, sendo estabelecidos nos seguintes percentuais: 0,00%, 0,03%, 0,06% e 0,09%.

Para o experimento, foram realizados oito traços de concreto, sendo quatro traços para a resistência característica à compressão (fck) de 30 MPa e quatro traços para fck de 35 MPa, cada um com as adições de Óxido de grafeno correspondentes.

Tabela 1 - Proporções do Traço em kg/m<sup>3</sup>. Fonte: Autor.

ID do traço	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Adição de OG (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 9,5/25 (kg/m <sup>3</sup> )	Pedrisco 4,75/12,5 (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
C30 + 0,00%	400	0	788	720	396	180	2,2
C30 + 0,03%	400	0,12	788	720	396	180	2,2
C30 + 0,06%	400	0,24	788	720	396	180	2,2
C30 + 0,09%	400	0,36	788	720	396	180	2,2
C35 + 0,00%	460	0	758	644	496	184	2,5
C35 + 0,03%	460	0,14	758	644	469	184	2,5
C35 + 0,06%	460	0,28	758	644	469	184	2,5
C35 + 0,09%	460	0,41	758	644	469	184	2,5

Na preparação do traço, os materiais foram pesados em uma balança, seguindo as proporções indicadas para todos os materiais, a fim de produzir aproximadamente 60 litros de concreto. As adições de óxido de grafeno foram pesadas separadamente em uma balança de maior precisão, respeitando também as proporções em relação ao cimento. O óxido de

grafeno foi diluído em água (Figura 3) e agitado manualmente na primeira porção de água, correspondendo a 70% do volume total de água a ser utilizado no traço.

Figura 3 - Diluição de óxido de grafeno na água. Fonte: Autor.



Os traços foram misturados em uma betoneira de capacidade de 100 litros. A confecções dos traços concretos foram realizados seguindo as recomendações do livro de Helene e Trezian: "Manual de Dosagem e Controle Tecnológico" (1992). Os agregados miúdos e graúdos foram adicionados à betoneira, seguidos pela primeira porção de água (70% do total) com o grafeno disperso e foram misturados por aproximadamente 10 minutos. Após a homogeneização da mistura, foi adicionado o cimento, a porção restante de água (30% do total) e o aditivo, nesta ordem sendo batidos por mais 15 minutos na betoneira.

Com o concreto misturado em seu estado fresco, foi realizado o ensaio de abatimento de acordo com NBR 16889 (ABNT, 2020) e em seguida foram moldados 18 corpos de prova para cada traço, nas dimensões de  $\phi 10$  por 20 cm, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). A desforma dos corpos de prova foi realizada 24 horas após a moldagem, sendo a cura realizada em câmara úmida.

### 2.3. Ensaios

Os dados obtidos nos ensaios foram analisados utilizando o software Excel, que também foi utilizado para gerar os gráficos correspondentes. Os ensaios foram realizados com o objetivo de obter as propriedades específicas dos concretos, de amostras com e sem a adição de óxido de grafeno. Na sequência, são descritos a quantidade de amostra, as idades e como foram realizados os ensaios.

#### 2.3.1. Abatimento do concreto

Este ensaio é utilizado para medir a trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco. A medição é feita por fluxo livre utilizando o Cone de Abrams, no qual é realizado o acompanhamento do deslocamento vertical do topo do cone após a retirada do molde (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011). O procedimento desse ensaio é estabelecido pela NBR 16889 (ABNT, 2020).

#### 2.3.2. Resistência Compressão Axial e Diametral

Para o estudo de compressão axial, os corpos de prova foram ensaiados seguindo a NBR 5739 (ABNT, 2018). Antes dos ensaios, os corpos de prova passaram por um processo de retificação de suas extremidades. Foram rompidas duas amostras de cada traço em todas as idades de 3, 7, 14, 28 e 63 dias, exceto aos 28 dias, em que foram rompidas três amostras.

Os resultados da resistência a compressão axial são obtidos pela Equação 1:

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.d^2} \quad (1)$$

Onde  $f_c$  é a resistência a compressão axial do corpo de prova em Megapascal (MPa),  $F$  é a força máxima em newtons (N) e  $d$  é o diâmetro do corpo de prova em milímetros (mm).

Para a realização do ensaio de compressão diametral, foi seguindo as especificações da NBR 7222 (ABNT, 2011). Sendo utilizadas madeiras nas extremidades opostas do corpo de prova para auxiliar o posicionamento na prensa, conforme ilustrado na Figura 4, esse ensaio é empregado para determinar a resistência à tração diretamente. Para o ensaio foram rompidas duas amostras de cada traço aos 28 dias.

Figura 4 - Ensaio de compressão diametral, no detalhe o posicionamento das madeiras no corpo de prova. Fonte: Autor.



Os resultados da resistência a compressão diametral são obtidos pela Equação 2:

$$f_{c_t} = \frac{2.F}{\pi.d.l} \quad (2)$$

Onde  $f_{c_t}$  é a resistência à tração por compressão diametral do corpo de prova em Megapascal (MPa),  $F$  é a força máxima em newtons (N),  $d$  é o diâmetro do corpo de prova em milímetros (mm) e  $l$  é o comprimento do corpo de prova em milímetros (mm).

### 2.3.3. Ensaio de absorção

A determinação da absorção de água seguiu a NBR 9778 (ABNT, 2009). Foram utilizados dois corpos de prova para cada traço na idade de 28 dias.

Inicialmente, os corpos de prova de cada traço foram submetidos a um processo de secagem em estufa a uma temperatura de 100 °C durante três dias, e suas massas secas foram determinadas. Em seguida, eles foram submersos em água por mais três dias, e suas massas saturadas foram medidas novamente.

Os cálculos de absorção foram realizados utilizando a Equação 3:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde  $A$  representa a absorção em porcentagem (%),  $m_{sat}$  é a massa da amostra saturada em água após imersão em gramas (g), e  $m_s$  é a massa da amostra seca em estufa em gramas (g).

### 2.3.4. Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico e estático

Para obter os módulos de elasticidade, foram realizados dois tipos de ensaios: o ensaio mecânico de módulo de elasticidade estático e o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (UVP). O ensaio de módulo de elasticidade estático é determinado por meio de ensaios mecânicos destrutivos, nos quais a tensão aplicada está relacionada ao deslocamento do corpo de prova dentro da região de deformação elástica. Já o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico é determinado indiretamente por meio de ensaios não destrutivos. Para ambos os ensaios, foram utilizados os mesmos três corpos de prova para cada traço, com idade de 28 dias. Suas bases foram regularizadas por meio de desbaste em retífica.

#### 2.3.4.1. Módulo de elasticidade estático

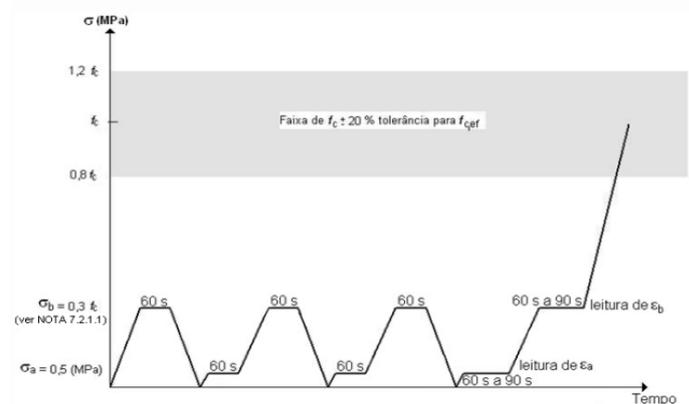
Os testes de módulo de elasticidade estático foram realizados seguindo o método "A" descrito na NBR 8522 (ABNT, 2021). Para cada amostra de concreto, a resistência à compressão foi determinada antes do início do ensaio em dois corpos de prova.

