ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Influência da incorporação de óxido de grafeno rico em carbonila nas propriedades mecânicas do concreto

Influence of the incorporation of carboline-rich graphene oxide on the mechanical properties of concrete.

Natâny Pinho Rosa
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil | natany.pinho@engenharia.ufjf.br
Marcela Martins Carrara
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil | marcela.carrara@engenharia.ufjf.br
Gabriela dos Santos Pacífico
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil | gabriela.pacifico@engenharia.ufjf.br
Aldo Ribeiro de Carvalho
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto | Brasil | aldo.carvalho@engenharia.ufjf.br
Marina Costa Totti
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil | marinatotti26@gmail.com
Welber Gianini Quirino
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil | wgquirino@ice.ufjf.br
Thaís Mayra de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora | Juiz de Fora | Brasil | thais.mayra@ufjf.edu.br

Resumo

As atividades industriais possuem grande responsabilidade pelo teor excessivo de carbono na atmosfera. Nesse aspecto, estudar formas de sequestrar esse carbono é uma iniciativa que deve ser encorajada. No âmbito da construção civil, o cimento Portland é o principal constituinte do concreto e grande emissor de CO_2. Nota-se também a emergência de novas tecnologias, entre elas os nanomateriais que podem ser incorporados ao concreto e modificar suas propriedades, deixando-os mais duráveis e sustentáveis. Entre os estudos mapeados na literatura, nanotubos e óxido de grafeno são frequentes. Posto isto, o objetivo deste estudo é investigar a incorporação de óxido de grafeno rico em grupos de carbonila (OGC), sendo esta investigação inédita na literatura conhecida. Para isso foram incorporados OGC em 0,02%, 0,03% e 0,05% em relação a massa de cimento ao concreto, que foi submetido aos ensaios de massa específica, absorção de água, pulso ultrassônico, resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade estático e dinâmico. As concentrações de 0,02% e 0,03% apresentaram

os maiores ganhos de resistência, enquanto a incorporação de 0,05% afetou a trabalhabilidade da mistura prejudicando suas propriedades no estado endurecido.

Palavras-chave: Concreto. Óxido de Grafeno. Óxido de grafeno rico em carbonila. Nanomaterial

Abstract

Industrial activities significantly contribute to the excessive carbon content in the atmosphere. In this regard, studying methods for sequestering this carbon is an initiative that should be encouraged. Within the construction industry, Portland cement is the primary constituent of concrete and a major emitter of CO_2. Emerging technologies, including nanomaterials, can be incorporated into concrete to modify its properties, enhancing durability and sustainability. Among the studies mapped in the literature, nanotubes and graphene oxide are frequently mentioned. Therefore, the objective of this study is to investigate the incorporation of graphene oxide rich in carbonyl groups (OGC), which is unprecedented in the known literature. For this purpose, OGC was incorporated into concrete at concentrations of 0.02 %w/w, 0.03 %w/w, and 0.05 %w/w relative to the cement mass, and subjected to tests for specific mass, water absorption, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, tensile strength, and static and dynamic modulus of elasticity. Concentrations of 0.02 %w/w and 0.03 %w/w showed the highest strength gains, while the incorporation of 0.05 %w/w affected the workability of the mixture, compromising its properties in the hardened state.

Keywords: Concrete. Graphene Oxide. Carbonyl-Rich Graphene Oxide. Nanomaterial

INTRODUÇÃO

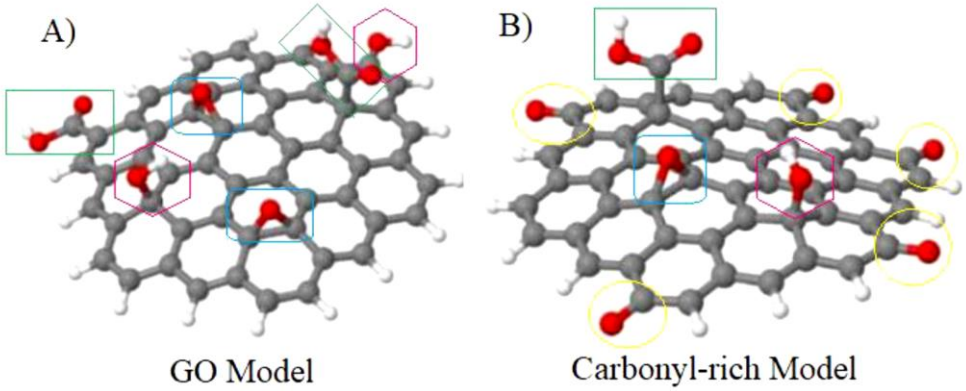
O setor da construção civil é responsável por aproximadamente 37% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), compreendendo desde a extração de matérias primas até as construções finais [1]. De acordo com [2], o segundo material mais utilizado no mundo é o concreto, sendo este constituído de cimento, água e agregados, tendo a possibilidade de conter aditivos químicos e adições. No entanto, o concreto é um dos materiais de construção que mais geram emissões de dióxido de carbono na atmosfera, visto que a produção do cimento, seu principal constituinte, é responsável por emitir cerca de 7% do CO_2 em todo o mundo [3].

