

INCORPORAÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO NO CONCRETO: UMA VISÃO SUSTENTÁVEL

Jesus Afonso dos santos (IC) e Fabiola Rago Beltrame (Orientador)

Apoio: PIVIC Mackenzie

RESUMO

Neste projeto foi analisada a influência do óxido de grafeno (GO extraído a partir da haste de pilha descartável) nas propriedades mecânicas do concreto, considerando as propriedades físicas e químicas do óxido de grafeno (GO) destacados na literatura. Utilizou-se um traço de concreto de alto desempenho sem brita, composto por cimento CPV-ARI, areia fina, Microsílica, aditivo superplastificante e o óxido de grafeno. A coleta das pilhas para a extração do grafite foi feita no setor de Reciclagem e Depósito de Resíduos da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Levando em conta os diversos impactos socioambientais gerados pela falta de conscientização da população sobre o descarte inadequado de pilhas, é essencial desenvolver métodos de reciclagem desses resíduos sólidos, de forma que os componentes dos sistemas eletroquímicos possam ser reaproveitados. O óxido de grafeno a base de grafite de pilha foi sintetizado no laboratório de Nanomateriais Híbridos Multifuncionais (LABNAHM) da Universidade Presbiteriana Mackenzie, pelo método de Hummers modificado. O óxido de grafeno foi adicionado em dosagens variadas (0,01%, 0,03% e 0,05%) ao traço de alto desempenho, sendo disperso na água do traço, e a melhoria das propriedades físicas e químicas desse material foram observadas em duas idades diferentes (7 e 28 dias). O óxido de grafeno (GO) passou por dois processos de tratamento distinto (4 horas e 4 dias). Notou-se que a adição do óxido de grafeno no traço de concreto de alto desempenho provoca resultados favoráveis, principalmente na resistência à compressão.

Palavras-chave: Óxido de Grafeno, Grafite de Pilha, Concreto de Alto Desempenho.

ABSTRACT

This project analyzed the influence of graphene oxide (GO extracted from the stem of disposable battery) on the mechanical properties of concrete, considering the physical and chemical properties of graphene oxide (GO) highlighted in the literature. A high-performance concrete mix without gravel was used, composed of CPV-ARI cement, fine sand, microsilica, superplasticizer additive and graphene oxide. The batteries were collected for graphite extraction in the Recycling and Waste Deposit sector of Universidade Presbiteriana Mackenzie. Taking into account the various socio-environmental impacts generated by the lack of awareness of the population about the improper disposal of batteries, it is essential to develop methods for recycling these solid wastes, so that the components of the electrochemical systems can be reused. Graphene oxide based on cell graphite was synthesized in the Multifunctional Hybrid Nanomaterials laboratory at Mackenzie Presbyterian University (LABNAHM), using the modified Hummers method. Graphene oxide was added in varying dosages (0.01%, 0.03% and 0.05%) to the high-performance mix, being dispersed in the mix water, and the improvement of the physical and chemical properties of this material was observed at two different ages (7 and 28 days). Graphene oxide (GO) underwent two distinct treatment processes (4 hours and 4 days). It was noted that the addition of graphene oxide to the high-performance concrete mix causes favorable results, mainly in compressive strength.

Keywords: Graphene Oxide, Stack Graphite, High Performance Concrete.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades nas economias em desenvolvimento da Ásia, África e América Latina aumenta a demanda por concreto para abrigar e atender suas populações crescentes a cada ano. Desde 1950, o número de pessoas vivendo em áreas urbanas quadruplicou, chegando a 4,2 bilhões, e estima-se que mais 2,5 bilhões se unirão a elas nas próximas três décadas. O principal componente do concreto em volume são os agregados, como areia e rochas, sendo a areia o material mais extraído no mundo. No entanto, a taxa de extração de areia atualmente supera sua taxa de reposição natural, o que torna extremamente provável uma escassez global de areia adequada para a produção de concreto (PAUL A. ADVÍNCULA, et. Al, 2023).

De forma simples, o concreto é composto por argamassa e agregados graúdos; a argamassa é formada por pasta e agregado miúdo; e a pasta é feita de cimento e água. O cimento é o material que endurece as peças de argamassa ou concreto. Esse aglomerante, composto principalmente de silicatos e aluminatos, reage quimicamente para formar um corpo rígido. O concreto tem muitas aplicações, mas sua principal utilização é na construção civil. A população mundial consome cerca de 11 bilhões de toneladas de concreto por ano, sendo superado apenas pelo consumo de água. É o material de construção mais utilizado no mundo, devido à abundância e facilidade de obtenção de suas matérias-primas, além de permitir a construção de estruturas eficientes e resistentes. No entanto, o concreto não está isento de defeitos (MOREIRA, 2018).