Figura 5 - Ensaio de Módulo de elasticidade estático com utilização de extensômetros e prensa. Fonte: Autor.



No ensaio, foi aplicada uma carga correspondente a aproximadamente 30% da resistência à compressão de referência. Após sessenta segundos, a carga foi descarregada para 0,5 MPa e mantida por mais sessenta segundos. Esse ciclo de carga e descarga foi repetido três vezes, sendo posteriormente registradas as deformações medidas ( $\epsilon_a$ ) em até trinta segundos. Em seguida, o corpo de prova foi carregado até atingir a tensão de limite superior ( $\sigma_b$ ) e a carga foi mantida por sessenta segundos. As deformações medidas ( $\epsilon_b$ ) foram registradas em até trinta segundos, conforme esquema da Figura 6. Para a medição dos deslocamentos, foram utilizados dois transdutores de deslocamento fixados em lados opostos de cada corpo de prova, com graduação 0,001 mm.

Figura 6 - Representação esquemática do carregamento para determinação do módulo de elasticidade – Método A. Fonte: NBR 8522-1:2021.



Para os cálculos do módulo de elasticidade estático ( $E_{ci,i}$ ) em Gigapascal (GPa) pelo método A, foi utilizado a equação 4:

$$E_{ci,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\epsilon_b - \epsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

### 2.3.4.1. Ensaio de pulso ultrassônico (UVP)

O equipamento utilizado foi o Pundit PL-2, Versão 200, equipado com um transdutor de 54 kHz e diâmetro de 50 mm. Antes da realização do ensaio, cada corpo de prova foi pesado e teve seu comprimento medido. Durante os ensaios, foi utilizado gel de ensaio para garantir o adequado contato entre os transdutores e o material. Os corpos de prova foram submetidos a três repetições de aferições, e as médias dessas aferições foram calculadas para a obtenção dos resultados.

Figura 7- Equipamento Pundit PL-2 com o corpo de prova posicionado para realização do ensaio de Ultrassom (UVP).  
Fonte: Autor.



Através dos pulsos ultrassônicos, é possível obter parâmetros como a velocidade e tempo de propagação das ondas. A resistência do concreto, é obtida empiricamente por meio de uma curva pré-definida pelo aparelho conforme Pereira e Formagini (2022). Além disso, é possível determinar o módulo de elasticidade estático empiricamente, através de leituras das propagações das ondas e análises gráficas realizadas diretamente no aparelho.

O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado utilizando a Equação 5, adotada pela NBR NM 58 (ABNT, 1996):

$$E_d = V^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (5)$$

Onde  $E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico em Gigapascal (GPa),  $V$  é a velocidade de propagação da onda em metros por segundo (m/s),  $\rho$  é a densidade do concreto ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

## 2.4. Correlações de comportamento

Para avaliar e analisar os comportamentos dos impactos das adições de óxido de grafeno nas propriedades mecânicas, foram reproduzidas

correlações por curvas de gráficos com base em estudos conduzidos por Thomaz, Miyaji e Possan (2021), Pereira e Formagini (2022), além da Norma NBR 6118 (ABNT, 2014), para módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos, velocidade de pulso e resistência à compressão. Sendo plotados os dados nos gráficos e comparados com modelos de comportamento estabelecidos por equações provenientes desses estudos e da norma.

Além disso, foi feita a análise da qualidade dos dados individuais de cada correlação com sua respectiva adição, obtidos por meio dos ensaios, os coeficientes utilizados foram: de correlação de Pearson ( $R$  múltiplo), que varia de -1 a 1 e considera que seus valores de  $R$  variam entre 0,10 e 0,29 representam uma correlação fraca, para valores entre 0,30 e 0,49 indicam que há uma correlação moderada, e valores entre 0,50 e 1 representam uma correlação forte (Filho e Junior, 2009). E os coeficientes de variação  $R$ -quadrado ( $R^2$ ), que varia de 0 a 1, representando a proporção da variabilidade dos dados por meio de modelo de regressões, tanto na forma linear quanto na forma não-linear, em relação à média. Sendo ambos calculados com o software Excel.

### 2.4.1. Correlação entre Resistência à compressão e módulo de elasticidade estático

Os comportamentos dos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade estática foram avaliados por meio da comparação com a Equação 6 da norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{fck} \quad (6)$$

Nessa equação,  $E_{ci}$  representa o módulo de elasticidade estático para concretos com resistência à compressão de 20 MPa a 50 MPa, em Gigapascal (GPa). Sendo relacionado o resultado aos parâmetros do material do agregado graúdo utilizado (coeficiente  $\alpha_e$ ) e a resistência à compressão do concreto ( $fck$ ) em Megapascal (MPa).

Para o cálculo do módulo de elasticidade, adotou-se dois valores de  $\alpha_e$ : 1,2 para o agregado basáltico, conforme recomendado pela NBR 6118:2014; e 0,912, conforme sugerido por Bossoni e Cheung (2016) para concretos com agregados provenientes de Campo Grande – MS. Essa sugestão se deve ao fato de que o agregado miúdo (areia) disponível na cidade está abaixo da zona limite inferior utilizável de acordo com a NBR 7211:2022.

### 2.4.2. Correlação entre módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico

Para a análise dos dados dos módulos de elasticidade estático e dinâmico, utilizou-se a correlação proposta

por Thomaz, Miyaji e Possan (2021) e comparada através da Equação 7 desses mesmos autores. Essa equação estabelece uma relação entre os dois parâmetros para agregados basálticos. Os autores identificaram um erro máximo de 7,10 GPa e um coeficiente de variação ( $R^2$ ) de 0,6777.

$$E_c = 0,3128 \cdot E_d^{1,2128} \quad (7)$$

Onde,  $E_c$  é o módulo de elasticidade dinâmico em Gigapascal (GPa) e  $E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico em Gigapascal (GPa).

### 2.4.3. Correlação entre módulo de elasticidade estático e Velocidade de pulso ultrassônico (UVP)

Os dados de módulo de elasticidade estático e velocidade de pulso ultrassônico foram correlacionados por Pereira e Formagini (2022) para materiais de Campo Grande - MS. Para a comparação dos valores, utilizou-se a Equação 8, proposta pelos mesmos autores.

$$E_{ci}^p = 11,782 \cdot V_p - 19,747 \quad (8)$$

Onde a velocidade de pulso ( $V_p$ ) é expressa em quilômetros por segundo (km/s) e o módulo de elasticidade estático ( $E_{ci}^p$ ) em Gigapascal (GPa). Durante a análise, foi encontrado um erro máximo de 1,2 GPa, juntamente com um coeficiente de variação ( $R^2$ ) de 0,758.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. Caracterização dos agregados

Os resultados das caracterizações dos agregados miúdos e graúdos estão presentes na Tabela 2. As Figuras 8 e 9 exibem a distribuição granulométrica do material, seguindo as especificações da NBR 7211:2022.