Devido aos impactos ambientais negativos provenientes da emissão de GEE no setor da construção civil, pesquisadores têm buscado soluções para reduzir o teor de cimento no concreto. Neste contexto, a literatura apresenta estudos sobre incorporação no concreto de materiais como cinzas volantes [4], fíler de mármore [2], fíler basáltico [5], escória de alto forno [6], e a produção de ligantes geopolíméricos para confecção de concretos desta mesma natureza, dentre outras inovações tecnológicas como alternativa ao cimento Portland [7].

A possibilidade de adições de nanomateriais em matrizes cimentícias também tem sido foco de pesquisas que investigam nanotubos [8] e óxido de grafeno (OG) [9], por exemplo. Os nanomateriais tem condições de intensificar a resistência e a durabilidade dos compostos cimentícios [10]. O OG é hidrofílico, o que possibilita a fácil dispersão em água e viabiliza sua adição à pasta de cimento. Essa adição melhora a estrutura de poros da matriz, tornando-a mais resistente à entrada de fluidos e ataques químicos, consequentemente, aumentando sua durabilidade [11].

Diante disso, o grupo Nano do departamento de física de Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) estuda o OG em suas diversas formas e desenvolveu uma modificação do método de Hummer's que o faz ser rico em grupos carbonila (OGC), como é relatado por [12]. O método de Hummer's é uma das técnicas mais amplamente utilizadas para a produção de óxido de grafeno. Este método, desenvolvido pela primeira vez por William Hummer em 1958, envolve a oxidação do grafite utilizando agentes oxidantes fortes [13]. As modificações desenvolvidas pelo grupo NANO resultam em variações químicas e estruturais que alteram as propriedades físicas do OG, levando a elementos com características físicas distintas. Na Figura 1, é ilustrada a diferença entre a estrutura do OG e OGC.

Figura 1: Representação gráfica da estrutura do óxido de grafeno (A) e do óxido de grafeno rico em carbonila (B)



Nota: Esferas cinzas, vermelhas e brancas representam os carbonos, oxigênios e hidrogênios, respectivamente. Fonte: adaptada de [12].

Até o momento, são poucos os estudos sobre a incorporação do OG no concreto e não foram identificados, na literatura conhecida, estudos que incorporem o OGC em matrizes cimentícias. Dado que essa variação possui propriedades diferentes do OG, é imperativo estudar essa adição a fim avaliar seu comportamento de maneira comparativa. Portanto, esta pesquisa tem como objetivo investigar a viabilidade técnica da incorporação do OGC, ao concreto de 35 MPa, analisando suas propriedades mecânicas sob diferentes perspectivas e determinando sua dosagem ótima.

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

Todos os materiais utilizados na pesquisa, foram caracterizados de acordo com as Normas Brasileiras ou por dados disponibilizados pelos fornecedores.

A água utilizada na mistura do concreto e imersão dos corpos de prova foi de origem da rede pública de abastecimento, com administração feita pela Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora.

Por sua vez, foi utilizado o Cimento Portland CPV ARI Plus da Holcim do Brasil S.A, caraterizado pelo fornecedor conforme Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização Cimento Portland CPV ARI Plus da Holcim do Brasil S.A.

Análises Físicas			Análises Químicas	
Análise	**Resultado**	**Norma Referência**	**Análise**	**Resultado**
Finura (superfície específica)	5155 cm²/g	NBR 16372 [14]	Resíduo insolúvel	0,73%
Finura (Resíduo na peneira #400)	1,2%	-	Perda ao fogo (1000ºC)	2,45%
			Perda ao fogo (500ºC)	0,87%
Tempo de Início de Pega	158 minutos	NBR NM 65 [15]	Óxido de alumínio (Al_2O_3)	4,95%
Expansibilidade a quente	0 mm	NBR 11582 [16]	Óxido de ferro (Fe_2O_3)	2,86%
Resistência à compressão (1 Dia)	28,9 MPa	NBR 7215 [17]	Óxido de cálcio (CaO)	63,37%
Resistência à compressão (3 Dias)	38,8 MPa	NBR 7215 [17]	Óxido de magnésio (MgO)	3,43%
Resistência à compressão (7 Dias)	44,6 MPa	NBR 7215 [17]	Óxido sulfúrico (SO_3)	1,5%
			Óxido de potássio (K_2O)	0,89%
Resistência à compressão (28 Dias)	51,4 MPa	NBR 7215 [17]	Dióxido de silício (SiO_2)	21,07%
			Dióxido de carbono (CO_2)	0%

Fonte: Holcim do Brasil S.A (2023).

O agregado miúdo utilizado consiste na areia natural com origem no Rio Preto e o agregado graúdo em brita 0 (4,75 a 12,5 mm) [18], fabricada pela Pedra Sul Mineração. Na Tabela 2 encontram-se as propriedades físicas dos referidos agregados.

Tabela 2: Propriedades físicas dos agregados miúdos e graúdos.