Atualmente, barras de aço são utilizadas nas peças de concreto para suportar tensões de tração. Assim, as técnicas e tecnologias da construção civil estão passando por adaptações inevitáveis, e as propriedades do concreto têm evoluído ao longo do tempo. Por exemplo, a resistência à compressão do concreto passou de 16 MPa em 1964 para 25 MPa em 1990, 45 MPa em 2000 e 125 MPa em 2002. Com o foco na otimização financeira e logística, o concreto armado começa a não atender bem às exigências para o dimensionamento de vigas e pilares. À medida que os edifícios se tornam mais altos e os vãos maiores, concretos com resistências de 15 MPa, 20 MPa e 25 MPa já não satisfazem as necessidades de engenheiros e arquitetos. Por isso, começa a ser utilizada uma nova categoria de concreto, o CAD (Concreto de Alto Desempenho), que facilmente atinge resistências à compressão superiores a 80 MPa (MOREIRA, 2018).

Por isso, para tornar as construções futuras, os métodos construtivos e o dimensionamento cada vez mais eficientes, é essencial que o concreto também evolua. Isso

inclui aumentar sua durabilidade, resistência à compressão e tração, e trabalhabilidade, além de reduzir sua porosidade, relação água/cimento e calor de hidratação. A adição de óxido de grafeno (GO) nas misturas de concreto é uma tentativa válida de melhorar suas propriedades, adequando-o às necessidades da construção civil. O GO (óxido de grafeno) pode complementar o empacotamento, ajudando a preencher os vazios entre as partículas com partículas cada vez menores nas misturas de concreto sugeridas. Além disso, o GO atua eletronicamente no arranjo e formação dos cristais de C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado). (MOREIRA, 2018).

Portanto, um foco específico é então dado às aplicações inteligentes e de durabilidade do GO (óxido de grafeno) para o concreto da próxima geração.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Grafeno

Sendo um dos elementos mais antigo conhecido pela humanidade, o carbono – elemento da tabela periódica dos elementos, de símbolo C, possui número atômico igual a 6 (que representam dois elétrons na camada interna e quatro na camada externa, de configuração eletrônica $1s^2$, $2s^2$ e $2p^2$) – destaca-se pelas suas peculiaridades e a diversidade de materiais, apresentando: as propriedades e as estruturas únicas que se estendem desde ligações químicas entre carbonos a nanoestruturas; diferentes formas alotrópicas (grafite, nanotubo, fulereno, grafeno e diamante); e uma ampla gama de aplicações como no armazenamento de energia, componentes eletrônicos, sensores, entre outros (Tiba, 2023).

Entre as diferentes formas alotrópicas do carbono, o grafeno se destaca por ser a estrutura básica das muitas outras formas alotrópicas do carbono como o grafite, o fulereno e o nanotubo de carbono, na qual lhe confere propriedades novas e distintas devido a uma das suas dimensões confinadas, resultando no nanomaterial 2D (nanomaterial 2D – sem altura, ou seja, duas dimensões não refinada e uma confinada). (Tiba, 2023)

O grafeno é um material bidimensional (2D), de estrutura estável devido à forte ligação covalente planar. É constituído por uma monocamada de átomos de carbono de espessura aproximada de 0,35 nm, com ligações em sp^2 e distância de 0,142 nm, em que se encontram arranjados em anéis de benzenos (hexágonos) de forma análoga a estrutura da colmeia. O átomo de carbono na estrutura do grafeno realiza três ligações químicas com os outros átomos da estrutura planar, o que deixa um elétron livre (também denominados de elétrons π para a condução elétrica na terceira dimensão. Esses elétrons, localizados acima ou abaixo (perpendicular ao plano) da camada de grafeno, possuem uma alta mobilidade e seus orbitais

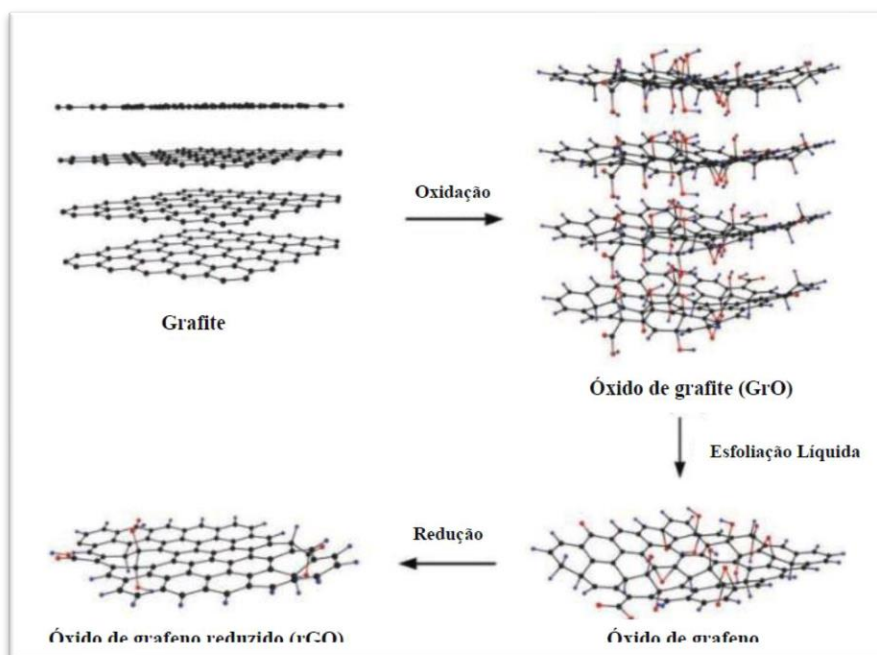
π se sobrepõem de forma a melhorar algumas de suas propriedades, como as elétricas e óticas (Tiba, 2023).