Tabela 2 - Caracterização dos agregados. Fonte: Autor.

Areia Fina de Cava		
Densidade do agregado condição seca	2,57 g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16916:2021
Massa unitária (Método C)	1,55 g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16972:2021
Módulo de Finura	1,16	ABNT NBR 7211:2022
Brita 9,25/25		
Densidade do agregado condição seca	2,85 g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16917:2021
Densidade do agregado na condição saturada	2,91 g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16917:2021
Massa unitária (Método C)	1,52 g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16972:2021
Módulo de Finura	7,01	ABNT NBR 7211:2022
Diâmetro máximo característico	25 mm	ABNT NBR 7211:2022
Pedrisco 4,75/12,5		
Densidade do agregado condição seca	2,82 g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16917:2021
Densidade do agregado na condição saturada	2,9 g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16917:2021
Massa unitária (Método C)	1,6 g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16972:2021
Módulo de Finura	5,62	ABNT NBR 7211:2022
Diâmetro máximo característico	9,50 mm	ABNT NBR 7211:2022

Figura 8 – Granulometria dos agregados miúdos. Fonte: Autor.

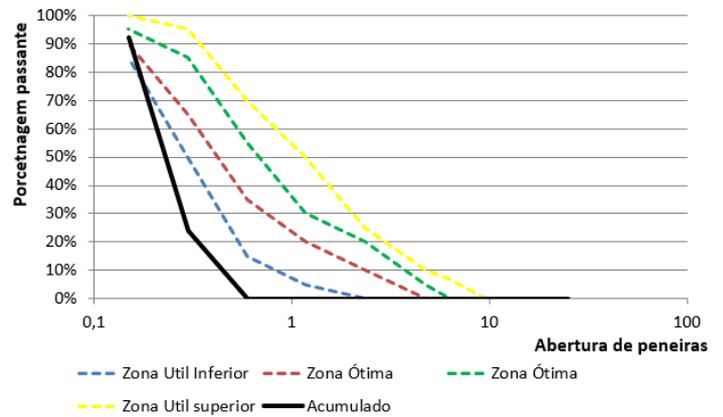
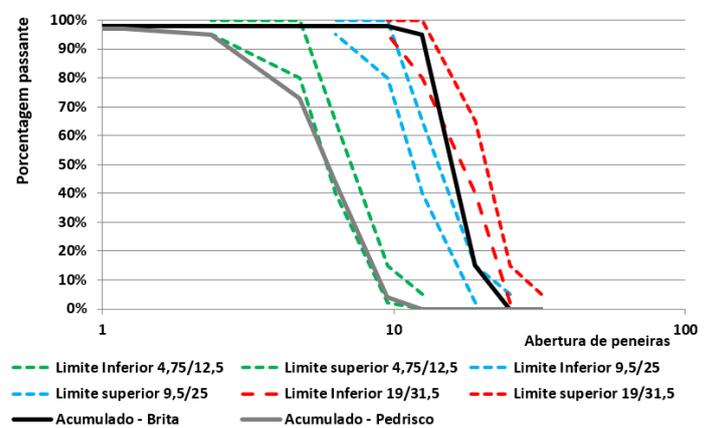


Figura 9 – Granulometria dos agregados graúdos. Fonte: Autor.

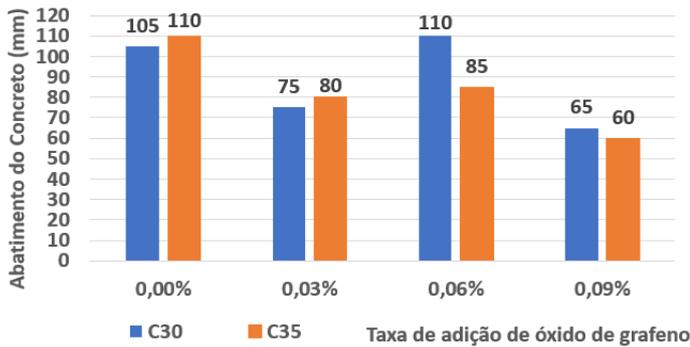


### 3.2. Propriedades Físicas

#### 3.2.1. Trabalhabilidade

Os resultados do teste de abatimento estão ilustrados na Figura 10. É observável que as amostras demonstram uma tendência de redução do abatimento à medida que aumenta a dosagem de óxido de grafeno. As amostras de controle (sem adição) exibiram um abatimento maior em comparação com as amostras que possuíam adição de 0,09% de óxido de grafeno. As amostras com adição de 0,06% tiveram um comportamento divergente em relação ao esperado.

Figura 10 – Abatimento dos Concretos. Fonte: Autor.

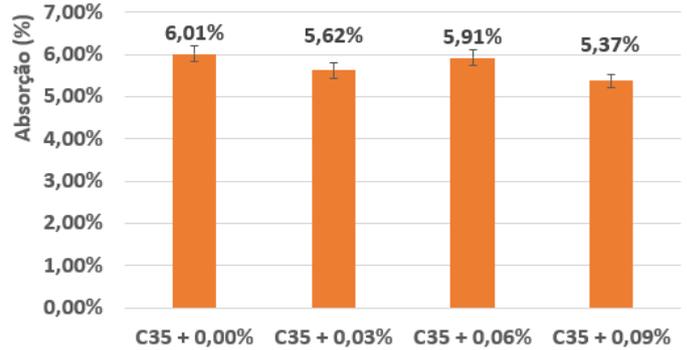
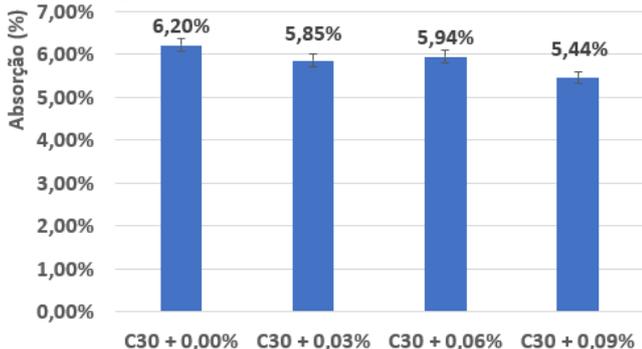


De acordo com Wu et al. (2019), a diminuição do abatimento pode ser atribuída ao aumento da superfície de contato dos grãos de óxido de grafeno presentes, o que resulta na redução da quantidade de água disponível para promover a fluidez da mistura do concreto. Além disso, durante a moldagem dos corpos de prova, foi observada um enrijecimento rápido da pasta de cimento, o que resultou na diminuição da trabalhabilidade do concreto com o tempo. Essa redução da trabalhabilidade foi proporcional à dosagem de óxido de grafeno utilizada. No entanto, é importante ressaltar que o efeito específico do enrijecimento da pasta não foi investigado neste estudo.

### 3.2.2. Absorção de água e precipitação de carbonato de cálcio

A Figura 11 apresenta os resultados de absorção de água para os concretos com adição de óxido de grafeno. Observa-se que há uma redução na absorção de água quando comparada às amostras de controle, especialmente na amostra com adição de 0,09%, onde para os traços de C30 e C35, a diminuição da absorção de água foi na ordem de 0,76% e 0,64%, respectivamente. De acordo com Zaid et al. (2022), a adição de óxido de grafeno em compósitos de concreto promove a formação de camada do material devido à sua ligação mais fraca com a matriz ligante, atuando como uma espécie de revestimento protetor. Isso melhora a resistência à penetração do concreto.