Areia Natural			Brita 0 (4,75 a 12,5mm)		
Propriedades Físicas	**Resultados**	**Normas de Referência**	**Propriedades Físicas**	**Resultados**	**Normas de Referência**
Módulo de Finura	2,69	NBR 17054 [19]	Módulo de Finura	6,14	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Dimensão Máxima Característica	4,8 mm	NBR 17054 [19]	Dimensão Máxima Característica	12,5 mm	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Massa Específica	2,656 g/cm³	NBR NM 52 [20]	Densidade (condição saturada)	2,769 g/cm³	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Massa Unitária Seca	1,483 g/cm³	NBR 16973 [21]	Densidade (condição seca)	2,755 g/cm²	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Argila em torrões	4,575%	NBR 7218 [22]	Massa Unitária Seca	1,463 g/cm³	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Material Pulverulento	1,04%	NBR 16973 [21]	Material Pulverulento	0,40%	NBR 16973 (ABNT, 2021)

Areia Natural			Brita 0 (4,75 a 12,5mm)		
Propriedades Físicas	**Resultados**	**Normas de Referência**	**Propriedades Físicas**	**Resultados**	**Normas de Referência**
Matéria orgânica	≤ 300 ppm	NBR NM 49 [23]	Absorção	0,51 %	NBR 16917 (ABNT, 2021)

Fonte: Autores (2024).

Optou-se por utilizar nesta pesquisa o aditivo superplastificante em todas amostras a fim de garantir uma boa dispersão da adição e tê-la como única variável, sem afetar a relação água/cimento. Desse modo, utilizou-se o aditivo ViscoCrete-3535 CB compatível com o cimento CPV ARI da Holcim. De acordo com a fabricante Sika S.A [24], esse produto consiste em uma solução de policarboxilato em meio aquoso com densidade igual a 1,08 ± 0,02 kg/L.

Para o desenvolvimento deste estudo, a produção do OGC foi realizada pela equipe Nano da UFJF, sendo este nanomaterial fornecido em solução aquosa com concentração de 5mg/ml. A água da solução foi contabilizada para a quantidade total de água do traço, respeitando a relação água/cimento.

Neste estudo foram testadas três concentrações de OGC em relação a massa de cimento: 0,02%, 0,03% e 0,05%. Para isso, a solução contendo OGC foi disponibilizada em recipientes esterilizados, sem risco de contaminação e com volume exato para cada dosagem conforme Figura 2.

Figura 2: Óxido de grafeno rico em grupos de carbonila disperso em água em diferentes dosagens.



Fonte: Autores (2024).

O quantitativo adotado para o traço foi obtido a partir da soma dos respectivos agregados miúdos e graúdos do traço de [2]. A Tabela 3 apresenta o traço adotado em todas as amostras, variando apenas a quantidade de OGC da mistura.

Tabela 3: Traço utilizados na confecção do concreto.

Cimento	Areia Natural	Brita 0 (4,75 a 12,5mm)	Fator água/cimento	Aditivo superplastificante (%)	Cimento (Kg/m³)