Para obtenção dos derivados do grafeno, parte-se do grafite como precursor, uma vez que o material é composto por várias camadas de grafeno. O grafite então precisa ser oxidado para que ocorra o aumento da distância entre os planos, e consequentemente, o enfraquecimento das ligações de van der Waals, assim obtém-se o Gr-O (Tiba, 2023).

Com as ligações enfraquecidas o Gr-O é submetido a uma esfoliação com uso de ultrassom obtendo-se assim o GO. Por fim a grande quantidade de agrupamentos oxigenados na superfície do material podem ser removidos por meio de uma redução obtendo por fim o rGO (Tiba, 2023).

Portanto, resumidamente, a síntese de derivados de grafeno está baseada em 3 principais partes: oxidação, esfoliação e redução. De modo geral, a parte de esfoliação baseia-se em uma forte agitação mecânica que esfolia as camadas de Gr-O. A redução pode ser feita de várias maneiras, seja por via química, térmica, micro-ondas, fotocatalise, solvotermal ou hidrotérmica (Tiba, 2023).

Síntese de derivados de grafeno



Ciclo de obtenção do Gr-O, GO e rGO. Fonte: (Valim et al., 2021; Bai H et al., 2011).

2.2. Óxido de grafeno

Devido ao processo de oxidação presente em muitas das sínteses de grafeno, o material resultante tende a apresentar impurezas, defeitos, buracos, dobra, desorganizações estruturais, entre outras irregularidades, que afetam as propriedades intrínsecas do grafeno,

mas que proporcionam outros atributos em diversas aplicações. Dentre esses materiais, o mais comum é o composto denominado de óxido de grafeno (GO) que compõe todos os derivados do grafeno ricos em grupos funcionais oxigenados – hidroxila, grupos epóxidos no plano basal, grupos carboxílicos, cetonas e aldeídos nas suas extremidades – ou seja, um material com uma estrutura composta basicamente de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O). (Tiba, 2023).

Dependendo de sua aplicação, o óxido de grafeno ainda pode ser processado utilizando redutores químicos ou físicos, de forma a reduzir e/ou eliminar a presença de grupos oxigenados na estrutura.

Este material atrai bastante atenção devido às suas propriedades e aplicabilidades. São vários os métodos de produzir grafeno, ou derivados de grafeno, como óxido de grafite (Gr-O), óxido de grafeno (GO) e óxido de grafeno reduzido (rGO), que são sintetizados, por exemplo, pelo método de Hummers modificado (Tiba, 2023).

O óxido de grafeno é geralmente produzido como um intermediário na fabricação de grafeno, um nanomaterial que tem ampla aplicabilidade em várias áreas da ciência e engenharia. A presença de átomos de oxigênio no óxido de grafeno dá ao material um caráter polar, diferentemente do grafeno reduzido (DREYER, PARK, et.al., 2010). A polaridade do óxido de grafeno permite sua dispersão em solventes polares, como a água. Esta característica é conhecida como hidrofilicidade.

Além disso, o GO possui notáveis propriedades mecânicas: um módulo de elasticidade entre 23 e 42 GPa, resistência à tração de 130 MPa e área superficial variando entre 700 e 1500 m²/g (CHUAH, PAN, et al., 2014). É um material muitas vezes mais resistente do que o concreto ou o aço, com fácil dispersão em água e uma área superficial extremamente alta. Essas características conferem ao óxido de grafeno um grande potencial para a formação de compósitos na construção civil, utilizados para reforços estruturais (MOREIRA, 2018).

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido, por meio de pesquisa experimental, com o objetivo de se analisar as propriedades físicas e mecânicas de um traço de concreto produzido com óxido de grafeno (GO) extraído da haste de grafite de pilhas descartáveis.

3.1. Síntese de Gr-O e GO pelo método de Hummers modificado

O óxido de grafeno (GO) foi sintetizado no laboratório de Nanomateriais Híbridos Multifuncionais da Universidade Presbiteriana Mackenzie. O óxido de grafeno utilizado nesse trabalho foi extraído da haste de grafite de pilha de tamanho AA.

Para realizar a análise dos metais em pilhas alcalinas e comuns, primeiramente foi necessário coletar amostras de pilhas de marcas diferentes para, em seguida, abri-las, utilizando um alicate, para retirar o conteúdo de dentro de cada uma. Inicialmente, mais de 5 marcas de pilhas foram abertas, mas apenas 1 marca de pilhas foi realmente utilizada.

