

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

AVALIAÇÃO DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO
RICO EM CARBONILA SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

MARCELA MARTINS CARRARA

JUIZ DE FORA

2024

AVALIAÇÃO DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO
RICO EM CARBONILA SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

MARCELA MARTINS CARRARA

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

Área de Conhecimento: Construção Civil

Orientadora: Prof.^a Thaís Mayra de Oliveira,
D.Sc.

Coorientador: Aldo Ribeiro de Carvalho, M.Sc

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2024


AVALIAÇÃO DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO
RICO EM CARBONILA SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

MARCELA MARTINS CARRARA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.


Aprovado em: 02/07/2024

Por:

Documento assinado digitalmente
 THAIS MAYRA DE OLIVEIRA
Data: 11/07/2024 14:35:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof.^a D.Sc. THAÍS MAYRA DE OLIVEIRA (Orientadora)

Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 ALDO RIBEIRO DE CARVALHO
Data: 11/07/2024 14:48:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof., M.Sc. ALDO RIBEIRO DE CARVALHO (Coorientador)

Universidade Federal de Ouro Preto

Documento assinado digitalmente
 FLAVIA DE SOUZA BASTOS
Data: 12/07/2024 08:41:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a D.Sc. FLÁVIA DE SOUZA BASTOS (Examinadora 01)

Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 WELBER GIANINI QUIRINO
Data: 13/08/2024 20:24:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus e à Santa Rita de Cássia por serem fontes de Fé na condução dos meus estudos.

Aos meus pais, Jovani e Marcilia, por serem meu porto seguro, pelo exemplo de valores na vida e pelos esforços dedicados à minha educação. Obrigada por confiarem em mim e por me fortalecerem em momentos de dúvidas e incertezas.

À minha querida irmã, Júlia, por acreditar nesse sonho comigo e por se orgulhar de cada pequena conquista, hoje vibra por essa grande vitória.

Agradeço à minha família por torcer por mim e entender as ausências ao longo desses anos.

Aos amigos da UFJF, obrigada por compartilharem as alegrias e desafios dessa longa e difícil jornada. Ao Luiz Henrique, pela cumplicidade e apoio em cada etapa. À Raphaella, pela acolhida, parceria e pelo incentivo de sempre.

À minha orientadora, Thaís, por proporcionar grandes aprendizados por meio da Iniciação Científica, por cada auxílio e conselhos para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada pela dedicação e por me inspirar como profissional. À laboratorista Romilda, agradeço pela ajuda na realização dos ensaios, sempre com muito carinho. À Gabriela, obrigada por entrar com entusiasmo na pesquisa e pela motivação. À Natany, por compartilhar parte da pesquisa comigo.

À FAPEMIG, pela bolsa a mim confiada.

Agradeço a todos os professores e profissionais que, com sua dedicação e expertise, tornaram possível o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Aos professores, Jordan e Gislaine, agradeço pelos ensinamentos e por me oferecerem a primeira oportunidade em uma atividade na UFJF, por meio do Projeto de Extensão “Núcleo de Engenharia Pública” e em seguida, como monitora da disciplina de “Contexto e Prática em Engenharia Civil”.

Ao grupo NANO, do departamento de Física da UFJF, por disponibilizar o Óxido de Grafeno Rico em Carbonila essencial para a consolidação desse estudo. À Marina, pela gentileza na síntese do material e atenção na resolução de dúvidas.

Agradeço à Edlaine, pela disponibilidade e zelo em momentos desafiadores da Pesquisa.

Ao Aldo, por todo apoio e cuidado ao longo desse estudo e pelo aceite para ser meu Coorientador. Agradeço pelo intermédio com a equipe do Laboratório NanoLab da Universidade Federal de Ouro Preto, para a promoção dos ensaios de DRX e MEV, bem como expresso meu agradecimento a este laboratório.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica do ICE – UFJF, pela colaboração fundamental na execução de ensaios de MEV.

Agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora, por me acolher nesses anos de graduação e por me proporcionar um ensino público, gratuito e de qualidade.

RESUMO

O concreto é um dos materiais mais utilizados globalmente, sendo segundo apenas à água nesse aspecto. Sua popularidade se deve às suas propriedades quando endurecido, como alta resistência mecânica, facilidade de aplicação e baixo custo. Desde os tempos do Egito Antigo, o concreto evoluiu continuamente, com desenvolvimentos significativos incluindo a introdução de aditivos que alteram suas propriedades físicas e mecânicas. Esses avanços impulsionaram a construção civil, permitindo a criação de estruturas cada vez mais altas, complexas e inovadoras em termos de arquitetura. No contexto da durabilidade e segurança estrutural do concreto, a resistência ao fogo é crucial. É notável o aumento dos incêndios em estruturas civis, como recentes casos no Brasil, demonstrando a necessidade de materiais que resistam ao fogo. A presente pesquisa busca avançar com o uso inédito de um nano-material, óxido de grafeno rico em grupos carbonila (CGO) como aditivo no concreto, para a avaliação em altas temperaturas. A concentração ótima utilizada é de 0,02% em relação ao peso do cimento. Logo, foi avaliada a condutividade térmica do concreto de 0,02% CGO em relação ao concreto de REF. Em seguida, foram analisados concretos de REF e de 0,02% de CGO, em temperatura ambiente e submetidos a temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C. Foram realizados ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica real, velocidade de pulso ultrassônico, resistência a compressão e tração, módulo de elasticidade, MEV e DRX. Assim o estudo revelou que em altas temperaturas, tanto o concreto de REF e o de 0,02% CGO tiveram um aumento progressivo nos índices de vazios e absorção, devido à formação de poros, vazios e transformações químicas. No entanto, o concreto de 0,02% CGO demonstrou uma otimização na matriz em altas temperaturas, com uma redução de poros e vazios em comparação com o concreto de REF. A adição de CGO influenciou positivamente a retenção de água e a resistência ao impedir a propagação de fissuras, atuando como um reforço na estrutura. A resistência à compressão e tração a 300°C no concreto de REF e 0,02% CGO apresentaram resultados próximos, atribuídos à similaridade na matriz de concreto. Esses resultados sugerem que o CGO pode trazer melhorias ao concreto, funcionando como um fortalecimento na estrutura para incrementar a resistência e aprimorar a disposição da matriz, especialmente em concretos sujeitos a altas temperaturas.

Palavras-chave: Concreto. Altas temperaturas. Óxido de grafeno rico em carbonila.

ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used materials globally, second only to water in this regard. Its popularity stems from its properties when hardened, such as high mechanical strength, ease of application, and low cost. Since ancient Egyptian times, concrete has evolved continuously, with significant developments including the introduction of additives that alter its physical and mechanical properties. These advancements have driven civil construction, enabling the creation of increasingly tall, complex, and architecturally innovative structures. In the context of concrete durability and structural safety, fire resistance is crucial. There has been a notable increase in fires in civil structures, as seen in recent cases in Brazil, highlighting the need for materials that can withstand fire. This study aims to advance the novel use of a nanomaterial, graphene oxide rich in carbonyl groups (CGO), as an additive in concrete for evaluation at high temperatures. The optimal concentration used is 0.02% relative to the weight of cement. The thermal conductivity of concrete with 0.02% CGO was evaluated in comparison to reference concrete (REF). Subsequently, REF and 0.02% CGO concretes were analyzed at room temperature and subjected to temperatures of 300°C, 600°C, and 900°C. Tests included water absorption by immersion, void index, real density, ultrasonic pulse velocity, compressive and tensile strength, modulus of elasticity, SEM, and XRD. The study revealed that at high temperatures, both REF and 0.02% CGO concrete showed a progressive increase in voids and absorption indices due to pore formation, voids, and chemical transformations. However, 0.02% CGO concrete demonstrated optimization in the matrix at high temperatures, with a reduction in pores and voids compared to REF concrete. The addition of CGO positively influenced water retention and resistance by preventing crack propagation, acting as reinforcement in the structure. Compressive and tensile strength at 300°C in REF and 0.02% CGO concrete showed similar results, attributed to the similarity in the concrete matrix. These findings suggest that CGO can enhance concrete, acting as reinforcement in the structure to improve strength and optimize matrix disposition, especially in concretes exposed to high temperatures.