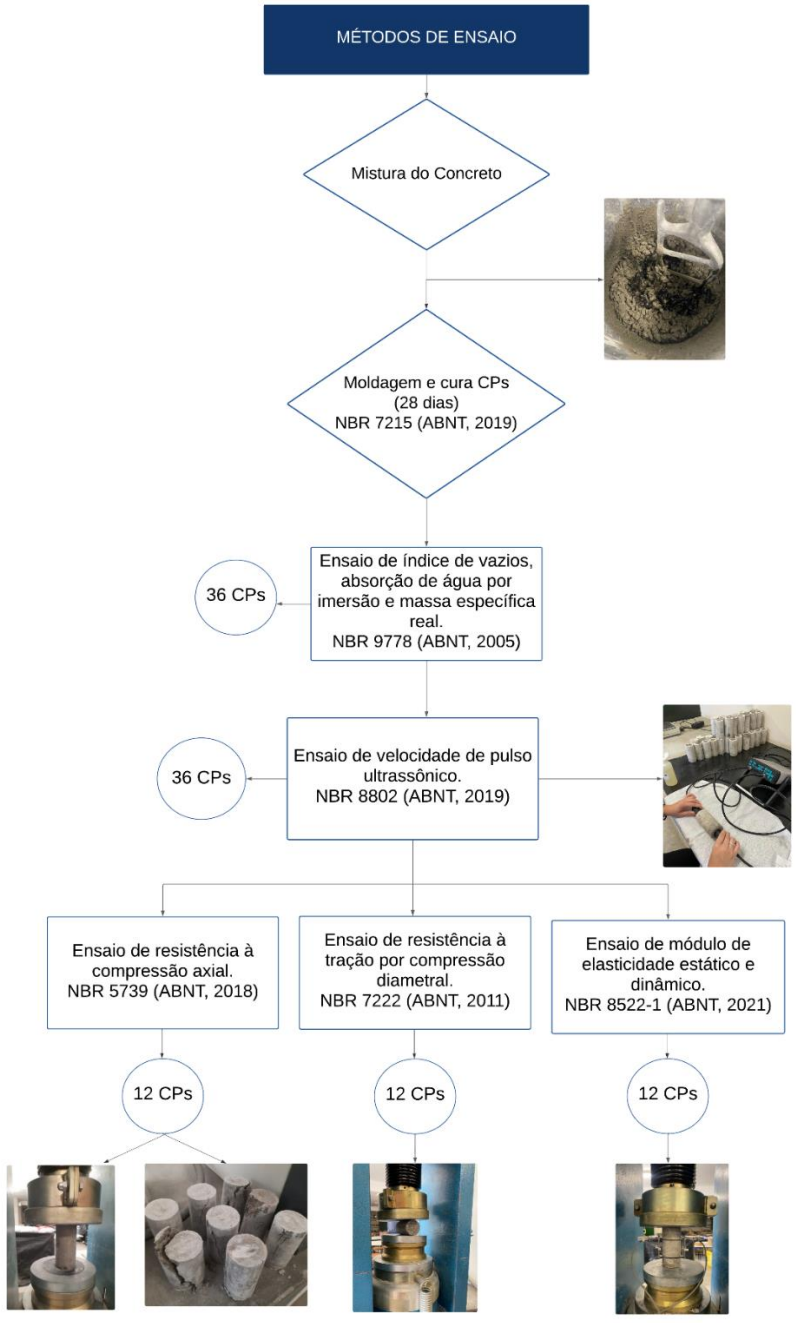
1	2,577	3,047	0,52	0,35	340

Fonte: Autores (2024).

MÉTODOS

A metodologia de moldagem dos Corpos de Prova (CP) e ensaios de caracterização obedeceu às normas da ABNT, conforme Figura 3.

Figura 3: Fluxograma contendo a metodologia experimental da pesquisa.



Nota: referências citadas na Figura são NBR 7215 [17], NBR 9778 [25], NBR 8802 [26], NBR 5739 [27], NBR 7222 [28] e NBR 8522 [29]. Fonte: Autores (2024).

Para testar as diferentes concentrações de OGC, foram produzidos 9 CP, com dimensão de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para cada concentração que foram

identificadas como 0.02-OGC, 0.03-OGC e 0.05-OGC, além de 9 CP de referência sem incorporação de OGC que foram identificadas como Ref-OGC.

RESULTADOS

ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO E MASSA ESPECÍFICA REAL

Na Tabela 4, são exibidos os valores de índice de vazios (IV), absorção de água (A), e massa específica (ρr), de todos os corpos de prova de referência e com adição de OGC assim como a média, desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 4: Resultados índice de vazios, absorção de água e massa específica - Ref-OGC, 0.02-OGC, 0.03-OGC e 0.05-OGC.

Amostra		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	*Média*	*Desvio padrão*	*Coeficiente de Variação*
Ref OGC	*Iv (%)*	1,76	1,04	0,93	1,13	0,99	1,03	1,51	0,90	0,60	**1,10**	**0,32**	**29,48 %**
	A (%)	0,74	0,43	0,38	0,47	0,40	0,42	0,60	0,36	0,25	**0,45**	**0,13**	**29,83 %**
	ρ_r *(g/cm³)*	2,44	2,45	2,44	2,46	2,49	2,47	2,55	2,51	2,44	**2,47**	**0,03**	**1,40 %**
0.02 OGC	*Iv (%)*	1,22	0,82	0,76	0,75	0,73	0,73	0,42	0,41	0,48	**0,7**	**0,24**	**33,62 %**
	A (%)	0,50	0,34	0,32	0,31	0,30	0,30	0,17	0,17	0,20	**0,29**	**0,10**	**33,30 %**
	ρ_r *(g/cm³)*	2,48	2,43	2,41	2,42	2,48	2,47	2,44	2,43	2,42	**2,44**	**0,02**	**0,96 %**
0.03 OGC	*Iv (%)*	2,32	2,16	2,38	2,35	1,99	2,05	1,73	2,06	1,89	**2,11**	**0,21**	**9,89 %**
	A (%)	0,96	0,91	0,99	0,98	0,83	0,85	0,72	0,85	0,78	**0,87**	**0,09**	**9,97 %**
	ρ_r *(g/cm³)*	2,47	2,44	2,47	2,45	2,46	2,46	2,44	2,47	2,47	**2,46**	**0,01**	**0,49 %**
0.05 OGC	*Iv (%)*	2,32	2,34	2,2	2,29	2,15	2,1	1,7	1,83	1,91	**2,09**	**0,22**	**10,33 %**
	A (%)	0,97	0,99	0,92	0,96	0,90	0,88	0,72	0,77	0,80	**0,88**	**0,09**	**10,38 %**
	ρ_r *(g/cm³)*	2,44	2,43	2,44	2,43	2,43	2,43	2,42	2,43	2,43	**2,43**	**0,01**	**00,23 %**

Fonte: Autores (2024).

Nota-se que a amostra 0.02-OGC foi a única contendo OGC que apresentou índice de vazios inferior ao Ref-OGC, assim como uma menor absorção de água. Logo, apenas a presença de OGC 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-OGC.

Na Tabela 4 não é notada uma relação proporcional entre o aumento da concentração de OGC e a redução da Absorção de Água, como visto por [30] para o OG. Nota-se que a concentração de 0,02% de OGC é capaz de reduzir a absorção em 35,5% com relação ao concreto de referência, enquanto para o OG foi necessária uma concentração de 0,08% para reduzir 34% da absorção de água [30].