Figura 11 – Absorção de água nos concretos de 30 (gráfico a) e 35 (gráfico b) MPa. Fonte: Autor.



Foi visualmente perceptível o aumento da precipitação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) nas superfícies dos corpos de prova durante seu período em câmara úmida, conforme ilustrado na Figura 12.

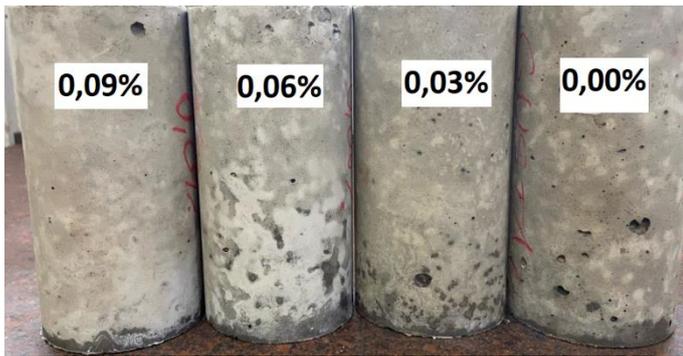
Figura 12 - Presença de precipitações de Carbonato de cálcio nos corpos de prova. Fonte: Autor.



As concentrações mais significativas foram observadas nos corpos de prova com adição de óxido de grafeno em 0,06% aos 28 dias. Essa maior ocorrência de precipitação de carbonato de cálcio pode ser atribuída à interação entre os componentes do concreto e o óxido de grafeno adicionado.

Na Figura 13, da esquerda para a direita, são apresentados os corpos de prova com diferentes dosagens de adição de óxido de grafeno: 0,09%, 0,06%, 0,03% e 0,00%. Observa-se a presença de áreas brancas nas superfícies dos corpos de prova, indicando a ocorrência de precipitações de carbonato de cálcio. As concentrações mais significativas dessas precipitações (“manchas brancas”) foram observadas nas amostras com adição de 0,06% e 0,09%.

Figura 13 - Alteração das cores de Corpos de Prova, pela formação do Carbonato de cálcio. Fonte: Autor.



### 3.3. Propriedades Mecânicas

#### 3.3.1. Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos em corpos de prova com idades de 3, 7, 14, 28 e 63 dias. Os resultados médios desses ensaios são apresentados nas Figuras 14 e 15, representando as resistências de 30 MPa e 35 MPa, respectivamente. Observou-se que, para os traços C30 e C35, todas as amostras com adições de óxido de grafeno apresentaram resistência superior em comparação à amostra de controle (0,00%). Em particular, a amostra com 0,09% de adição de óxido de grafeno obteve os maiores valores de resistência com um ganho percentual de 12,85% para o concreto C30 e 13,64% para o C35, enquanto as amostras com 0,03% apresentaram os menores valores aos 28 dias. É relevante destacar que as amostras do traço C30, com adições de 0,03% e 0,06%, demonstraram valores de resistência próximos com a amostra de controle para as idades de 3 e 28 dias.

No entanto, aos 63 dias de idade, é observada uma estabilização das resistências para ambos os traços, com valores próximos entre si para a maioria das amostras. Ainda é importante ressaltar que no caso da amostra do traço C35 + 0,06%, foi identificada uma variação de 11,46% e uma diferença significativa de resistência em relação aos demais traços e adições. Esta variação, talvez seja consequência de alguma falha no corpo de prova, uma vez que tal comportamento não foi observado para as demais idades.

Esses resultados corroboram com os estudos de Zais et al. (2022) e Wu et al. (2019) sobre concretos com adições de óxido de grafeno, os quais também evidenciam a melhora progressiva na resistência com o aumento do teor de óxido de grafeno nas amostras.

Figura 14 - Resistência à compressão do concreto C30 com teor variável de óxido de grafeno. Fonte: Autor.

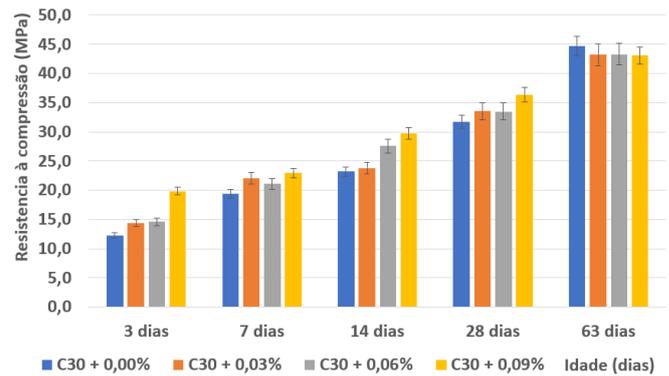
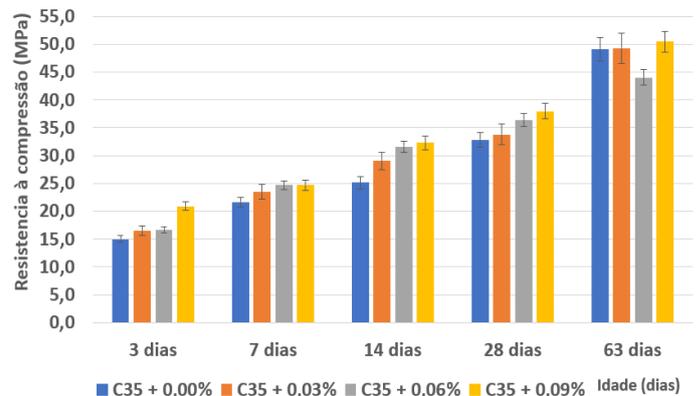


Figura 15 – Resistência à compressão do concreto C35 com teor variável de óxido de grafeno. Fonte: Autor.