Keywords: Concrete. Concrete. High temperatures. Carbonyl-rich graphene oxide.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação gráfica da estrutura do óxido de grafeno. Esferas cinzas, vermelhas e brancas representam os carbonos, oxigênios e hidrogênios, respectivamente.	18
Figura 2 - Representação gráfica da estrutura do óxido de grafeno rico em carbonila. Esferas cinzas, vermelhas e brancas representam os carbonos, oxigênios e hidrogênios, respectivamente.	19
Figura 3 - Resultados Ensaio de Resistência a Compressão e Resistência a Tração por Cisalhamento.	25
Figura 4 - Curva tensão-deformação de cada grupo de corpos de prova sob carga de impacto em alta temperatura.	26
Figura 5 - Resultados Ensaio de Resistência a Compressão com corpos de prova submetidos a altas temperaturas.	27
Figura 6 - Micromorfologia do concreto do grupo PC: 1. Cristais de hidrato desordenados e frouxamente dispostos; 2. Rachaduras; 3. Buracos.	27
Figura 7 - Micromorfologia do concreto do grupo GOC: 1. Fissuras sob carga; 2. Buracos após queda do agregado.	28
Figura 8 - Micromorfologia do concreto do grupo PC: 1. Cristais de hidrato desordenados e frouxamente dispostos; 2. Rachaduras; 3. Buracos.	29
Figura 9 - Micromorfologia do concreto do grupo GOC: 1. Fissuras sob carga; 2. Buracos após queda do agregado.	29
Figura 10 - Resultados de DRX da amostra.	30
Figura 11 - Representação esquemática das condições de oxidação utilizadas para preparar os GOs ricos em carbonila, epóxi e hidroxila usando modificações do método de Hummers.	32
Figura 12 - Cimento Portland CPV ARI Plus da Holcim do Brasil S.A.	35
Figura 13 - Brita 0.	36

Figura 14 - Curva Granulométrica da Brita 0.....	37
Figura 15 - Areia Natural.....	38
Figura 16 - Curva Granulométrica Areia Natural.....	38
Figura 17 - Aditivo ViscoCrete-3535 CB da fabricante Sika AS.....	40
Figura 18 - Óxido de grafeno rico em grupos de carbonila disperso em água.	41
Figura 19 - Argamassadeira com a mistura de materiais após a adição do CGO.....	44
Figura 20 - Corpos de prova após a moldagem.	44
Figura 21 - Desmoldagem dos corpos de prova.	44
Figura 22 - Corpos de Prova Submersos na Câmara Úmida.	45
Figura 23 - Corpos de Prova sendo retificados.	45
Figura 24 - Sistematização do processo de moldagem dos corpos de prova com CGO.	46
Figura 25 - Disposição dos Corpos de Prova no Forno Mufla.	47
Figura 26 – Fluxo Metodologia Adotada.	48
Figura 27 - Montagem do Equipamento ATA com as placas de concreto e o gelo.	49
Figura 28 - Ilustração do Princípio de funcionamento do ATA.....	49
Figura 29 - Processo de ensaio do ATA para cálculo da condutividade térmica.	50
Figura 30 - Placa de Concreto imediatamente após a moldagem.....	51
Figura 31 - Placas de Concreto.....	51
Figura 32 - Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico.....	54
Figura 33 - Ensaio de resistência à compressão.	55
Figura 34 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	56

Figura 35 – Ensaio de módulo de elasticidade.	58
Figura 36 - Etapas de produção das amostras de MEV.....	60
Figura 37 - Amostras de MEV.	60
Figura 38 - Amostra de DRX sendo preparada.	61
Figura 39 - Resultados dos ensaios de Condutividade térmica utilizando o ATA.	62
Figura 40 – Comparação de Índices de Vazios REF e 0,02% CGO.	64
Figura 41 - Comparação de Índices de Vazios REF e 0,02% CGO submetidos a altas temperaturas.....	65
Figura 42 - Comparação de Absorção REF e 0,02% CGO.	66
Figura 43 - Comparação de Absorção REF e 0,02% CGO submetidos a altas temperaturas. .	67
Figura 44 - Comparação de Massa específica REF e 0,02% CGO.	68
Figura 45 - Comparação de Massa específica REF e 0,02% CGO submetidos a altas temperaturas.....	69
Figura 46 – Variação de Índices de Vazios dos gradientes de temperatura com TA.	70
Figura 47 - Variação Absorção de água dos gradientes de temperatura com TA.	71
Figura 48 - Variação Massa Específica dos gradientes de temperatura com TA.	72
Figura 49 - Comparação de VPU para REF e 0,02% CGO.....	73
Figura 50 - Comparação de VPU para REF e 0,02% CGO submetidos a altas temperaturas..	74
Figura 51 - Comparação de Compressão Axial para REF e 0,02% CGO.	76
Figura 52 - Variação de Resistência à compressão em relação a TA.....	77
Figura 53 - Comparação de Tração para REF e 0,02% CGO.....	78
Figura 54 - Variação de Tração em relação a TA.....	79

Figura 55 - Comparação do módulo de elasticidade estático para REF e 0,02% CGO.	80
Figura 56 - Variação do módulo de elasticidade estático em relação a TA.	81
Figura 57 - Comparação do módulo de elasticidade dinâmico para REF e 0,02% CGO.....	81
Figura 58 - Variação do módulo de elasticidade dinâmico em relação a TA.....	82
Figura 59 - MEV das Amostras em TA.....	83
Figura 60 - MEV das Amostras à 300°C.....	84
Figura 61 - MEV das Amostras à 600°C.....	85
Figura 62 - MEV das Amostras à 900°C.....	86
Figura 63 - DRX de amostras em TA.....	88
Figura 64 – DRX de amostras à 300°C.	89
Figura 65 - DRX de amostras à 600°C.....	90
Figura 66 - DRX de amostras à 900°C.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Transformações no concreto exposto a altas temperaturas.	22
Tabela 2 - Evolução do comportamento do concreto em função da elevação de temperatura.	23
Tabela 3 - Composição Granulométrica Brita 0.	36
Tabela 4 - Propriedades físicas brita 0.	37
Tabela 5 - Composição granulométrica Areia Natural.	38
Tabela 6 - Propriedades físicas Areia Natural.	39
Tabela 7 - Traço utilizados na confecção do concreto.	41
Tabela 8 - Corpos de Prova de 0,02% de CGO.	42
Tabela 9 - Corpos de Prova de Referência.	43
Tabela 10 - Tempo necessário para atingir temperaturas elevadas na mufla.	46

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CESAMA	Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora - MG
CGO	Óxido de Grafeno rico em grupos de carbonila
GO	Óxido de Grafeno
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
NANO	Grupo de Nanociências e Nanotecnologia
NBR	Norma Brasileira
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
TA	Temperatura Ambiente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
DRX	Difração de Raio X

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	20
1.3	OBJETIVOS.....	21
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	CONCRETO, TEMPERATURA E ÓXIDO DE GRAFENO.....	22
2.1.	CONCRETOS SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS.....	22
2.2	ÓXIDO DE GRAFENO.....	23
2.2.1	ÓXIDO DE GRAFENO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS.....	24
2.2.2	ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM GRUPO CARBONILA	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO	33
3.1	MATERIAIS.....	33
3.1.1	ÁGUA	33
3.1.2	CIMENTO.....	33
3.1.3	AGREGADOS	35
3.1.3.1	Agregado Graúdo.....	35
3.1.3.2	Agregado Miúdo	37
3.1.4	ADITIVO	39
3.1.5	ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM GRUPO CARBONILA (CGO) 40	
3.2	DOSAGEM DO CONCRETO.....	41
3.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	41
3.4	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	43
3.5	MÉTODO DE ENSAIO	48
3.5.1	ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA	48
3.5.2	ENSAIOS DE ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E MASSA ESPECÍFICA REAL	52
3.5.3	ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO (VPU) 53	

3.5.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	54
3.5.5	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	56
3.5.6	ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO	57
3.5.7	ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	59
3.5.8	ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X	61
4	RESULTADOS	62
4.1	ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA	62
4.2	ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA REAL	64
4.3	ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO (VPU)	72
4.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	74
4.5	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	77
4.6	ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO	79
4.7	ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	82
4.8	ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	87
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
5.1	SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O concreto é o material mais utilizado no mundo após a água (Carvalho *et al.*, 2023) com uma produção superior a 20 bilhões de toneladas anualmente (Gencel *et al.*, 2021). Isso ocorre em função de suas propriedades no estado endurecido, como a resistência mecânica, e sua facilidade de execução e baixo custo associado (The European Cement Association, 2021).

A composição do concreto convencional é feita por materiais essenciais como água, aglomerantes e agregados. Dentre esses componentes, os agregados assumem a maior proporção, representando aproximadamente 85% do volume total da mistura (Martins *et al.*, 2021). Os agregados são insumos comercialmente mais acessíveis e, devido sua grande participação na mistura de concreto, são responsáveis por reduzir o valor comercial da mistura e facilitar o acesso à esta tecnologia (Guimarães Aureliano, 2018).

A história do concreto é iniciada no Egito Antigo, com construções que levavam uma espécie de gesso calcinado, passando por Roma antiga com o uso de massa obtida pela hidratação de cinzas vulcânicas para fazer aquedutos e estradas, até culminar na Inglaterra no ano de 1756, quando John Smeaton desenvolve uma mistura de agregado graúdo e cimento para construir o Farol de Eddystone (Battagin, 2009). A partir desse momento, o desenvolvimento do concreto tem progredido junto com o avanço da construção civil, resultando em edifícios cada vez mais altos, mais complexos e com arquiteturas mais arrojadas, demandando níveis superiores de resistência (Lima *et al.*, 2014).

Os avanços significativos na tecnologia do concreto resultaram do emprego efetivo de aditivos (Aïtcin e Flatt, 2015). Nesse sentido, os aditivos químicos são cruciais na inovação da construção civil, posto que modificam características do concreto em diferentes estados e potencializam suas propriedades físicas e mecânicas (Bastos, 2016). Segundo Mehta e Monteiro (2014), a maioria do concreto produzido contém um ou mais aditivos/adições. Os autores estimam que entre 80% a 90% do concreto produzido em países desenvolvidos tem aditivos químicos.

Nesse contexto, a característica de resistência ao fogo é fundamental para assegurar a durabilidade do material e a segurança dos usuários, pois o ataque ao fogo afeta as propriedades mecânicas e microestruturais do concreto (Nasser *et al.*, 2022). Vale destacar que a NBR 14432

(2001) estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os edifícios para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural. Assim, especifica o tempo mínimo de resistência ao fogo (TRRF), de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão para cada tipo de uso da edificação. O período de evacuação total varia de 30 a 120 minutos, de forma que garanta a segurança dos usuários. Posto isto, é imperativo o aprofundamento de estudos e desenvolvimentos tecnológicos nesta área.