A menor concentração de OGC também obteve melhor desempenho em relação ao OG para os índices de vazios. [31] alcançaram diminuição de 28,86% com 0,05% de OG, enquanto apenas 0,02% de OGC proporcionou redução de 36,4%.

As amostras 0.03-OGC e 0.05-OGC 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 que permitiria a percolação de água, causada pela adição de OGC.

ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

Os resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU), são mostrados na Tabela 5. Quanto maior a VPU, menor a quantidade de vazios no concreto, e consequentemente, maior a durabilidade [32]. Dessa forma, as amostras 0.02-OGC e 0.03-OGC apresentam melhorias em relação a Ref-OGC com aumento de velocidade de 12,0% e 17,1%, respectivamente. O resultado com 0,05% de OGC se mostrou inferior e pode ser fruto de uma má dispersão devido a maior quantidade de material ou do desenvolvimento de microporos na estrutura.

Tabela 5: Resultados de velocidade de pulso ultrassônico.

Amostras	**Velocidade de pulso ultrassônico (m/s)**			
	Ref- OGC	**0.02- OGC**	**0.03- OGC**	**0.05- OGC**
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	**4022,80**	**4504**	**4712**	**3149,40**
Desvio padrão	**658,80**	**516**	**33,30**	**240,70**
Coeficiente de variação	**16,38%**	**11,46%**	**0,71%**	**7,64%**

Fonte: Autores (2024).

É possível notar que uma menor concentração de OGC foi suficiente para superar resultados da literatura ao utilizar uma maior quantidade de OG. Reddy e Prasad [33] utilizaram 0,025% de OG e obtiveram um aumento de apenas 4% da VPU, enquanto apenas 0,02% de OGC aumentou em 10,71% a VPU. Para alcançar 4700 m/s, Reddy e Prasad [33] utilizaram 0,1% de OG e um desempenho semelhante foi alcançado com apenas 0,03% de OGC, resultando em 4712 m/s.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial estão expostos na Tabela 6. Os valores de resistência à compressão axial nas amostras 0.02-OGC, 0.03-OGC e 0.05-OGC foram superiores em 33,2%, 14,5% e 1,6%, respectivamente quando comparados ao concreto referência. Novamente, a concentração de OGC é importante no resultado, embora todas tenham acarretado incremento na resistência à compressão, contradizendo [31] que obtiveram apenas diminuição de resistência.

Tabela 6: Resultados resistência à compressão axial.

Amostras	Resistência à compressão axial (MPa)			
	Ref- OGC	**0.02- OGC**	**0.03- OGC**	**0.05- OGC**
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	**38,50**	**51,30**	**44,10**	**39,10**
Desvio padrão	**1,9**	**1,3**	**1,2**	**1,2**
Coeficiente de variação	**4,88%**	**2,57%**	**2,72%**	**3,19%**

Fonte: Autores (2024).

O incremento na resistência com o aumento da concentração, como relataram [30] e [33], não foi observado neste estudo. Constatou-se um comportamento oposto. No entanto, o resultado de 0,02% de OGC se mostrou próximo ao obtido por Reddy e Prasad [33] com 0,1% de OG e superior aos resultados de Devi e Khan [30] e Jyothimol et al. [34] com 0,05% e 0,08% de OG, respectivamente.

O aumento da resistência para a concentração de 0,05% de OGC é comparativamente menor, mas em ordem de grandeza semelhante ao encontrado por [35]. Embora esse estudo tenha obtido valores mais elevados com concentrações superiores de OG, não ultrapassam os valores alcançados com 0,02% e 0,03% de OGC da presente pesquisa. Assim, a ideia da dispersão irregular para a amostra de 0.05-OGC é reforçada. Salienta-se que não se pode atribuir todos os resultados a essa característica, uma vez que o aumento da resistência com 0,03% de OGC também foi inferior ao proporcionado pela concentração de 0,02%. Esse comportamento não é observado para o ensaio de VPU por exemplo.

Com base nisso, o OGC demonstra um comportamento distinto de resistência à compressão em comparação ao OG. Excetuando o trabalho de [36], os resultados obtidos com 0,02% de OGC são semelhantes aos melhores encontrados na literatura de OG, porém utilizando uma concentração inferior do nanomaterial.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.

A Tabela 7 exibe os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. 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- OGC, com melhoria de 18,5% seguida por 0.03- OGC e 0.05- OGC, com 7,4% e 1,2% de aumento em relação ao concreto de referência, respectivamente.

Tabela 7: Resultados resistência à tração por compressão diametral.

Amostras	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)			
	Ref- OGC	**0.02- OGC**	**0.03- OGC**	**0.05- OGC**
CP 4	8,79	9,97	8,76	8,46
CP 5	7,88	9,04	9,00	7,92
CP 6	7,63	9,65	8,23	8,19
Média	**8,10**	**9,60**	**8,70**	**8,20**
Desvio padrão	**0,60**	**0,50**	**0,40**	**0,30**
Coeficiente de variação	**7,54%**	**4,95%**	**4,55%**	**3,30%**

Fonte: Autores (2024).