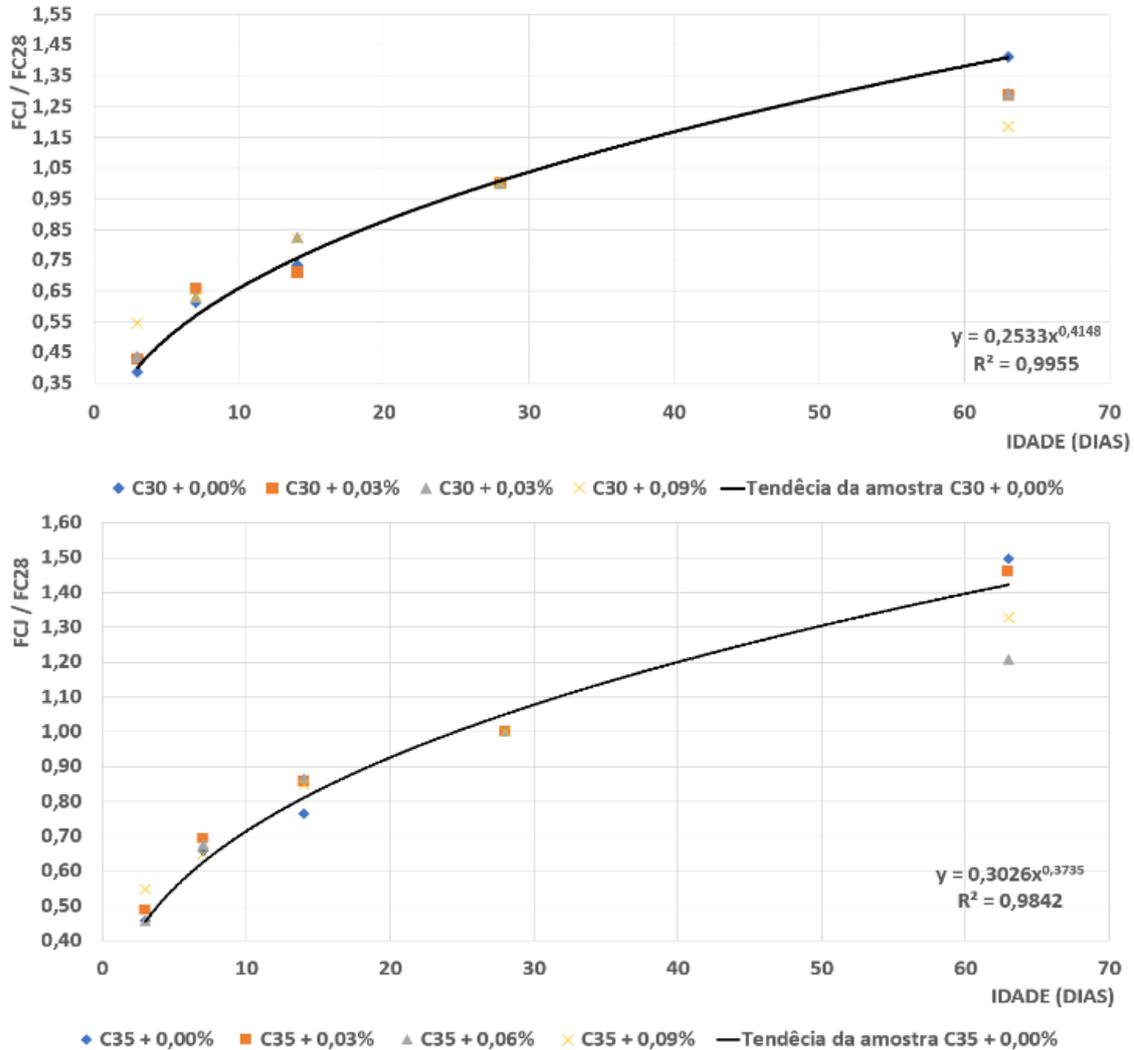
Na Figura 16, os dados de resistência de cada idade foram adimensionalizados em relação às resistências aos 28 dias ( $F_{c_j}/F_{c_{28}}$ ) para cada traço e adição. Ao analisar os dados gerados, é possível observar a tendência de aceleração no ganho de resistência com o aumento da adição de óxido de grafeno em relação às amostras de controle (0,00%) para os traços C30 e C35, até os 28 dias. No entanto, após essa idade, aos 63 dias, nota-se uma desaceleração do ganho de resistência com relação as amostras de controle.

Estudos semelhantes realizados por Lin, Wei e Hu (2016) e Roy et al. (2018) estabelecem que o óxido de grafeno atua como catalisador na hidratação do cimento, sem alterar as variações nos grupos funcionais oxigenados conectados às nano folhas de óxido de grafeno. Por sua vez, Zaid et al. (2022) afirmam que as adições de óxido de grafeno fortalecem os compósitos de concreto em nível nano, resultando em uma melhoria na resistência à compressão em comparação com a amostra de referência.

Portanto, os resultados indicam que o óxido de grafeno pode ter sido responsável pela aceleração do ganho de resistência da pasta de cimento e, conseqüentemente, contribuição para o incremento na resistência do concreto. Isso é particularmente relevante, considerando que para parâmetros de

estruturas, normalmente se trabalha com resistências nas idades de 28 dias.

Figura 16 - Gráficos adimensionalizados para resistências dos Concretos C30 (gráfico a) e C35 (gráfico b). Fontes: Autor.



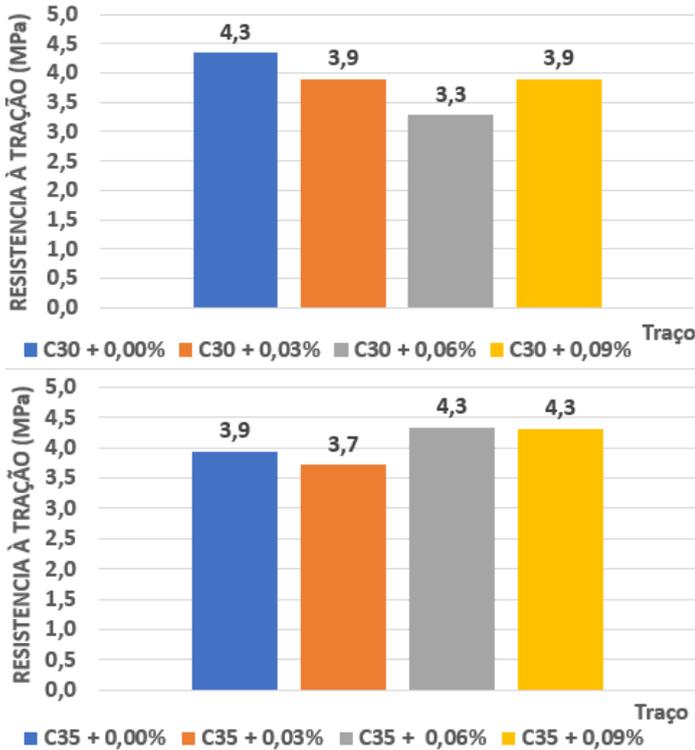
### 3.3.2. Resistência à Tração

Os resultados apresentados na Figura 17 representam os valores médios encontrados para a resistência à tração. Ao analisar o gráfico do traço C30, pode-se concluir que a adição de óxido de grafeno não resultou em um ganho de resistência, uma vez que todos os valores ficaram abaixo da amostra de controle. Para o traço C35, as adições de 0,06% e 0,09% apresentaram o mesmo resultado, um ganho de aproximadamente 0,4 MPa, enquanto a amostra com adição de 0,03% ficou abaixo do valor da amostra de controle. No entanto, as amostras apresentaram grandes coeficientes de variação, com uma média de 13,2% das amostras, variando de 5,8% a 23,4%. Não sendo possível concluir se a presença do óxido de grafeno

afetou positivamente ou negativamente a resistência à tração do corpo de prova.

É importante ressaltar que a resistência à tração é um parâmetro de avaliação complexo e pode ser influenciado por vários fatores, incluindo a homogeneidade da mistura, a distribuição das adições, relação água cimento e a interação entre os componentes do concreto, como os agregados graúdos. Portanto, é necessário realizar mais estudos e ensaios para obter uma compreensão completa dos efeitos do óxido de grafeno na resistência à tração do concreto.

Figura 17 - Resistência à tração do concreto C30 (gráfico a) e C35 (gráfico b). Fonte: Autor.



### 3.3.3. Velocidade de pulso e Módulo de elasticidade

Os parâmetros obtidos e os dados calculados para os ensaios de pulso ultrassônico (UVP) e módulo de elasticidade estático são apresentados na Tabela 3, representados por valores médios. É importante observar que são apresentados dois resultados para o módulo de elasticidade estático, devido ao fato de esse parâmetro ser obtido nos dois ensaios. Os dados obtidos empiricamente pelo método UVP mostraram valores ligeiramente maiores em quase todos os dados em comparação com os dados obtidos pelo método mecânico.