Assim concatena-se ao exposto o advento de nanomateriais aplicados a matrizes cimentícias. Verma, Chowdhry e Chakrabarti (2023) estudaram o efeito da adição de nanomaterial baseado em nanofolhas de óxido de grafeno altamente reduzido (rGO) em compósitos de cimento, observando um aumento significativo na resistência mecânica e formação de uma microestrutura compacta. O estudo de Strapasson, Zicatto, *et al.* (2021) investigou os efeitos da adição de nanossílica ao concreto de alta resistência em proporções de 1,5% e 3,0% em relação à massa de cimento. Apenas o teor de 3,0% mostrou efeitos significativos, especialmente no módulo de elasticidade. Motta (2023), analisou a adição de nanotubos de carbono (NTCs) funcionalizados e não funcionalizados nas propriedades de concretos submetidos a temperaturas elevadas, concluindo que a adição de NTCs funcionalizados melhoram o comportamento mecânico do concreto no início da exposição a altas temperaturas.

Parveen, Rana, & Figueiro (2013) descrevem que os nanomateriais de carbono apresentam um grande grupo de materiais funcionais com propriedades físicas excepcionais, como a alta resistência à tração e alta condutividade térmica. Em matrizes cimentícias, os nano-materiais podem aprimorar as propriedades mecânicas e sua durabilidade (Han *et al.*, 2015).

Diversos estudos demonstram o potencial de aplicação de nanomateriais de carbono no concreto (Sheik *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2017). Até o momento, foi identificado na literatura estudos aplicados ao concreto que utilizam nano-tubos de carbono (Carriço *et al.*, 2018; Motta, 2023), óxido de grafeno em conjunto com nanotubos (Gao *et al.*, 2019), nanoplaquetas de óxido de grafeno (Mokhtar *et al.*, 2017), óxido de grafeno em concreto com resíduos de construção civil (Sogayar, Dias e Pereira, 2021). Outras inovações tecnológicas também visam potencializar as propriedades do concreto, como a utilização de inteligência artificial para definição do melhor traço da mistura (Rodrigues, 2018), a adição de materiais que desempenham papel de filler (Carvalho *et al.*, 2023) e o estudo de ligantes alternativos ao cimento Portland, como os ligantes geopoliméricos (Carvalho *et al.*, 2023)

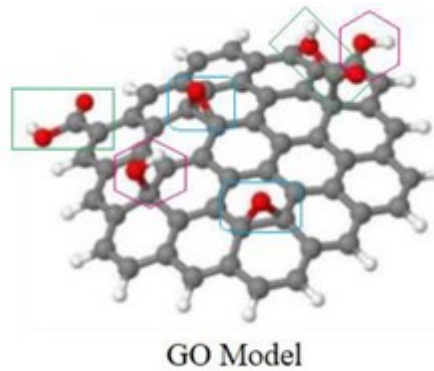
Nesse sentido, é notável que os incêndios em empreendimentos civis têm aumentado nos últimos anos, o que resulta em incalculáveis perdas (Xu *et al.*, 2021). Em fevereiro de 2024, um incêndio no Galpão do Porto de Santos durou mais de 30 horas, levando ao desabamento da estrutura e colocando outras partes do galpão em risco (CNN BRASIL, 2024). Em dezembro de 2023, um incêndio em um prédio de 15 pavimentos em Belo Horizonte resultou em 15 vítimas, com danos significativos em três pavimentos (CNN BRASIL, 2023). Outro incêndio ocorreu na cabine de força do subsolo do Edifício Itália, que se alastrou pelo pavimento do um prédio histórico de 40 andares, localizado no Centro de São Paulo (G1, 2024).

O Corpo de Bombeiros de Minas Gerais determina que os materiais expostos ao fogo devem resistir a uma temperatura característica de 600°C (CBMMG, 2022). Foi observado que os demais Corpos de Bombeiro dos outros estados do Brasil não determinam a temperatura característica, mas asseguram que o material deve resistir tempo suficiente para a evacuação segura do estabelecimento.

Nesse aspecto, o estudo de concretos expostos à elevadas temperaturas é identificado na literatura (Tufail *et al.*, 2017). Foram detectadas pesquisas que versam sobre os efeitos da adição de fibras de basalto (Wang *et al.*, 2016), de aço e de vidro em concretos submetidos a elevadas temperaturas (Moghadam e Izadifard, 2020). Também foram identificados estudos que avaliam as propriedades de concretos com incorporação de óxido de grafeno em situações de incêndio, Ren, Bai, *et al.* (2024) estudou as propriedades mecânicas de impacto e estrutura de poros do concreto de óxido de grafeno em alta temperatura.

Salienta-se que este tipo de óxido de grafeno (GO) é derivado do grafeno e composto de uma estrutura bidimensional, formada de uma única camada de átomos de carbonos unidos de maneira hexagonal (Yang *et al.*, 2017). O GO possui diversos grupos funcionais, como epóxidos, cetonas, carbonilas, hidroxilas e carboxílicos (Li *et al.*, 2016). Além disso, o GO (Figura 1) possui natureza hidrofílica, elevada superfície específica, alta condutividade térmica, resistência mecânica e rigidez (Yang *et al.*, 2017).

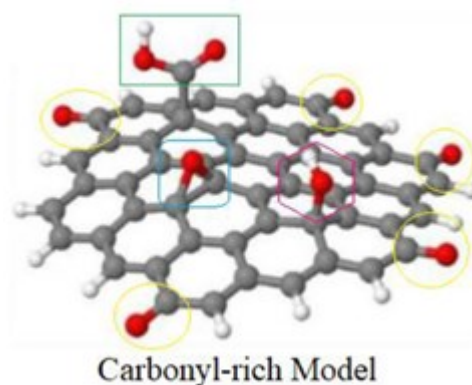
Figura 1 - Representação gráfica da estrutura do óxido de grafeno. Esferas cinzas, vermelhas e brancas representam os carbonos, oxigênios e hidrogênios, respectivamente.



Fonte: Adaptado de De Lima *et al.* (2020).

Por sua vez, Rosa (2023) estudou um novo tipo de óxido de grafeno, com uma cadeia carbônica ramificada e rica em carbonila (CGO). O CGO foi incorporado ao concreto nas concentrações de 0,02%; 0,03% e 0,05% e foi identificado os melhores resultados para a concentração de 0,02% no estado endurecido e em temperatura ambiente (Rosa, 2023). Segundo Rosa (2023), a incorporação do CGO aumentou a resistência à compressão axial do concreto em 33,2%, à tração em 17,9% e elevou o módulo de elasticidade estático em 28,1%. Além disso, ocorreu a redução da massa específica do concreto em 1,2%, tornando-o sutilmente mais leve (Rosa, 2023).

Figura 2 - Representação gráfica da estrutura do óxido de grafeno rico em carbonila. Esferas cinzas, vermelhas e brancas representam os carbonos, oxigênios e hidrogênios, respectivamente.



Fonte: Adaptado de De Lima *et al.* (2020).

Diante disso, o presente trabalho visa identificar os efeitos da adição de 0,02% de óxido de grafeno tipo CGO no concreto submetido ao ataque de altas temperaturas (300° C, 600°C e 900°C). Para isso, o Grupo de Nanociências e Nanotecnologia (Nano) do Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) desenvolveu óxido de grafeno por meio do método de Hummers, o que resultou em um material rico em grupos de carbonila (CGO),

conforme relatado por De Lima (2017). Este trabalho inova ao avaliar o comportamento termomecânico do concreto com esta adição, sendo isto, algo inédito na literatura.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo e desenvolvimento de novos avanços em matrizes cimentícias especiais visam superar os déficits existentes nos concretos convencionais (Barboza e Filho, 2018). Nesse aspecto, um grande desafio das estruturas de concreto é resistir a condições adversas, como elevadas temperaturas. Além disso, o estudo de nanotecnologia aplicadas ao concreto é emergente ao redor do mundo e deve ser encorajado, sobretudo, para viabilizar concretos mais duráveis e resistentes.

A adição de óxido de grafeno a matrizes de cimento Portland é um conhecimento ainda pouco explorado na literatura, especialmente diante da perspectiva de ataques em elevadas temperaturas. Ademais, salienta-se que os incêndios em edificações são comuns em todo mundo, e acredita-se que apenas 1/3 desses eventos são registrados (CTIF, 2012).

Acrescenta-se a este exposto os novos óxidos de grafeno que estão sendo desenvolvidos, como o rico em carbonila sintetizado pelo Grupo de Nanociências e Nanotecnologia (Nano) da Universidade Federal de Juiz de Fora. Dado o pioneirismo na produção deste material, sua adição em concretos e avaliação em altas temperaturas é inédita e busca apresentar a literatura e corroborar para o desenvolvimento de novas tecnologias, mais duráveis e sustentáveis para a indústria da construção.

Além das justificativas apresentadas, é impreterível mencionar que este trabalho busca estimular o avanço da nanotecnologia dentro de pesquisas da UFJF, em um primeiro momento, e de todo o Brasil, posteriormente. Além disso, esta pesquisa acrescenta a literatura ao explorar os conceitos da nanotecnologia por meio uma análise ampla, que aborda os aspectos físicos, mecânicos, microestruturais e cristalográficos, oferecendo também uma perspectiva sustentável diante do desenvolvimento do material.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade técnica de adicionar o óxido de grafeno rico em grupos de carbonila (CGO), fornecido pelo grupo Nano da UFJF, ao concreto de 35 MPa submetidos a gradiente de temperatura (TA, 300°C, 600°C e 900°C).