A marca da pilha utilizada será denominada como A, classificada como uma pilha Comum, ou seja, as que possuem dois eletrodos (por exemplo, zinco e grafite) e uma pasta eletrolítica. Esta marca de pilha contém uma haste de grafite, o objeto de nosso estudo, de fácil remoção, lavagem e de fácil tratamento. As demais marcas abertas não foram utilizadas por possuírem pastas que continham carbono, com tratamento aparentemente mais difícil.

Após o processo de abertura e retirada do conteúdo das pilhas, a haste de grafite foi extraída cuidadosamente, a partir do desmonte de pilhas comuns (primárias) usadas do tipo AA (1,5 V) de zinco-carbono. As hastes retiradas foram separadas e limpas de forma a retirar o excesso da pasta eletrolítica, removendo-se assim, os resíduos de produtos químicos restantes.

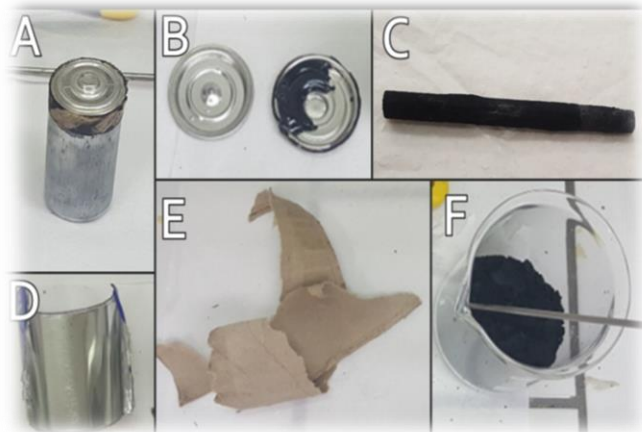
Para este procedimento, foi utilizado o ácido nítrico. O ácido nítrico é comumente utilizado para lavar hastes de grafite extraídas em pilhas devido às suas propriedades de dissolução e limpeza eficazes; existem algumas razões pelas quais o ácido nítrico é preferido nesse processo, pois, o ácido nítrico age rapidamente e pode ser usado em concentrações variadas para se adequar às necessidades específicas do processo de limpeza, isso permite uma limpeza rápida e eficiente das hastes de grafite, aumentando a produtividade e a eficácia do processo. Depois do processo de limpeza, todo o material foi pesado em uma balança analítica.

Em seguida, todas as hastes de grafite extraídas de uma marca das pilhas foram levadas para uma estufa, de maneira a retirar a umidade presente nas amostras e, quando o processo foi finalizado, novamente esse conteúdo das pilhas foi pesado na balança para saber o quanto de massa havia sido perdida no processo de secagem.

Exemplo de como é o desmonte de uma pilha comum (Primária) para a extração da haste de grafite.

Figura 1 - Componentes de uma pilha desmontada.

Componentes de uma pilha desmontada. **(A)** Pilha, **(B)** tampas, **(C)** grafite, **(D)** folha de zinco, **(E)** papel poroso e **(F)** pasta eletrolítica.



Fonte: Mak Yu, 2022.

O processo de síntese do óxido de grafite (Gr-O) e do óxido de grafeno (GO) foi feito da seguinte forma:

Inicialmente, foi colocado no processo, 1 grama de grafite em pó, combinada com 60 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) em um balão de fundo redondo de 500 mL. Essa mistura foi resfriada em banho de gelo, com uma temperatura mantida abaixo de 10 °C, e agitada continuamente por 15 minutos.

Em seguida, adicionou-se lentamente 3,5 gramas de Permanganato de Potássio (KMnO_4) na solução ao longo de 15 minutos. Após a completa adição de Permanganato de Potássio (KMnO_4), uma nova solução foi deixada em repouso durante 4 horas, sem mais a necessidade do banho de gelo, mas ainda com agitação constante.

Terminado a etapa de repouso, isto é, após o período de 4 horas de repouso, a solução foi diluída com 200 mL de água destilada e o excesso de oxidante (Mn_2O_7) foi neutralizado com a adição de 10 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Depois desse processo, a solução foi deixada em repouso novamente por mais 24 horas.

Após o período de repouso, a solução foi colocada para um funil de Büchner com filtro de papel quantitativo, montado sobre um kitassato e conectado a uma bomba de vácuo. O material foi lavado com 500 mL de água destilada, 250 mL de solução de ácido clorídrico (HCl) a 10%, 250 mL de etanol (EtOH) a 95% e mais 500 mL de água destilada para remover impurezas.