É possível notar que, em sua maioria, os dados mostram uma tendência de aumento com o aumento da dosagem de grafeno. Para uma análise mais conclusiva do comportamento, foram realizadas as correlações a seguir.

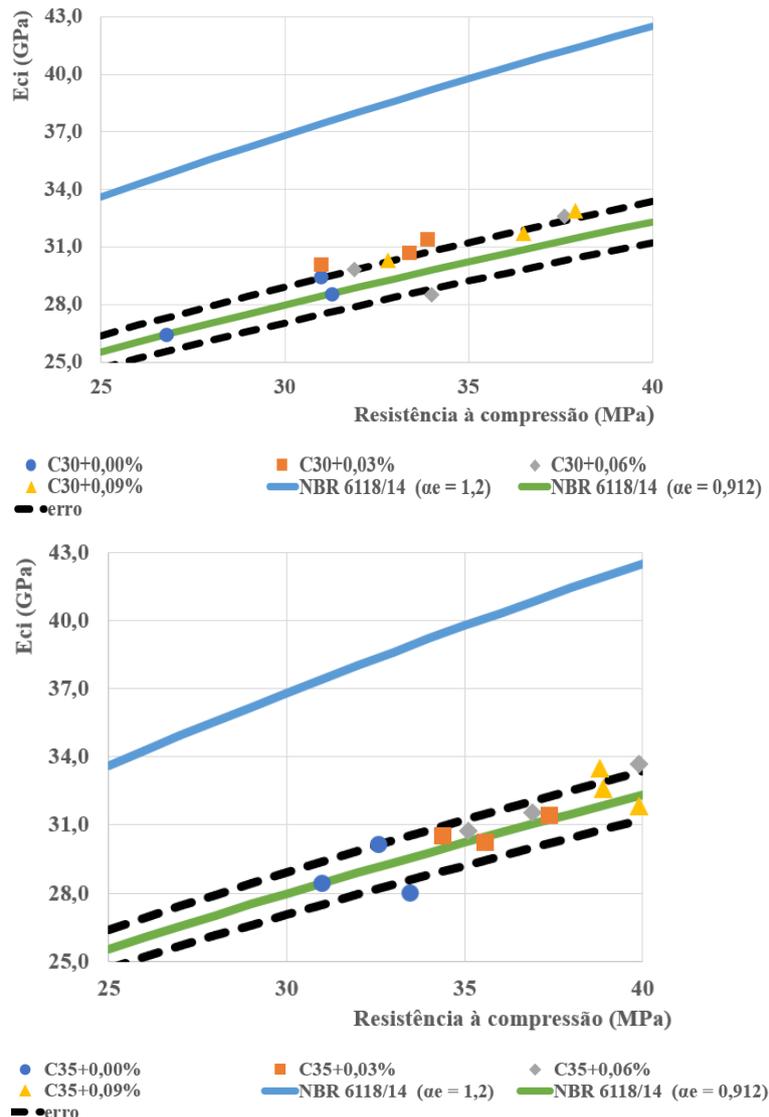
Tabela 3 - Resultados médios do módulo de elasticidade estático, dinâmico e velocidade de pulso. Fonte: Autor.

Id do traço	Módulo de elasticidade estático (mecânico) (GPa)	Velocidade de Pulso (km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade estático (UVP) (GPa)
C30 + 0,00%	28,0	4,23	38,7	29,7
C30 + 0,03%	30,6	4,19	38,9	29,4
C30 + 0,06%	30,3	4,29	40,8	31,2
C30 + 0,09%	31,5	4,39	42,6	33,2
C35 + 0,00%	28,8	4,25	39,1	30,1
C35 + 0,03%	30,7	4,27	40,0	30,6
C35 + 0,06%	31,9	4,34	41,9	32,3
C35 + 0,09%	32,6	4,32	41,6	32,0

### 3.3.4. Correlação entre Resistência à compressão e módulo de elasticidade estático

Na Figura 18, apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estática, obtidos por meio de ensaios mecânicos. Os dados foram representados em forma de gráficos e comparados com a Equação 7 da NBR 6118:2014.

Figura 18 - Módulo de elasticidade estático por resistência a compressão para os Concretos C30 (gráfico a) e C35 (gráfico b). Fontes: Autor.



O valor de  $\alpha_e$  sugerido por Bossoni e Cheung (2016) demonstrou ser mais adequado para representar as propriedades dos materiais utilizados no concreto neste estudo. Portanto, o erro padrão calculado a partir do desvio padrão médio dos resultados com base na Equação 7 da norma para esse  $\alpha_e$  adaptado.

Analisando os gráficos com os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático, pode-se concluir que os valores para ambos os traços se mostraram

próximos ao modelo da NBR 6118 adaptado. Sendo que em sua grande maioria os resultados estão dentro ou bastantes próximos da margem de erro.

A qualidade de dados individuais fora obtida pelos Coeficientes de Pearson (R) e de variação ( $R^2$ ), sendo os valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes de Pearson (R) e de variação ( $R^2$ ) para os dados. Fonte: Autor.

Id do traço	R- quadrado	R- múltiplo
C30 + 0,00%	0,8795	0,9372
C30 + 0,03%	0,8201	0,9072
C30 + 0,06%	0,5883	0,7724
C30 + 0,09%	0,9535	0,9780
C35 + 0,00%	0,0002	-0,0229
C35 + 0,03%	0,6460	0,8079
C35 + 0,06%	0,9879	0,9944
C35 + 0,09%	0,9729	-0,8892

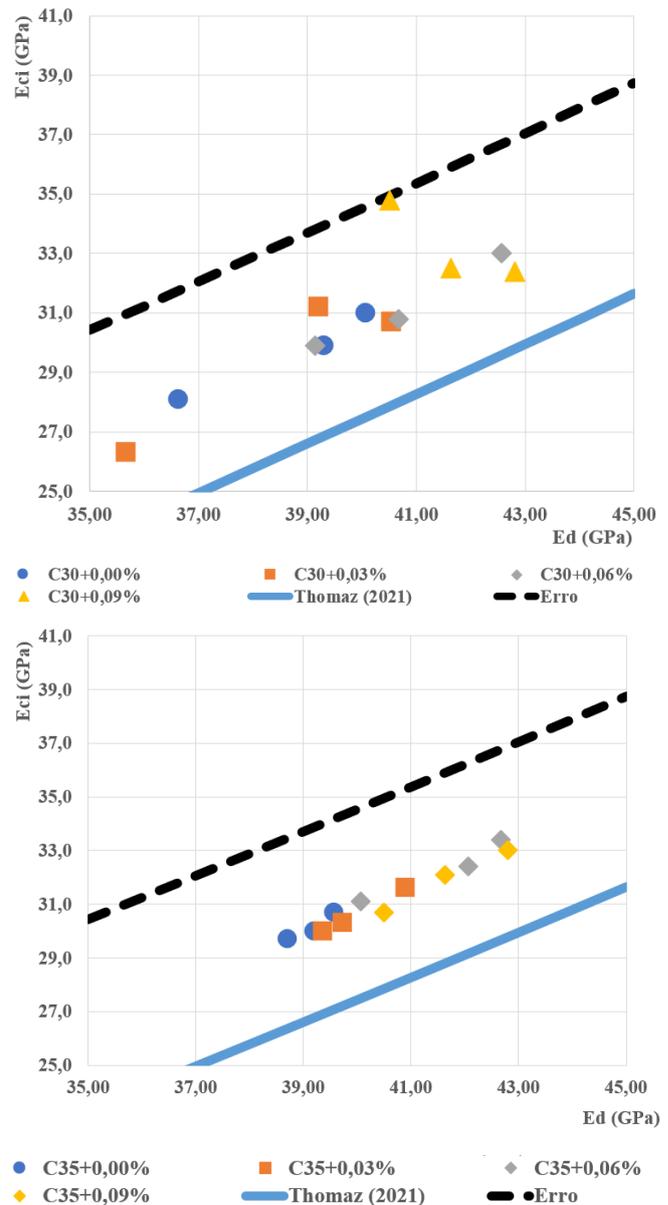
Ao analisar os coeficientes de variação e de Pearson dos dados gerados pelo software Excel, foi observado que as amostras C30+0,06%, C35+0,00% e C35+0,03% apresentaram valores significativamente abaixo do esperado. Em particular, o traço C35+0,00% apresentou valores próximos a zero para ambos coeficientes, indicando uma baixa correlação e um modelo pouco representativo, enquanto o traço C35+0,09% mostrou uma boa correlação, mas com um coeficiente de Pearson negativo.