1.3.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Analisar a condutividade térmica do concreto com adição de 0,02% CGO;
- Avaliar o comportamento termomecânico do concreto desenvolvido;
- Determinar os aspectos físicos do concreto diante da exposição térmica;
- Compreender as alterações cristalográficas do concreto desenvolvido nas diferentes temperaturas propostas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste estudo compreende cinco capítulos, que visam proporcionar um melhor entendimento do seu desenvolvimento. O primeiro capítulo, Introdução, contextualiza o tema ao destacar sua relevância na contemporaneidade, apresentando a justificativa de sua importância, os objetivos e a organização do trabalho.

O segundo capítulo é dedicado à apresentação de informações para compreensão dos efeitos das altas temperaturas à mistura de concreto e também do impacto da incorporação do óxido de grafeno convencional e do tipo CGO a este material.

No terceiro capítulo, são detalhados os materiais utilizados na pesquisa, assim como os métodos de ensaio adotados para sua realização, com referências às normas técnicas pertinentes.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados e oferece análises embasadas nos dados da literatura.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões deste trabalho, detalhando as principais descobertas e lacunas que podem ser sanadas em trabalhos futuros.

2 CONCRETO, TEMPERATURA E ÓXIDO DE GRAFENO

2.1. CONCRETOS SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

As temperaturas elevadas provocam alterações mineralógicas, deterioração da resistência à compressão e alterações morfológicas distintas no concreto, afetando seu desempenho (Handoo, Agarwal e Agarwal, 2002). O desempenho do concreto sob exposição a altas temperaturas é influenciado pelo tipo e proporção dos seus componentes, assim como pelas taxas de aquecimento e resfriamento, além da temperatura ambiente (Yao e Lu, 2021).

Em circunstâncias extremas, como elevadas temperaturas, as características do concreto podem sofrer impacto severo, resultando em fissuras, fragmentação, mudanças estruturais e alterações na sua composição química, o que acarreta na diminuição das suas propriedades mecânicas e da sua vida útil (Guo *et al.*, 2024). As alterações físicas observadas no concreto exposto a altas temperaturas compreendem a perda de massa, variação na coloração, aumento da porosidade, formação de fissuras e ruptura (Li *et al.*, 2022).

A parte mais crucial do concreto durante a exposição a altas temperaturas é a pasta de cimento, que constitui a matriz do concreto. A desidratação e decomposição dos produtos de hidratação do cimento, principalmente o silicato de cálcio hidratado (CSH) e o hidróxido de cálcio (CH), são as principais causas da degradação nas propriedades dos compósitos cimentícios (Çavdar, 2012). A Tabela 1 ilustra as alterações que o concreto sofre quando exposto a temperaturas elevadas, conforme descrito por Ribeiro e Tutikian (2018) e a Tabela 2 mostra a mudança de coloração e a condição do concreto conforme a temperatura de exposição, descrito por Cánovas (1984).

Tabela 1 - Transformações no concreto exposto a altas temperaturas.

Temp. (°C)	Transformação
20 a 80	Processo de hidratação acelerado, tendo perda lenta de água capilar e redução das forças de coesão
100	Aumento acentuado na permeabilidade da água
80 a 200	Aumento na taxa de perda da água por capilaridade e desidratação da água não evaporável
80 a 850	Perda da água quimicamente combinada do gel de cimento
150	Primeiro pico de decomposição do C-S-H
300	Ponto de aumento considerável da porosidade e de microfissuras
350	Fragmentação de alguns agregados de rio
374	Ponto crítico da água, liberação das águas livres

400 a 600	Dissociação do Ca(OH) ₂ em CaO e água
573	Transformação dos agregados (quartzo e areias) da forma α para β
550 a 600	Aumento dos efeitos térmicos
700	Descarbonatação do agregado calcário (CaCO ₃) em CaO e CO ₂
720	Segundo pico de decomposição do C-S-H e formação de β -C ₂ -S e β -CS
800	Substituição da estrutura hidráulica por uma cerâmica – modificação das ligações químicas
1060	Início da fusão de alguns constituintes

Fonte: Ribeiro e Tutikian (2018).

Tabela 2 - Evolução do comportamento do concreto em função da elevação de temperatura.

Temperatura em °C	Cor do Concreto	Condição do Concreto
0 a 200	Cinza	Não afetado
300 a 600	Rosa	Razoavelmente bom
600 a 900	Roda e Vermelho	Friável, com alta sucção de água
900 a 1200	Cinza avermelhado	Friável
>1200	Amarelo	Decomposto

Fonte: Cánovas (1984).

Nesse contexto, os estudos de Ren, Bai, *et al.* (2024) que abordam altas temperaturas e o uso de óxido de grafeno, apresentam que a degradação causada por altas temperaturas aumenta as falhas na microestrutura do concreto, tornando-o mais suscetível a deformações sob carga. Essa é a principal razão para a redução do módulo de elasticidade dinâmica e o aumento da deformação última do concreto. As nanopartículas do GO auxiliam a criação de canais em nano e micro escalas que proporcionam a liberação de pressão e vapor e evitam o desenvolvimento de trincas e lascamentos, o fenômeno denominado de *spalling* (Mohammed *et al.*, 2017). Devido à otimização da estrutura dos poros do concreto pelo GO, as propriedades mecânicas de impacto do GO em alta temperatura foram significativamente aprimoradas em comparação com o concreto convencional (Ren *et al.*, 2024).

2.2 ÓXIDO DE GRAFENO

O grafeno é um material bidimensional versátil com aplicações que não se limitam apenas a dispositivos eletrônicos. É uma matéria-prima muito procurada, porém possui desvantagens na preparação, como os desafios de produzir em quantidade escalável e de garantir a segurança requerida pelo produto (Nayming *et al.*, 2011)

Para superar esse desafio, o óxido de grafeno (GO) surgiu como uma alternativa promissora, possuindo propriedades hidrofílicas devido à presença de grupos funcionais (Puliyasseri *et al.*, 2024). Esses grupos interagem prontamente com moléculas de água, aumentando significativamente a hidrofiliabilidade do GO e facilitando processos rápidos de absorção ou dessorção de umidade (Gao, 2015). Destacam-se a presença dos grupos hidroxila (-OH), epóxi (COC), carboxila (-COOH) e carbonila (CO) (Vicentini, 2019). Essa característica hidrofílica desempenha um papel fundamental na sinergia do óxido de grafeno em matrizes cimentícias (Stankovich *et al.*, 2006), uma vez que apresenta o potencial de aprimorar as propriedades da mistura (Carvalho *et al.*, 2023). Posto isso, nos próximos subitens são apresentados os efeitos do GO nas matrizes cimentícias, bem como é dissertado quanto ao óxido de grafeno rico em carbonila.

2.2.1 ÓXIDO DE GRAFENO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

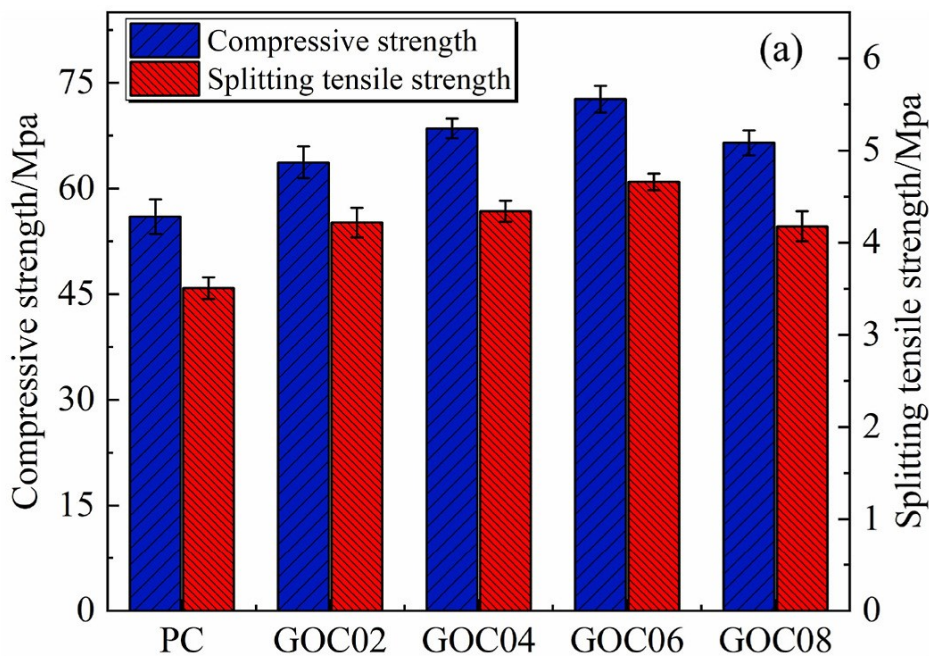
O GO apresenta propriedades mecânicas excepcionais, é altamente dispersível em água e possui um baixo custo, tornando-o um material atrativo para ser adicionado aos compósitos de cimento (Hou *et al.*, 2017). Além disso, o GO por meio de seus grupos funcionais é hidrofílico, tornando-o factível sua participação na hidratação do cimento Portland (Li *et al.*, 2016). Como consequência o GO pode corroborar para as propriedades mecânicas das matrizes cimentícias (Li *et al.*, 2016).

Segundo Chuah, *et al.* (2018), experimentos de flexão foram realizados para destacar a importância do protocolo de fabricação nas propriedades mecânicas dos compósitos de cimento com GO. O resultado mostra que a quantidade de 0,03% de GO em peso de cimento pode aumentar a resistência à flexão do compósito de cimento GO em até 67%. Conforme mostrado na pesquisa de Lin, Wei e HU (2016), um dos papéis mais importantes do GO na pasta de cimento é que os grupos funcionais podem fornecer pontos e planos de crescimento para produtos de hidratação do cimento, ou seja, CSH e Ca(OH)₂.