Por fim, o material resultante do óxido de grafite (Gr-O), foi então coletado e armazenado em um frasco Schott contendo etanol (EtOH) a 95%. Em seguida, porções desse

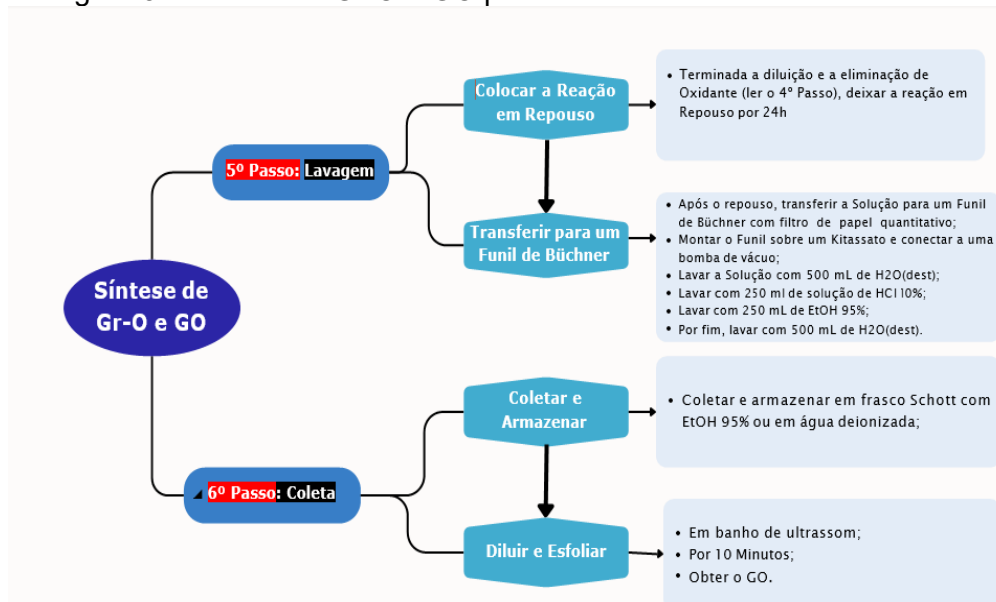
material foram diluídas e esfoliadas em um banho de ultrassom por aproximadamente 10 minutos para obter o óxido de grafeno (GO), um material de grande interesse desse estudo.

Figura 2 - Síntese de Gr-O e GO pelo método de Hummers modificado



Fonte: Pelo autor (2024)

Figura 3 - Síntese de Gr-O e GO pelo método de Hummers modificado



Fonte: Pelo autor (2024)

3.2. Preparação dos corpos de provas

Os corpos-de-prova foram moldados com concreto de alto desempenho sem brita preparados no Laboratório de materiais de construção da Universidade Presbiteriana Mackenzie, seguindo o traço em massa base 1:1,1:0,25:0,22:2%; sendo CP-V ARI, areia, sílica ativa (MS), relação água/cimento e aditivo superplastificante (MOREIRA, 2018).

Para homogeneização da massa do concreto no traço de referência (**Traço 1**), foi utilizada uma betoneira, e os componentes foram dispostos na ordem: agregados miúdos, cimento, microsílica, água, e por último, aditivo. O GO, na forma de solução aquosa, foi misturado à água incorporada nos traços 2 e 3, respectivamente.

Para os três traços no estado fresco foi avaliada a trabalhabilidade, por meio do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento (Fotografia 1), conforme a norma ABNT NBR 13276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Fotografia 1 – Ensaio de abatimento



Fonte: Pelo autor (2024)

Para a análise das propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido, foram moldados 12 corpos de prova com 05 cm de diâmetro e 10 cm de altura sem adição do GO, este serviu como traço de referência (**Traço 1**), 6 corpos-de-prova (Ø 5 x 10) cm aditivado com o óxido de grafeno com 4 horas de tratamento (**Traço 2 – GO 4H**), por fim, 6 corpos-de-prova (Ø 5 x 10) cm aditivado com óxido de grafeno com 4 dias de tratamento (**Traço 3 – GO 4D**). No total foram feitos três traços, sendo: 1 traço sem GO (**Traço 1**), 1 traço com adição de GO com o tratamento de 4 horas (**Traço 2 – 4H**) e, 1 traço com adição de GO com o tratamento de 4 dias (**Traço 3 – 4D**). Para isso, foi estudado um método de dosagem da massa de GO neste trabalho; o método de dosagem de GO em função da massa de cimento.

Tabela 1 – Composição e quantidade de material dos traços estudados

Material	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Cimento CPV ARI (g)	7000	800	800
Areia (g)	7700	880	880
Água (g)	1540	176	176
Microsílica (g)	1750	200	200
Aditivo	140	16	16
Óxido de Grafeno (%)	-	0,01%	0,01%
		0,03%	0,03%
		0,05%	0,05%

Fonte: Pelo autor (2024)

Para fins de cura, todos os corpos de prova permaneceram em câmara úmida, com umidade relativa de 95%, até as datas de ruptura. Foram ensaiados em 2 diferentes idades, sendo: 7 e 28 dias.

Foram realizados os seguintes ensaios: Resistência à compressão; Propagação de Ondas Ultrassônicas – PUNDIT; e Módulos de elasticidades Dinâmico e Estático – Sonoelastic.

Foram utilizados para o traço de referência (Traço 1), 6 corpos de prova para os ensaios de compressão, 6 corpos de prova para o ensaio de ultrassom e de módulo de elasticidade dinâmico e estático, em cada uma das idades. Para os traços 2 e 3, foram utilizados 6 corpos de prova (2 corpos de prova para cada ensaio).