Esses resultados podem ser atribuídos à natureza experimental dos dados, que estão sujeitos a variações e, portanto, podem apresentar valores de coeficiente mais baixos, indicando uma menor qualidade dos ajustes dos modelos e correlação entre os dados. No entanto, é importante ressaltar que, apesar desses resultados menos favoráveis, os demais dados e modelos apresentaram resultados satisfatórios, com valores bastante próximos aos esperados.

### 3.3.5. Correlação entre módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico foram correlacionados com os valores do módulo de elasticidade estático, como ilustrado no gráfico da Figura 19. Os dados experimentais utilizados nessa análise foram obtidos exclusivamente por meio do ensaio UVP. Essa escolha foi feita para evitar erros operacionais e de calibração que podem surgir ao comparar métodos de medição diferentes. O erro calculado para a curva da Equação 8 foi adotado com base no valor encontrado pelos autores da equação.

Figura 19 – Gráficos de módulo de elasticidade estático por módulo de elasticidade dinâmico, sendo gráfico (a) para o concreto C30 e gráfico (b) para concreto C35. Fonte: Autor



Através da equação, é possível observar que os dados experimentais apresentaram valores superiores aos estabelecidos pelo modelo proposto por Thomaz (2021). No entanto, é importante considerar que, apesar dessa diferença perceptível entre o modelo e os dados coletados neste experimento com adições de grafeno, pode-se argumentar que os dados estão dentro da margem de erro estabelecida pelo autor do modelo.

Além disso, é importante destacar que outros fatores podem influenciar a precisão dessa equação, como a densidade do agregado e a proporção de agregados graúdos no traço, conforme mencionado no estudo de Thomaz, Miyaji e Possan (2021). Foi observado que o traço C30 apresentou resultados mais dispersos em

comparação com ao outro traço. No entanto, ambos seguiram o mesmo padrão, onde o aumento dos valores de módulo de elasticidade estático resultou em um correspondente aumento do módulo de elasticidade dinâmico.

A análise da qualidade de dados individuais fora realizada pelos Coeficientes de Pearson (R) e de variação (R<sup>2</sup>), sendo os valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficientes de Pearson (R) e de variação (R<sup>2</sup>) para os dados. Fonte: Autor.

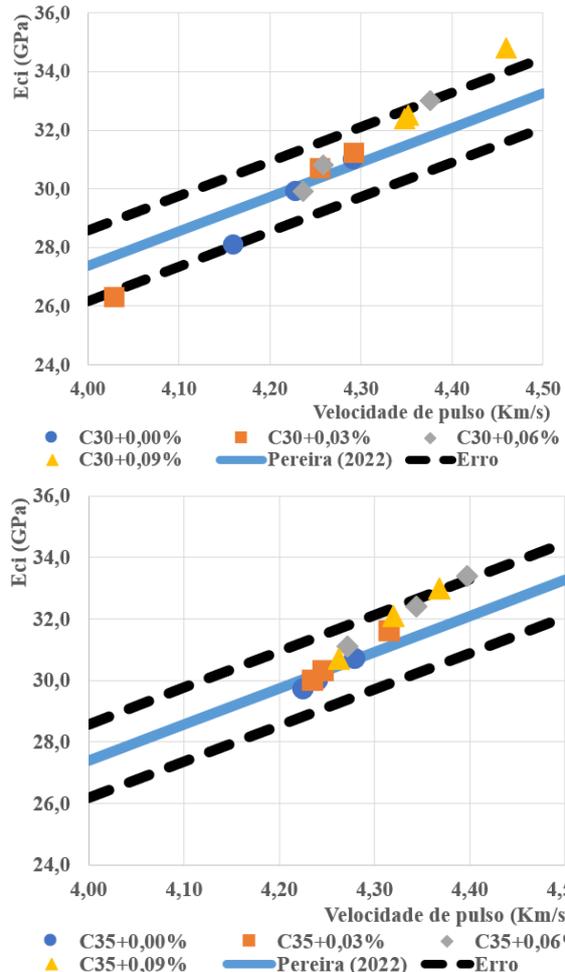
Id do traço	R- quadrado	R- multiplo
C30 + 0,00%	0,9712	0,9850
C30 + 0,03%	0,8721	0,9350
C30 + 0,06%	0,9701	0,9850
C30 + 0,09%	0,7893	0,8800
C35 + 0,00%	0,9045	0,9510
C35 + 0,03%	0,9973	0,9990
C35 + 0,06%	0,9498	0,9750
C35 + 0,09%	0,9817	0,9910

As regressões não lineares aplicadas juntamente com os coeficientes de variação (R<sup>2</sup>) e a correlação de Pearson (R) das amostras individualmente apresentaram valores próximos a um (1). Esses resultados indicam alta qualidade dos dados e bom ajuste dos modelos de dados experimentais. Isso corrobora a afirmação de que os dados experimentais estão dentro da margem de erro observada neste estudo.

**3.3.6. Correlação entre módulo de elasticidade estático e Velocidade de pulso ultrassônico (UVP)**

Os dados de módulo de elasticidade estático e velocidade de pulso ultrassônico foram correlacionados no gráfico representado na Figura 20. O erro calculado para a curva da Equação 9 foi adotado com base no valor encontrado pelos autores.

Figura 20 - Gráficos de módulo de elasticidade estático por velocidade de pulso, sendo gráfico (a) para o concreto C30 e gráfico (b) para concreto C35. Fonte: Autor



Ao analisar as curvas geradas, observa-se que o traço C30 apresenta uma maior dispersão de dados em comparação com o traço C35, como também foi evidenciado no gráfico de módulo de elasticidade estático em relação ao módulo de elasticidade dinâmico. No entanto, os resultados indicam que os ensaios seguem a tendência de crescimento do modelo proposto por Pereira e Formagini (2022) com a maioria dos dados experimentais inseridos dentro da margem de erro dos autores.

Tabela 6 - Coeficientes de Pearson (R) e de variação (R<sup>2</sup>) para os dados. Fonte: Autor.