Ren, Bai, *et al.* (2024) estudaram as propriedades mecânicas e a estrutura física, com análise dos poros do concreto com óxido de grafeno em alta temperatura. Para isso, os autores utilizaram quatro dosagens diferentes de GO, sendo elas: 0,02%, 0,04%, 0,06% e 0,08% da quantidade de cimento e que foram representadas, respectivamente, pelas amostras GOC02, GOC04, GOC06, GOC08, além do grupo de controle denominado PC. Então as amostras foram submetidas a diferentes gradientes de temperatura, sendo eles: 20 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C

e 800 °C. A respeito das propriedades mecânicas, pode-se observar no Figura 3 que a resistência à compressão estática do concreto dopado com GO é maior do que a do grupo de controle. Isso mostra que o GO pode melhorar significativamente o desempenho de compressão do concreto. Por meio da Figura 3, pode-se observar que o aumento no desempenho da resistência à compressão ocorre até a adição de 0,06%, ocorrendo um decréscimo nas amostras de 0,08%. Comparado com o PC, a resistência à compressão estática do GOC06 aos 28 dias aumentou em 30%. A mudança na resistência à tração por cisalhamento é aproximadamente equivalente à da resistência à compressão.

Figura 3 - Resultados Ensaio de Resistência a Compressão e Resistência a Tração por Cisalhamento.



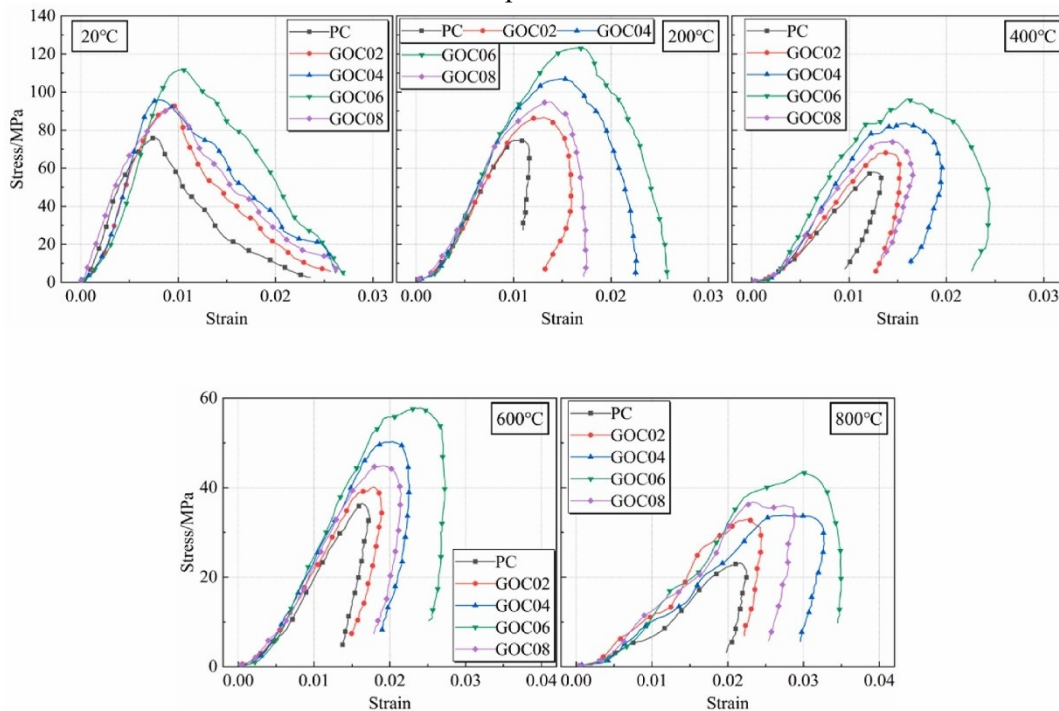
Fonte: Ren, Bai, *et al.* (2024).

O excelente desempenho do GOC06 é principalmente devido à boa dispersão de GO dentro do concreto quando a dosagem é de 0,06% (Ren *et al.*, 2024). Nesse estado disperso, o GO pode desempenhar plenamente seu papel sem aglomeração, o que levaria a uma diminuição de sua eficiência (Ren *et al.*, 2024).

A Figura 4 apresenta as curvas de tensão-deformação desenvolvidas por Ren *et al.*, (2024). É possível notar que a temperatura e o teor de GO são os principais fatores que afetam o formato desta curva. Quanto mais elevada a temperatura, maior é a inclinação da seção de declínio, indicando que o corpo de prova é rapidamente deteriorado e descarregado após atingir o pico de estresse. Nessa etapa, a seção de declínio predominantemente reflete o processo de

deformação plástica do material de concreto após atingir o pico de estresse, sendo que uma inclinação significativa nessa seção sugere uma baixa capacidade de suporte do concreto após o início da falha (Ren *et al.*, 2024). Entre 200 °C e 600 °C, antes de o corpo de prova atingir o ponto de cedência, a curva tensão-deformação pode ser aproximada por uma linha reta, indicando que o concreto, nesse estágio, está sujeito a deformação elástica (Ren *et al.*, 2024). No entanto, quando a temperatura alcança os 800 °C, a curva tensão-deformação do corpo de prova antes do ponto de cedência não exibe linearidade evidente, sugerindo que, nessa faixa de temperatura, o concreto não apresenta mais as características de deformação elástica na seção de aumento da curva.

Figura 4 - Curva tensão-deformação de cada grupo de corpos de prova sob carga de impacto em alta temperatura.

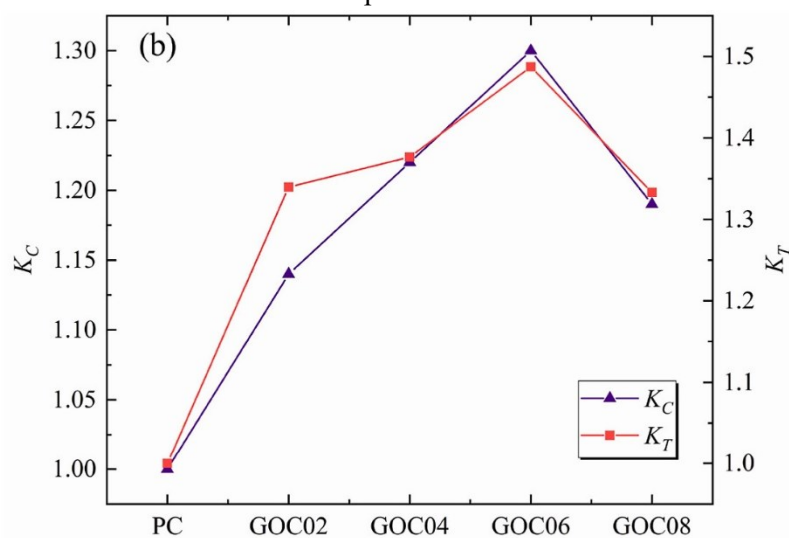


Fonte: Ren, Bai, *et al.* (2024).

Conforme ilustrado na Figura 5, a resistência de cálculo do concreto ($f_{c,d}$) é influenciada pela interação entre temperatura e GO. De maneira geral, o $f_{c,d}$ dos corpos de prova diminui gradualmente com o aumento da temperatura. No entanto, quando a temperatura alcança 200 °C, o $f_{c,d}$ de GOC04, GOC06 e GOC08 aumenta. A 200 °C, o $f_{c,d}$ de PC e GOC02 diminui. Sob temperaturas inferiores à temperatura crítica, o efeito de degradação térmica não é pronunciado, conforme aferido na Figura 5. Contudo, quando a temperatura excede a temperatura crítica e continua a aumentar, o $f_{c,d}$ inicia um declínio rápido. Observa-se ainda

que o teor de GO também influencia o $f_{c,d}$ do concreto em ambientes de alta temperatura. À mesma temperatura, o $f_{c,d}$ do concreto aumenta inicialmente com o aumento do teor de GO, seguido de uma diminuição. Quando a dosagem de GO atinge 0,06%, o $f_{c,d}$ é maximizado, registrando um aumento de 61,3% em comparação com o grupo PC. Por outro lado, o $f_{c,d}$ do grupo GOC06 aumenta em 47,3% em relação ao grupo PC em temperatura ambiente, evidenciando que o GO tem um efeito mais expressivo na melhoria da resistência ao impacto do concreto em altas temperaturas.

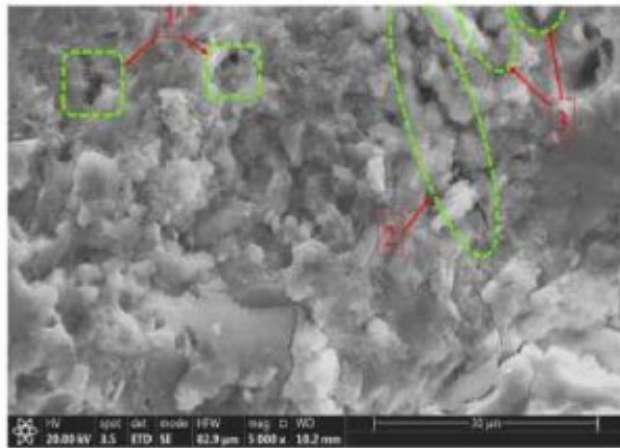
Figura 5 - Resultados Ensaio de Resistência a Compressão com corpos de prova submetidos a altas temperaturas.