Para a realização dos ensaios de compressão (Fotografia 2), os corpos de prova foram submetidos a um processo de retificação para nivelamento das bases, a fim de evitar rompimentos antecipados e erros na determinação da resistência.

A tensão máxima ($R_{m\acute{a}x}$), considerada para os rompimentos é dada pela Equação:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F}{A}$$

Em que:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Tensão de ruptura à compressão (Mpa);

F = Carga total de ruptura (KN);

A = Área de aplicação da carga (m²)

Fotografia 2 – Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Pelo autor (2024)

Fotografia 3 – Ensaio de ultrassonografia microscópica



Fonte: Pelo autor (2024)

Fotografia 4 – Ensaio de módulo de Elasticidade dinâmico e estático



Fonte: pelo autor (2024)

Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova de concreto, sem e com a adição do GO, além da discussão.

Com o objetivo de somar as propriedades mecânicas ao material de construção mais consumido no mundo, foram analisadas três tentativas de dosagem do óxido de grafeno (0,01%; 0,03% e 0,05%) com duas formas distintas de tratamento de GO. Tratamento de GO por 4 horas, denominada 4 H e tratamento de GO por 4 dias, denominada 4 D na tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da consistência do concreto
Consistências

<i>Traços do concreto</i>	Índice de consistência (mm)	T. de Rodagem (s)
<i>Traço 1 (Ref.)</i>	240	30
<i>Traço 2 (4 H - 0,01%)</i>	150	10
<i>Traço 2 (4 H - 0,03%)</i>	200	10
<i>Traço 2 (4 H - 0,05%)</i>	200	10
<i>Traço 3 (4 D - 0,01%)</i>	150	10
<i>Traço 3 (4 D - 0,03%)</i>	250	10
<i>Traço 3 (4 D - 0,05%)</i>	260	10

Fonte: Pelo autor (2024)

Os resultados mostrados para o índice de consistência foram obtidos na mesa de consistência utilizada pelas argamassas conforme a ABNT NBR 13276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Foram realizados ensaios para a determinação dos módulos de elasticidade por métodos não destrutivos conforme a ABNT NBR 8522 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021).

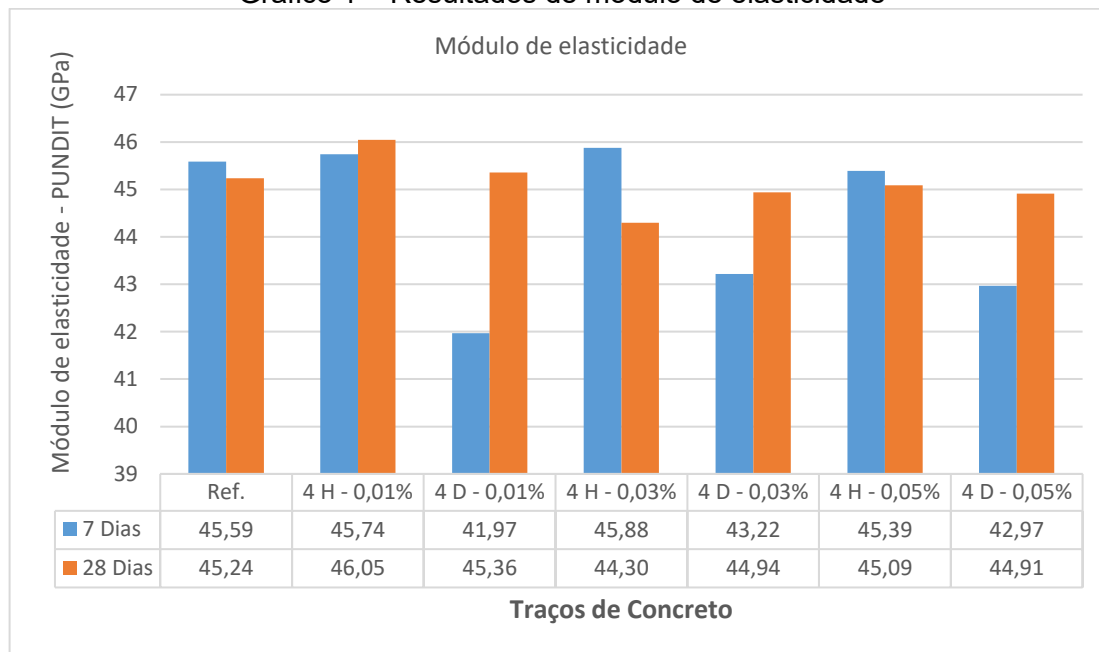
Tabela 3 – Propagação de Onda Ultrassônica
Módulo de Elasticidade (GPa)

<i>Traços do concreto</i>	Σ médias (GPa) 7 dias	Σ médias (GPa) 28 dias
<i>Traço 1 (Ref.)</i>	45,59	45,24
<i>Traço 2 (4 H - 0,01%)</i>	45,74	46,05
<i>Traço 2 (4 H - 0,03%)</i>	45,88	44,30
<i>Traço 2 (4 H - 0,05%)</i>	45,39	45,09
<i>Traço 3 (4 D - 0,01%)</i>	41,97	45,36
<i>Traço 3 (4 D - 0,03%)</i>	43,22	44,94
<i>Traço 3 (4 D - 0,05%)</i>	42,97	44,91

Fonte: Pelo autor (2024)

Uma visão do comportamento do módulo de elasticidade para todos os traços em função da idade pode ser observada no gráfico 1.