Este ensaio reforça a ideia que a concentração interfere substancialmente no resultado final. Embora todas as concentrações tenham sido eficientes para melhorar a resistência à tração, não houve comportamento similar ao observado por [30] e [33], onde o crescimento da resistência se deu à medida que aumentasse a concentração de OG.

A utilização de 0,02% de OGC proporcionou resultados semelhantes ao de Devi e Khan [30] e superiores ao de [33] e [34], que incorporaram exatamente o quádruplo, quíntuplo e mais que o dobro de OG, respectivamente. Portanto, exceto pelos estudos de [36], que obtiveram parte dos resultados mais promissores, a incorporação de OGC no concreto demonstra vantagens em relação ao OG relatado na literatura devido ao menor consumo de nanomaterial para alcançar valores próximos ou até mesmo superiores.

ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade estático e dinâmico são apresentados na Tabela 8. Os valores apresentados evidenciam que as amostras 0.02-OGC, 0.03-OGC e 0.05-OGC 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 OGC ao concreto proporcionou melhorias para o material, em especial a concentração de 0,02%, uma vez que o tornou menos suscetível a deformação sob mesma tensão.

Tabela 8: Resultado módulo de elasticidade estático e dinâmico - Ref OGC, 0,02 OGC, 0,03 OGC e 0,05 OGC.

	Ref- OGC						
Amostra	$\boldsymbol{fc}$ (MPa)	$\boldsymbol{0{,}3 \cdot fc}$ (MPa)	$\boldsymbol{0{,}8 \cdot fc}$ (MPa)	$\boldsymbol{1{,}2 \cdot fc}$ (MPa)	$\boldsymbol{fc{,}ef}$ (MPa)	$\boldsymbol{Eci}$ (GPa)	$\boldsymbol{Ed}$ (GPa)
CP 7	38,5	11,6	30,8	46,2	38,18	33,51	35,23
CP 8					37,98	32,91	28,82

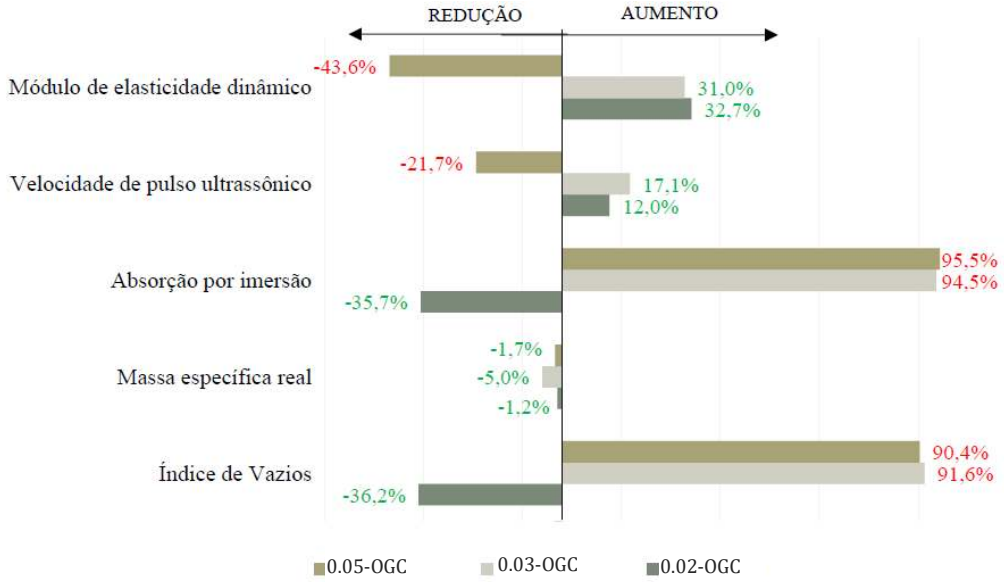
CP 9					40,15	36,86	48,9
Média						**34,4**	**37,7**
Desvio padrão						**2,1**	**10,3**
Coeficiente de variação						**6,18%**	**27,25%**
0,02 OGC							
CP 7					52,24	45,85	51,31
CP 8	51,3	15,4	41,1	61,6	51,12	41,89	50,10
CP 9					52,01	44,48	48,51
Média						**44,1**	**50,0**
Desvio padrão						**2,0**	**1,4**
Coeficiente de variação						**2,46%**	**2,80%**
0,03 OGC							
CP 7					42,97	36,88	48,05
CP 8	44,1	13,2	35,2	52,9	43,13	39,15	49
CP 9					44,42	41,71	50,92
Média						**39,2**	**49,3**
Desvio padrão						**2,4**	**1,5**
Coeficiente de variação						**6,17%**	**2,97%**
0,05 OGC							
CP 7					40,24	35,13	20,35
CP 8	39,1	11,7	31,3	47	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**
Coeficiente de variação						**3,13%**	**4,0%**

Fonte: Autores (2024).

O módulo de elasticidade dinâmico não acompanhou proporcionalmente o crescimento do módulo estático. Isso é um resultado esperado, uma vez que módulo de elasticidade dinâmico é consequência de cálculos que estimam seu valor através do ensaio de VPU. Contudo, 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 OGC.