Fonte: Ren, Bai, *et al.* (2024).

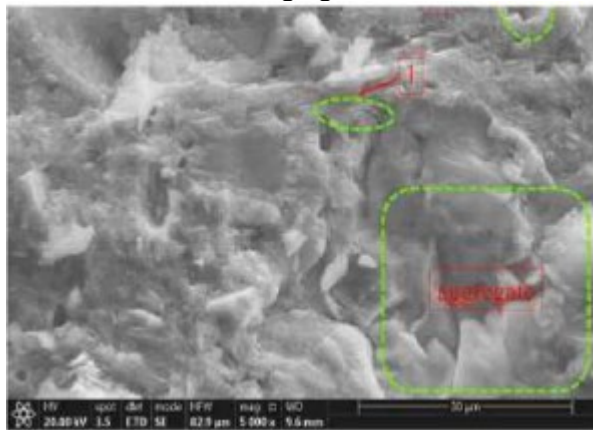
Ren, Bai, *et al.* (2024) apresentam a morfologia microscópica do concreto com uma ampliação de 5.000 vezes. Pode-se observar na Figura 6 a presença de cristais de hidrato desordenados e soltos no concreto do grupo PC, bem como falhas e fissuras causadas pela hidratação insuficiente e pela disposição frouxa dos hidratos. Esses defeitos, que reduzem significativamente o desempenho do concreto, são os locais onde o concreto começa a se deteriorar (Ren *et al.*, 2024). A Figura 7 mostra a morfologia da pasta de cimento do concreto após a adição de GO. Após a adição de GO, a compactidade do concreto é consideravelmente melhorada, e as fissuras iniciais na pasta de cimento são significativamente reduzidas. Não são encontrados cristais de hidrato desordenados na pasta de cimento (Ren *et al.*, 2024).

Figura 6 - Micromorfologia do concreto do grupo PC: 1. Cristais de hidrato desordenados e frouxamente dispostos; 2. Rachaduras; 3. Buracos.



Fonte: Ren, Bai, *et al.* (2024).

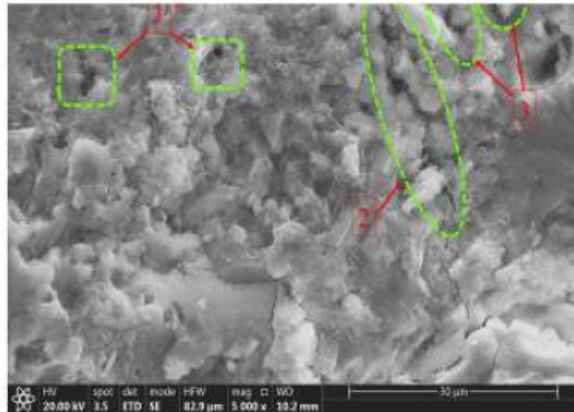
Figura 7 - Micromorfologia do concreto do grupo GOC: 1. Fissuras sob carga; 2. Buracos após queda do agregado.



Fonte: Ren, Bai, *et al.* (2024).

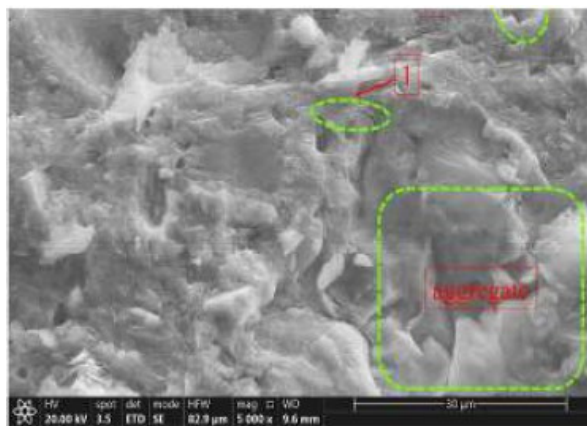
Ren, Bai, *et al.* (2024) apresentam a morfologia microscópica do concreto em ampliações de 10000 e 30000 vezes. Na Figura 8 o cristal filiforme é o produto de hidratação do cimento, que se tornou o elo fraco da pasta de cimento. Os buracos com preenchimento de hidratação insuficiente estão distribuídos em várias partes da pasta de cimento. O crescimento desordenado e a distribuição desordenada dos cristais de hidrato de cimento tornaram-se uma razão importante para a fragilidade do concreto (Devi e Khan, 2019). Pode-se observar na Figura 9 que, sob a ação do GO, o cristal de hidróxido de cálcio pode crescer de forma ordenada, obtendo-se um cristal forte com direcionalidade óbvia. Os hidratos de cimento se acumulam e se interligam na superfície do GO, desenvolvendo-se em cristais densos semelhantes a flores, o que aumenta significativamente a compacidade da pasta de cimento (Ren *et al.*, 2024).

Figura 8 - Micromorfologia do concreto do grupo PC: 1. Cristais de hidrato desordenados e frouxamente dispostos; 2. Rachaduras; 3. Buracos.



Fonte: Ren, Bai, *et al.* (2024).

Figura 9 - Micromorfologia do concreto do grupo GOC: 1. Fissuras sob carga; 2. Buracos após queda do agregado.

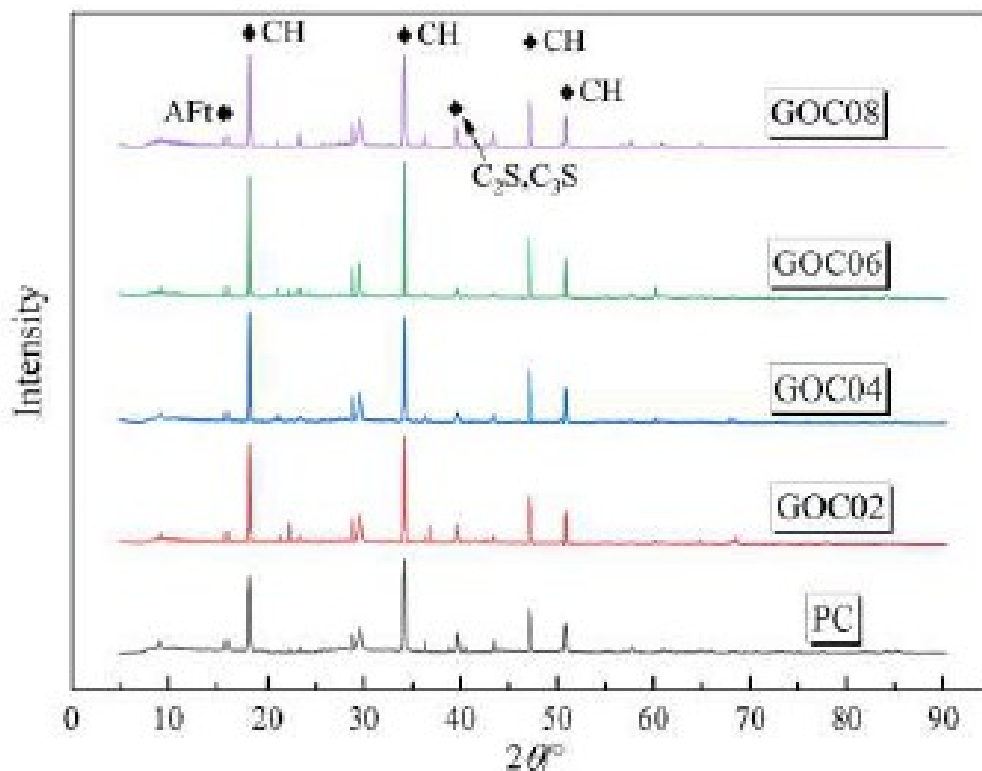


Fonte: Ren, Bai, *et al.* (2024).

Por meio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi concluído, por Ren, Bai, *et al.* (2024), que a temperatura é o principal fator que afeta o conteúdo e a composição dos poros no concreto. Com o aumento da temperatura, os poros no concreto tendem a se desenvolver em direção à falha irreversível, segundo os autores. Assim, adição de GO pode reduzir a quantidade de poros no concreto tanto em temperatura ambiente quanto em alta temperatura, refinando os poros do concreto (Ren *et al.*, 2024). Logo, em condições de alta temperatura, a adição de GO irá inibir o desenvolvimento de poros prejudiciais e mais danosos no concreto. A análise de correlação cinza mostra que o $f_{c,d}$ do concreto em altas temperaturas está intimamente relacionado ao conteúdo de poros mais danosos, o que indica que o GO pode desempenhar um papel de fortalecimento ao reduzir o número de poros prejudiciais no concreto em alta temperatura (Ren *et al.*, 2024).

A Figura 10 apresenta o ensaio de Difração de Raios X (DRX), desenvolvido por Ren, Bai, *et al.* (2024). É possível observar que as posições dos picos de difração característicos de cada grupo de amostras são iguais, indicando que o tipo de produtos de hidratação do cimento não será alterado após a adição de GO. As intensidades dos picos característicos de C2S e C3S em cada grupo são relativamente baixas, o que indica que a hidratação do cimento é relativamente satisfatória (Ren *et al.*, 2024). Nota-se que as intensidades dos picos característicos de C2S e C3S dos corpos de prova com diferentes teores de GO são ligeiramente diferentes. As intensidades dos picos característicos dos corpos de prova no grupo GOC06 são as mais baixas, indicando que a taxa de hidratação do cimento deste grupo de corpos de prova é a mais rápida. Isso ocorre principalmente porque, quando a dosagem é de 0,06% de GO têm o melhor efeito de dispersão, o que é uma garantia importante para promover a hidratação do cimento (Ren *et al.*, 2024). Nota-se na Figura 10 que existem quatro picos característicos de CH (hidróxido de cálcio). Por meio de comparação, pode-se observar que o pico característico de CH do grupo GOC é mais forte e mais nítido do que o do grupo PC, indicando que o número de cristais de CH aumenta e a cristalinidade dos cristais de CH é melhorada após a adição de GO ao concreto (Ren *et al.*, 2024).