Gráfico 1 – Resultados de módulo de elasticidade



Fonte: Pelo autor (2024)

Os resultados da resistência à compressão média para os corpos de prova nas idades de 7 e 28 dias para todos os traços de concreto são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resistência média à compressão
Resistência à compressão (MPa)

Traços do concreto	Σ médias (MPa)	Σ médias (MPa)
	7 dias	28 dias
Traço 1 (Ref.)	42,41	80,92
Traço 2 (4 H - 0,01%)	88,65	51,98
Traço 2 (4 H - 0,03%)	67,81	67,40
Traço 2 (4 H - 0,05%)	54,03	77,18
Traço 3 (4 D - 0,01%)	70,62	51,98
Traço 3 (4 D - 0,03%)	52,38	49,57
Traço 3 (4 D - 0,05%)	51,07	70,60

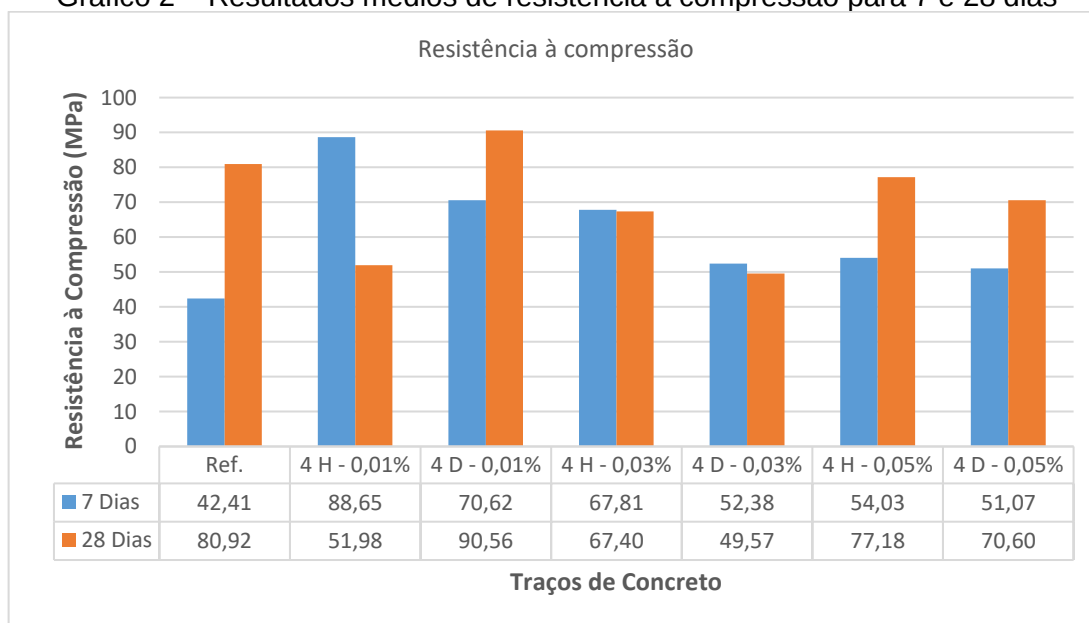
Fonte: Pelo autor (2024)

De acordo a norma ABNT NBR 8953 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), a resistência mínima do concreto para elemento estruturais deve ser de 20 MPa aos 28 dias. Como pode ser observado na tabela 4 para essa idade, o traço 1 (traço de referência) apresentou uma resistência à compressão superior em relação a resistência mínima estabelecida pela norma para a finalidade estrutural, cerca de 80,92 MPa (Classe C80), este valor está classificado no grupo II do concreto para fins estruturais definido pela

norma. O traço 2 (traço com GO), na idade de 28 dias, apresentou resultados superiores à resistência mínima estabelecida na norma para a finalidade estrutural com a dosagem de 0,03% e 0,05% de GO, ficando entre as classes C60 e C70 do grupo II; e com a dosagem de 0,01% de GO, diminuiu a resistência e ficou classificada no grupo I (Classe C50). O traço 3 (traço com GO) apresentou valores de resistência diferentes à apresentada no traço 2 aos 28 dias; com a dosagem de 0,01% e 0,03% de GO ficou na classe de resistência do grupo I (C50 e C45, respectivamente).

Analisando o comportamento das resistências dos traços com GO (traços 2 e 3) em todas as idades, destaca-se a queda de resistência, inesperadamente, aos 28 dias, em relação ao valor obtido no período de 7 dias. Uma provável explicação para este acontecimento seria a existência de vazios em quantidade superior ao pretendido, provavelmente da falha na preparação e execução da mistura durante a fase experimental, uma vez que o abatimento e moldagem dos corpos de prova são suscetíveis à erros humanos. Uma visão do comportamento da resistência média à compressão para todos os traços em função da idade pode ser observada no gráfico 2.