Id do traço	R- quadrado	R- multiplo
C30 + 0,00%	0,9855	0,9927
C30 + 0,03%	0,9987	0,9993
C30 + 0,06%	0,9810	0,9905
C30 + 0,09%	0,9999	1,0000
C35 + 0,00%	0,9990	0,9995
C35 + 0,03%	0,9979	0,9989
C35 + 0,06%	0,9999	0,9999
C35 + 0,09%	0,9949	0,9974

Os coeficientes de correlação de Pearson (R) e de variação (R<sup>2</sup>) das correlações das amostras individualmente, apresentaram valores bastante próximos de um (1). Esses resultados indicam uma alta qualidade dos dados e margem alta de confiança nos modelos e de correlação de dados experimentais.

Portanto, os resultados experimentais indicam que a utilização do óxido de grafeno pode ter influenciado o leve aumento dos módulos de elasticidade estático e dinâmico e velocidade de pulso ultrassônico (UVP). No entanto, essa influência provavelmente está relacionada ao aumento da resistência à compressão e, conseqüentemente, ao aumento do módulo de elasticidade estático. Essa conclusão é respaldada pelo fato de que os valores experimentais seguiram os modelos de comportamento propostos pela norma NBR 6118:2014 e pelas equações de Thomas, Miyaji e Possan (2021) e Pereira e Formagini (2022).

#### 4. CONCLUSÃO

Neste estudo, foram investigados os diferentes efeitos das adições de óxido de grafeno e suas influências nas propriedades para materiais disponíveis em Campo Grande (MS) para diferentes traços de concreto. Para isso, foram realizadas adições de óxido de grafeno em quatro dosagens de: 0,00%, 0,03%, 0,06% e 0,09%. Sendo realizados os ensaios: de abatimento, ensaios de absorção de água, ensaios de compressão diametral e axial e ensaios de módulo de elasticidade pelas técnicas UVP e mecânicas.

Constatou-se que as adições de óxido de grafeno alteraram as propriedades do concreto em seu estado fresco. O abatimento das amostras demonstrou a tendência de perda de trabalhabilidade, exceto para as amostras com 0,06% de adição de óxido de grafeno, que apresentaram resultados diferentes do esperado. Além disso, foi notado um enrijecimento rápido da pasta de cimento nas amostras com adições de óxido de grafeno em comparação com as amostras sem adição. Portanto, é necessário realizar mais estudos para compreender melhor a influência do óxido de grafeno na trabalhabilidade do concreto.

Também se observou que a presença do óxido de grafeno afetou a absorção de água, reduzindo gradualmente a capacidade de absorção nos corpos de prova. Os valores máximos de redução de absorção foram observados para adições de 0,09% ao peso de cimento, com percentuais de 0,76% para o concreto C30 e 0,64% para o C35. Além disso, foi observada a formação de vários pontos de precipitação de carbonato de cálcio devido à provável presença do óxido de grafeno, sendo recomendado o estudo desse efeito em trabalhos futuros.

A adição de óxido de grafeno de 0,00% a 0,09% ao concreto resultou em um aumento proporcional a adição para as resistências à compressão até 28 dias. Os maiores ganhos de resistência foram obtidos com as dosagens de 0,09% de adição, com um aumento percentual de 12,85% para o concreto C30 e 13,64% para o C35. Esse aumento pode ser atribuído à capacidade do grafeno de atuar como catalisador na hidratação dos materiais cimentícios, conforme evidenciado por estudos anteriores. No entanto, aos 63 dias de idade, as resistências se estabilizaram em valores próximos. Em relação à resistência à tração, os dados são inconclusivos e requerem estudos adicionais para uma melhor compreensão dessa propriedade.

Os módulos de elasticidade estático, dinâmico e velocidade de pulso também sofreram influência da adição de óxido de grafeno, mostrando, em geral, um comportamento de crescimento com o aumento das adições neste estudo. No entanto, é provável que esse aumento esteja relacionado ao aumento da resistência à compressão aos 28 dias, pois os módulos seguiram comportamentos semelhantes às equações de modelos sugeridos pela norma e estudos relacionados.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha irmã pelo incentivo e apoio para concluir esse curso. Ao meu professor orientador que me auxiliou para realização desse estudo. Aos técnicos do LMCC que auxiliaram na produção dos concretos e realização dos ensaios. Ao laboratório Mecfor engenharia pelo apoio na realização dos ensaios de módulo de elasticidade e de UVP. Ao curso de engenharia civil e a UFMS que proporcionaram todo o conhecimento adquirido durante todos esses anos incríveis.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de**

- compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos.** Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 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.** Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 58: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 1996.
- BOSSONI, C.; CHEUNG, A. B. Análise da influência da variabilidade do módulo de elasticidade para o estudo de deformações em vigas de concreto armado. 2016. 12 f. **TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2016.**
- CABRAL, S. C.; AZEVEDO, M. A. de. Materiais alternativos para adição ao cimento Portland. **Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas, Minas Gerais, Ano v, n. 10, p. 1-12, out. 2016.**
- FILHO, D. B. F.; JÚNIOR, J. A. da S. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje, Vol. 18, n. 1, 2009.**
- HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle Tecnológico.** Brasília: Pini, 1992. 330 p
- LIN, C.; WEI, W.; HU, Y. H. Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process. **Journal Of Physics And Chemistry Of Solids, v. 89, p. 128-133, fev. 2016.** <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpccs.2015.11.002>.
- PEREIRA, S. L. D.; FORMAGINI, S. Correlação experimental da velocidade de pulso ultrassônico com resistência à compressão, módulos estáticos e dinâmicos do concreto de cimento portland. 2022. 15 f. **TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2022.**
- ROCHA, V. V.; HORTA, R. A. dos S.; PAULA, J. N. de; LUDVIG, P. Revisão teórica sobre o potencial da adição do óxido de grafeno em materiais cimentícios. **Matéria (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 26, n. 3, 2021.** <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13002>
- ROMANO, R. C. de O.; CARDOSO, F. A.; PILLEGGI, R. G. Propriedades do concreto no estado fresco. ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011, 1v, p. 453-500.
- ROY, R.; MITRA, A.; GANESH, A. T.; SAIRAM, V. Effect of Graphene Oxide Nanosheets dispersion in cement mortar composites incorporating Metakaolin and Silica Fume. **Construction And Building Materials, v. 186, p. 514-524, out. 2018.** <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.135>.
- SANTOS, J. A. V. dos. **CONCRETOS COM AGREGADO GRAÚDO A PARTIR DOS RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA.** 2015. 113 f. **Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.**
- THOMAZ, W. de A.; MIYAJI, D. Y.; POSSAN, E. Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates. **Case Studies In Construction Materials, v. 15, dez. 2021.** <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00645>
- WU, Y.; QUE, L.; CUI, Z.; LAMBERT, P. Physical Properties of Concrete Containing Graphene Oxide Nanosheets. **Materials, v. 12, n. 10, p. 1707, mai. 2019.** <http://dx.doi.org/10.3390/ma12101707>
- ZAID, O.; HASHMI, S. R. Z.; ASLAM, F.; ABEDIN, Z. U.; ULLAH, A. Experimental study on the properties improvement of hybrid graphene oxide fiber-reinforced composite concrete. **Diamond And Related Materials, v. 124, p. 108883, abr. 2022.** <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2022.108883>