Figura 10 - Resultados de DRX da amostra.



Fonte: Ren, Bai, *et al.* (2024).

2.2.2 ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM GRUPO CARBONILA

De acordo com Lima, Tavares, *et al.* (2020), o Óxido de Grafeno (GO) é uma substância nanométrica de carbono produzida pela oxidação química do grafite natural na presença de agentes oxidantes poderosos. Sabe-se a que natureza cristalina do grafeno torna a estrutura atômica do GO fortemente dependente da metodologia e do protocolo de oxidação empregado. Dessa forma, conforme De Lima (2017), as alterações químicas e estruturais introduzidas no grafite durante a preparação do GO resultam em mudanças substanciais nas propriedades físicas, que são altamente vantajosas e desejáveis para o grafeno. Assim, embora haja diversos métodos para preparar o grafeno, a esfoliação química do grafite para produzir GO é amplamente reconhecida como um dos métodos mais eficazes para gerar nano-folhas de grafeno em larga escala e com custos reduzidos (Lima *et al.*, 2020).

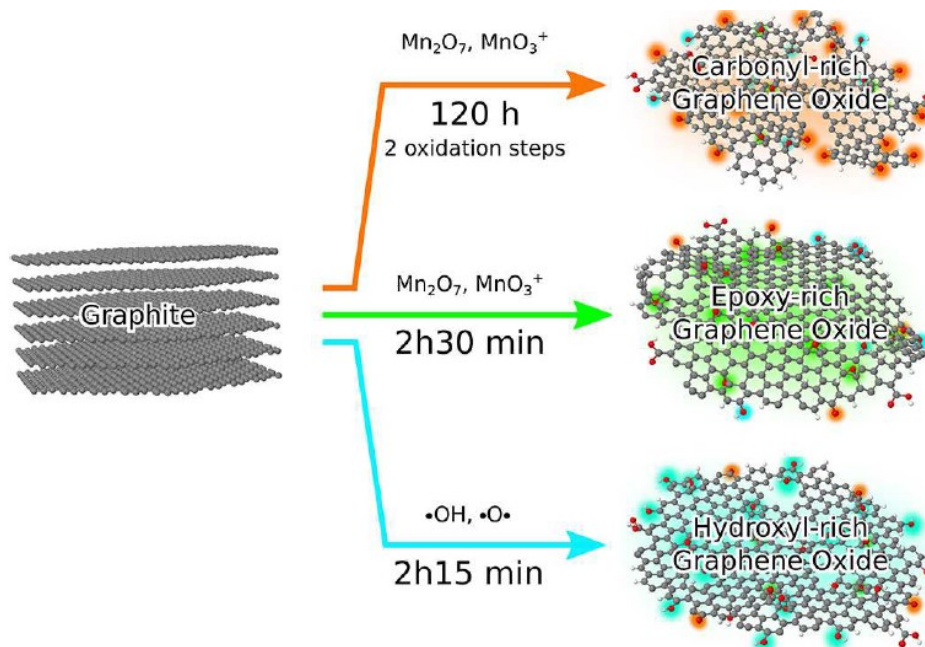
Segundo De Lima (2017), os defeitos estruturais no óxido de grafeno e os grupos oxigenados resultantes do intenso processo de oxidação induzem mudanças em suas propriedades, as quais são geralmente inferiores às do grafeno. Entretanto, é viável eliminar grande parte desses grupos oxigenados e regular sua quantidade e distribuição, de modo a aproximar as propriedades do óxido de grafeno às do grafeno puro (De Lima, 2017).

Nesse aspecto, o óxido de grafeno rico em grupos carbonila (CGO) é obtido por meio de uma série de adaptações do método de Hummers, conforme proposto pelo grupo Nano-UFJF. Os procedimentos para a produção desse material estão descritos tecnicamente na tese de doutorado de De Lima (2017), no Programa de Pós-Graduação em Física da UFJF, onde também são explicadas e justificadas as alterações feitas no método original. Além disso, Lima, Tavares, *et al.* (2020), apresenta uma continuação deste trabalho onde introduz detalhes como as propriedades elétricas, ópticas e espectroscópicas de diferentes amostras de Óxido de Grafeno (GO), com foco em novas estratégias oxidativas para ajustar suas propriedades físico-químicas e produzir o CGO.

Lima, Tavares, *et al.* (2020), descrevem a síntese do CGO em dois passos de oxidação. No primeiro passo, grafite, nitrato de sódio e ácido sulfúrico são misturados e agitados em um banho de gelo, seguido pela adição lenta de permanganato de potássio e agitação por 120 horas. No segundo passo, uma solução de ácido sulfúrico é adicionada lentamente à mistura aquecida e agitada a 98 °C por mais 2 horas. O processo é interrompido com peróxido de hidrogênio e o GO purificado é obtido após lavagens com ácidos e água deionizada. Na Figura 11, demonstra-

se o as condições de oxidação empregadas na preparação dos GOs enriquecidos em carbonila, epóxi e hidroxila, por meio de modificações do método de Hummers.

Figura 11 - Representação esquemática das condições de oxidação utilizadas para preparar os GOs ricos em carbonila, epóxi e hidroxila usando modificações do método de Hummers.



Fonte: Lima, Tavares, *et al.* (2020).

A produção de GO com modificações do método de Hummers possui um processo de síntese com reagentes de menor potencial explosivo e também são menos tóxicos do que outras metodologias conhecidas (De Lima, 2017). Vale destacar que as alterações realizadas durante a síntese do GO permitiram a formação de um material com grandes grupos oxigenados carbonila (C=O), uma composição estequiométrica diferente da até então proposta na literatura.

As mudanças químicas e estruturais resultantes das adaptações no método de Hummers causam alterações nas propriedades físicas do grafeno, resultando em elementos com características distintas. Isso pode levar a diferentes efeitos ao serem aplicados em diversos contextos, com alguns óxidos apresentando vantagens sobre outros em situações específicas. No entanto, até o momento, não houve estudos sobre a inclusão do óxido de grafeno rico em grupos de carbonila, produzido pelo grupo Nano-UFJF, no concreto. Considerando que essa variação possui propriedades diferentes do óxido de grafeno produzido de forma convencional, é de grande interesse investigar essa adição para avaliar seu comportamento de forma comparativa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

Neste capítulo, são apresentados os detalhes de todos os materiais empregados na produção do concreto, seguindo as diretrizes das Normas Brasileiras ou baseando-se em informações fornecidas pelos respectivos fornecedores.

As análises para caracterização dos materiais e os testes de resistência mecânica foram conduzidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Faculdade de Engenharia da UFJF. As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e de Difração de Raio X (DRX), foram realizados no Laboratório NanoLab da Universidade Federal de Ouro Preto e Laboratório de Microscopia Eletrônica do ICE da UFJF.

O Óxido de Grafeno Rico em Carbonila utilizado foi sintetizado pelo grupo Nano, do Departamento de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Adicionalmente, neste mesmo capítulo, são detalhadas a dosagem do concreto utilizada na condução desta pesquisa, juntamente com a sequência experimental, facilitando a replicação deste estudo em futuros trabalhos complementares.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 ÁGUA

De acordo com Oliveira (2020), a água desempenha o papel crucial de hidratar o cimento, promovendo a ligação dos demais componentes que conferirão as propriedades de resistência e durabilidade ao concreto. Além disso, a água contribui para a trabalhabilidade e maleabilidade da mistura do material, cujo volume necessário no concreto varia conforme a proporção dos demais elementos. (Bamforth, 2011).

Para essa pesquisa, a água empregada na preparação da mistura do concreto e na imersão dos corpos de prova é fornecida pela rede pública de abastecimento, sob gestão da Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora - MG (CESAMA).

3.1.2 CIMENTO

O cimento é um aglomerante hidráulico, que quando hidratado reage não somente endurecendo, mas formando produtos resistentes a ação da água (Andolfato, 2002). O cimento Portland é o principal aglomerante hidráulico utilizado na confecção de produtos de concreto na construção

civil, tendo a função de manter a coesão dos componentes do concreto, unindo-os e produzindo uma peça de comportamento monolítico (Assunção, Almeida e Gomes, 2021).

Na pesquisa, o cimento utilizado é o Cimento Portland CPV ARI Plus da Holcim do Brasil S.A, conforme Figura 12. Sua principal característica é o fornecimento de um aumento substancial na resistência nas primeiras idades após a cura, atingindo uma resistência mínima à compressão de 51 MPa após 28 dias de cura. O CPV ARI é altamente valorizado em pesquisas devido à sua menor suscetibilidade a interferências de variáveis externas desconhecidas. As análises físicas e químicas fornecidas pelo fabricante descrevem o material da seguinte maneira:

a) Análise física:

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

b) Análise química:

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

- Óxido sulfúrico, $\text{SO}_3 = 1,50\%$;
- Dióxido de carbono, $\text{CO}_2 = 0\%$;
- Óxido de potássio, $\text{K}_2\text{O} = 0,89\%$.

Figura 12 - Cimento Portland CPV ARI Plus da Holcim do Brasil S.A.