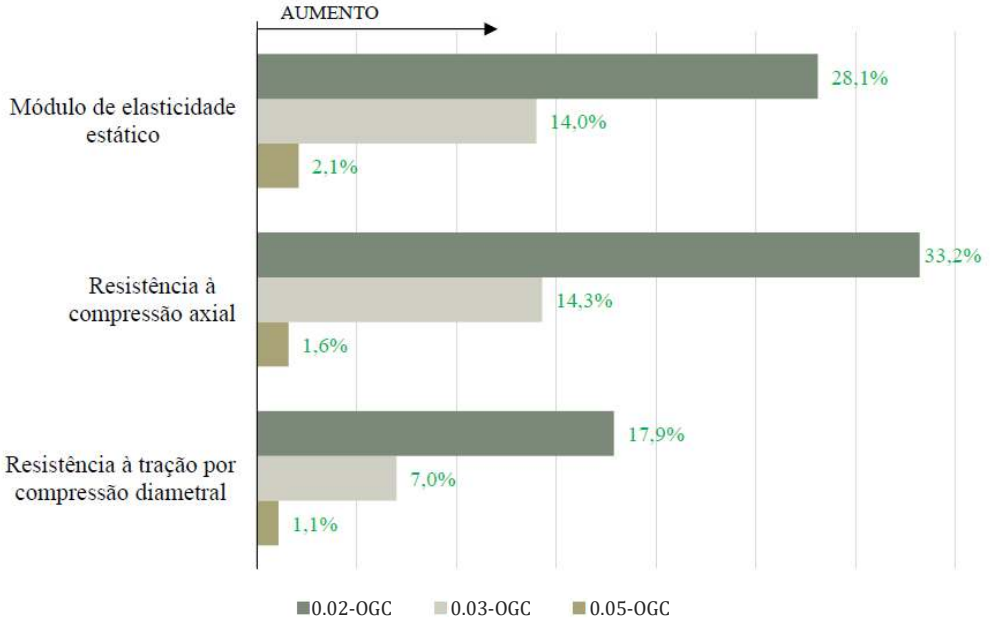
Os resultados dos ensaios não destrutivos e destrutivos, realizados de acordo com as prescrições normativas para a caracterização do concreto, estão resumidos nas Figura 4 e Figura 5, respectivamente.

Figura 4: 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 OGC.



Fonte: Autores (2024).

Figura 5: 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 OGC.



Fonte: Autores (2024).

CONCLUSÕES

Este estudo alcançou seus objetivos ao investigar os efeitos da incorporação de OGC no concreto, definir sua dosagem ótima e comparar seu desempenho com o OG relatado na literatura. Foi observado que a concentração do OGC incorporado ao concreto é um fator relevante para aprimorar seu desempenho. Notavelmente, apenas a concentração de 0,02% de OGC demonstrou melhorias em todos os parâmetros analisados. Assim, esta concentração é avaliada como a dosagem ótima para proporcionar melhores resultados.

Dentre as principais considerações, tem-se que:

- 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 OGC. O OGC nessa concentração, assim como em 0,05%, pode ter promovido microporos em quantidade significativa facilitando a percolação de água.
- A amostra contendo 0,05% de OGC 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 nanomaterial em maior quantidade, além da hipótese descrita anteriormente.
- A incorporação de OGC em dosagem ótima 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. Além disso, foi notado um aumento no módulo de elasticidade estático em 28,1%, o que indica uma redução em sua deformabilidade. Salienta-se que todos esses benefícios são acompanhados por uma redução de 1,2% na massa específica do concreto, tornando-o mais leve.

Por fim, este trabalho visa valorizar e fomentar o estudo e a produção de novas nanotecnologias no Brasil ao incorporar um novo tipo de óxido de grafeno, que foi integralmente produzido em universidades brasileiras, ao concreto. A partir do auxílio da nanotecnologia espera-se o desenvolvimento de materiais de construção mais duráveis, encorajando um viés mais sustentável para indústria da construção civil.

REFERÊNCIAS

[1] UNEP, “Plano da ONU promete cortes maciços de emissões no setor da construção – o mais poluente e mais difícil de descarbonizar,” 2023. [Online]. Available: https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/plano-da-onu-promete-cortes-macicos-de-emissoes-no.

[2] A. R. d. Carvalho, G. d. S. Júnior, W. C. Fontes, G. J. B. Silva, L. G. Pedroti e T. M. d. Oliveira, “Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados,” *Ambiente Construído,* Oct-Dec 2023.

[3] G. Visedo, M. Pecchio e A. F. Battagin, “Bases para o lançamento do Mapeamento Tecnológico do Cimento – Brasil 2050,” *Ibracon: Concreto e Construções,* nº 95, pp. 26-31, Jul – Set 2019.

[4] D. K. Panesar, D. Kanraj e Y. Abualrous, “Effect of transportation of fly ash: Life cycle assessment and life cycle cost analysis of concrete,” *Cement and Concrete Composites,* vol. 99, pp. 214-224, May 2019.

[5] A. H. Meinhart, R. B. Macedo, T. T. Guterres e D. C. M. Arnold, “Análise do potencial de uso do fíler basáltico como substituição parcial do cimento Portland,” *Ambiente Construído,* Oct-Dec 2023.