Gráfico 2 – Resultados médios de resistência à compressão para 7 e 28 dias



Fonte: Pelo autor (2024)

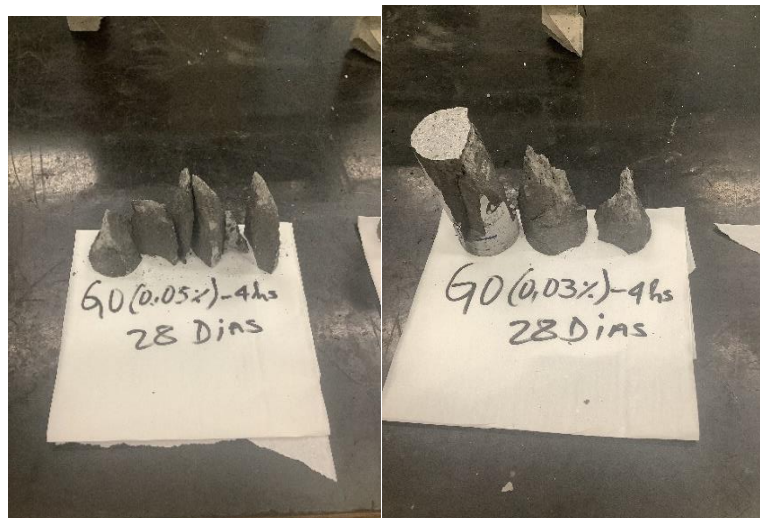
O comportamento da resistência, conforme a norma ABNT NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), pode estar relacionado com a moldagem defeituosa ou a escolha incorreta da relação água/cimento, o que pode ser observado pela forma de ruptura aos 28 dias.

Fotografia 4 – Imagens do ensaio à compressão dos corpos de prova



(a)

(b)



(c)

(d)

Fonte: Pelo autor (2024)

Destaca-se que a ruptura cisalhada, linha de fratura atravessada diagonalmente em direção a força aplicada, é uma forma confiável e aceitável, assim como a forma cônica, indicando uma preparação correta e moldagem bem executada e retificada, conforme ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração os resultados obtidos neste estudo, e a correta hipótese da adaptação das propriedades mecânicas derivados do óxido de grafeno como uma adição para um concreto de alto desempenho, conclui-se que a adição do GO pode ser uma solução para a simplificação da dosagem de um CAD, além de tornar a viabilização da produção em escala de concreto de alto desempenho e concretos de ultra alto desempenho plausível.

Para estudos futuros está em andamento um projeto de estudo do concreto permeável aditivado com óxido de grafeno de grafite de pilha. As propostas para as pesquisas futuras são a avaliação com maior precisão uma dosagem ideal para a o uso do GO extraído a partir da haste de grafite de uma pilha como uma adição, considerando a reatividade dos óxidos presentes em sua estrutura molecular, o custo de sua produção, o grau de empacotamento em função dos finos pozolânico e a projeção e construção de estruturas de concreto com essa adição, em diferentes tipos de concreto. Este estudo traz novas perspectivas não apenas para a produção de materiais cimentícios aditivados com o GO quanto para uma nova aplicação, o óxido de grafeno na construção civil.

6. REFERÊNCIAS

ADVÍNCULA, Paul A.; MENG, Wei; EDDY, Lucas J.; ESCÓCIA, Phelecia Z.; BECKHAM, Jacob L.; NAGARAJIAH, Satish; PASSEIO, James M. Substituição de agregados de concreto por grafeno flash derivado de carvão. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 16, n. 1, p. 1474-1481, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsami.3c15156>. Acesso em: 18 jun. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8802: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

CHUAH, S.; PAN, Z.; SANJAYAN, J. G.; WANG, C. M.; DUAN, H. W. Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide. **Construction and Building Materials**, p. 113-124, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040.

DREYER, D. R.; PARK, S.; BIELAWSKI, C. W.; RUOFF, R. S. The chemistry of graphene oxide. **Chemical Society Reviews**, p. 228-240, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/b917103g>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MOREIRA, Matheus Nunes. Estudo comparativo entre concretos de alto desempenho (CAD) convencionais e aditivado com óxido de grafeno. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

Tiba, Daniel Yaesu. Síntese de nanomateriais híbridos de cobre, cdots e óxido de grafeno aplicados na construção de sensores eletroquímicos. 2023. Projeto de Pesquisa apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre, São Paulo, 2023.

VALIM, Fernanda Cabrera Flores. Nanocompósitos de Poliuretano Termoplástico com Estruturas de Carbono: Estudo da Propriedade Elétrica e do Efeito de Memória de Forma. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2021.

YU, Tiffany Mak. Esfoliação eletroquímica do grafite de pilhas usadas para obtenção de óxido de grafeno. 2022. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade, Foz do Iguaçu-PR, 2022.

Contatos: jesusafonsodossantos1@gmail.com e fabiola.beltrame@mackenzie.br