[6] M. M. Farias, C. L. d. R. Farias e M. d. S. Picanço, “Escória de Alto Forno como substituição parcial ao cimento Portland,” *Revista Matéria,* 2023.

[7] A. R. d. Carvalho, B. R. d. S. Calderón-Morales, J. Borba e T. M. d. Oliveira, “Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid,” *Construction and Building Materials,* vol. 403, Nov 2023.

[8] P. Zhang, J. Su, J. Guo e S. Hu, “Influence of carbon nanotube on properties of concrete: A review,” *Construction and Building Materials,* vol. 369, March 2023.

[9] E. F. B. Motta, A. R. d. Carvalho, J. G. D. Barra, I. O. Maciel e T. M. d. Oliveira, “Thermomechanical behavior of concretes with addition of non-functionalized and functionalized carbon nanotubes,” *Journal of Building Engineering,* 1 November 2024.

[10] A. Anwar, X. Liu e L. Zhang, “Nano-cementitious composites modified with Graphene Oxide – a review,” *Thin-Walled Structures,* vol. 183, February 2023.

[11] S. Chuah, Z. Pan, J. G. Sanjayan, C. M. Wang e W. H. Duan, “Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide,” *Construction and Building Materials,* vol. 73, pp. 113-124, December 2014.

[12] A. Mohammed, N. T. K. Al-Saadi e J. G. Sanjayan, “Inclusion of graphene oxide in cementitious composites: state-of-the-art review.,” *Australian Journal of Civil Engineering,* pp. 81-95, March 2018.

[13] A. H. d. Lima, C. T. Tavares, C. d. Cunha, N. Vicentini, G. Carvalho, B. Fragneaud, I. Maciel, C. Legnani, W. Quirino, L. F. d. Oliveira, F. Sato e J. P. d. Medonça, “Origin of optical bandgap fluctuations in graphene oxide,” *The European Physical Journal B,* June 2020.

[14] W. S. H. Jr e R. E. Offeman, “Preparation of Graphitic Oxide,” *Journal of the American Chemical Society,* 1958.

[15] ABNT, “NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine),” ABNT, Rio de Janeiro, 2015.

[16] ABNT, “NBR NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega,” Rio de Janeiro, 2002.

[17] ABNT, “NBR 11582: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier,” Rio de Janeiro, 2016.

[18] ABNT, “NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão,” ABNT, Rio de Janeiro, 2019.

[19] ABNT, “NBR 7211 Agregados para concreto — Requisitos,” ABNT, Rio de Janeiro, 2022.

[20] ABNT, “NBR 17054: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um por lavagem,” ABNT, Rio de Janeiro, 2022.

[21] ABNT, “NBR 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica,” ABNT, Rio de Janeiro, 2009.

[22] ABNT, “NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um por lavagem,” ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

[23] ABNT, “NBR 7218: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis,” Rio de Janeiro, 2019.

[24] ABNT , “NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impirezas orgânicas,” Rio de Janeiro, 2001.

[25] S. SIKA, “Sika ViscoCrete - 3535 CB.,” 2022.

[26] ABNT, “NBR 9778: Versão Corrigida: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica,” ABNT, Rio de Janeiro, 2009.

[27] ABNT, “NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica,” Rio de Janeiro, 2019.

[28] ABNT, “NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos,” ABNT, Rio de Janeiro, 2018.

[29] ABNT, “NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos,” ABNT, Rio de Janeiro, 2011.

[30] ABNT, “Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão,” ABNT, Rio de Janeiro, 2017.

[31] S. C. Devi e R. A. Khan, “Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete.,” *Journal of Building Engineering,* vol. 27, 2020.

[32] Y. B. Arcanjo e M. V. Rossi, “Estudo da Porosidade, Permeabilidade e Absorção do Concreto com Adição de Óxido de Grafeno,” em *Jornada de Iniciação Científica e Mostra de Iniciação Tecnológica*, São Paulo, 2018.

[33] F. S.-. Pierre, A. Philibert, B. Giroux e P. Rivard, “Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity,” *Construction and Building Materials,* vol. 125, pp. 1022-1027, October 2016.

[34] P. V. R. K. Reddy e D. R. Prasad, “Investigation on the impact of graphene oxide on microstructure and mechanical behaviour of concrete,” *Journal of Building Pathology and Rehabilitation,* vol. 7, February 2022.

[35] P. Jyothimol, R. Hazeena, M. T. Issac e A. Mathiazhagan, “Effect of reduced graphene oxide on the mechanical properties of concrete.,” em *Earth and*

Environmental Science: 5th International Conference on MODELING AND SIMULATION IN CIVIL ENGINEERING,, 2020.

[36] M. Devasena e J. Karthikeyan, “Investigation on Strength Properties of Graphene Oxide Concrete,” *International Journal of Engineering Science Invention Research & Development,* vol. 1, February 2015.

[37] P. H. Dutra, E. G. Bernardino e N. U. Yamaguchi, “Incorporação de óxido de grafeno em concreto: avaliação das resistências à compressão e tração.,” *Revista de Engenharia e Tecnologia,* vol. 14, 2022.