Fonte: Autora (2024).

3.1.3 AGREGADOS

Foi utilizado apenas um tipo de agregado miúdo e um tipo de agregado graúdo na composição do concreto, conforme metodologia preconizada por Rosa (2023). De acordo com Mehta e Monteiro (1994), os agregados têm um custo relativamente baixo e ocupam uma proporção significativa em relação ao volume total do concreto.

3.1.3.1 Agregado Graúdo

A pesquisa utiliza como agregado graúdo a brita 0 fornecida pela empresa Pedra Sul Mineração, conforme Figura 13. Os ensaios foram conduzidos em duas amostras do material por Rosa (2023), e os resultados médios da análise granulométrica, conforme as diretrizes da norma NBR 17054 (ABNT, 2022), estão disponíveis na Tabela 3.

Figura 13 - Brita 0.



Fonte: Autora (2024).

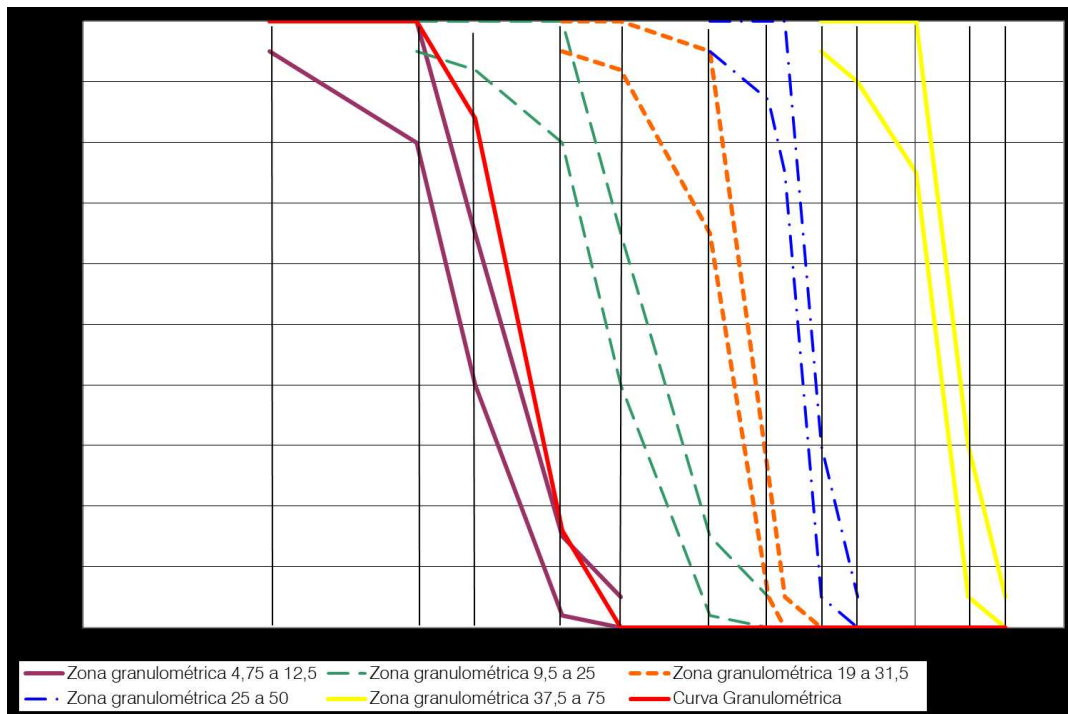
Tabela 3 - Composição Granulométrica Brita 0.

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

Fonte: Rosa (2023).

A Figura 14 mostra os limites das zonas de distribuição granulométrica definidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022), juntamente com a descrição do material utilizado no estudo. Ao analisar o gráfico, é evidente que o agregado em questão está localizado próximo à faixa granulométrica entre 4,72 mm e 12,5 mm, que corresponde à brita 0. Na Tabela 4, são fornecidos os resultados médios de dois testes adicionais de caracterização física, junto com as respectivas normas brasileiras de referência.

Figura 14 - Curva Granulométrica da Brita 0.



Fonte: Adaptado de Rosa (2023).

Tabela 4 - Propriedades físicas brita 0.

Propriedade Física	Resultado	Norma de Referência
Módulo de Finura	6,14	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Dimensão Máxima Característica	12,5 mm	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Densidade – condição saturada superfície seca	2,769 g/cm ³	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Densidade – condição seca	2,755 g/cm ²	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Massa Unitária Seca	1,463 g/cm ³	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Material Pulverulento	0,004	NBR 16973 (ABNT, 2021)
Absorção	0,0051	NBR 16917 (ABNT, 2021)

Fonte: Rosa (2023).

3.1.3.2 Agregado Miúdo

Na produção do concreto, foi empregado como agregado miúdo, a areia natural originária do Rio Preto, conforme Figura 15. Rosa (2023) realizou ensaios em duas amostras desse material, e os resultados médios da análise granulométrica, de acordo com a norma NBR 17054 (ABNT, 2022), são expostos na Tabela 5.

Figura 15 - Areia Natural.



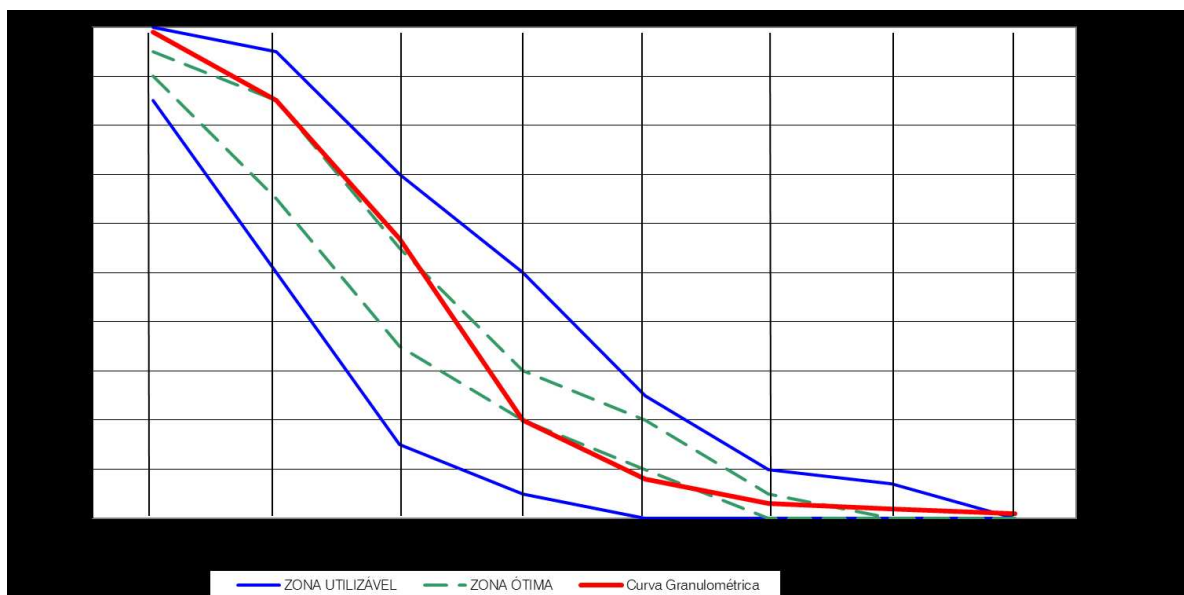
Fonte: Autora (2024).

Tabela 5 - Composição granulométrica Areia Natural.

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

Fonte: Rosa (2023).

Figura 16 - Curva Granulométrica Areia Natural.



Fonte: Adaptado de Rosa (2023).

Na Figura 16, são delineados os limites das zonas de utilização e ótima para agregados miúdos conforme estabelecido pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022), juntamente com a caracterização do material utilizado no estudo, o qual está em conformidade com essa norma. Na Tabela 6, são apresentados os resultados médios de dois ensaios adicionais de caracterização física, acompanhados das respectivas Normas Brasileiras de referência.

Tabela 6 - Propriedades físicas Areia Natural.

Propriedade Física	Resultado	Norma de Referência
Módulo de Finura	2,69	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Dimensão Máxima Característica	4,8 mm	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Massa Específica	2,656 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa Unitária Seca	1,483 g/cm ²	NBR 16973 (ABNT, 2021)
Argila em torrões	4,575%	NBR 7218 (ABNT, 2019)
Material Pulverulento	1,04%	NBR 16973 (ABNT, 2021)
Matéria orgânica	≤ 300 ppm	NBR NM 49 (ABNT, 2001)

Fonte: Rosa (2023).

3.1.4 ADITIVO

Zeyu *et al.* (20117) afirmam que a adição de GO ao concreto não só reduz a fluidez da pasta de cimento ao capturar os íons divalentes liberados dos hidratos de cimento, mas também acelera o desenvolvimento da hidratação do cimento. Dessa forma, a trabalhabilidade da mistura de cimento é comprometida devido à grande área superficial do nano-material, sendo necessária uma maior quantidade de água (André George Camaliente, 2018).

Como aborda Lv, Deng, *et al.* (2016), a redução da fluidez em matrizes à base de cimento pode ser corrigida ao empregar aditivos que contenham poli carboxilato, com dosagem de quatro vezes a quantidade utilizada de GO, aproximadamente, a fim de garantir uma melhor dispersão do nano-material na mistura (Vallurupalli *et al.*, 2020). Dos aditivos superplastificantes disponíveis, aqueles que são baseados em polímeros sintéticos, como os policarboxilatos (PCE), têm a capacidade de reduzir até 40% da água nas misturas, sendo amplamente utilizados para esse fim (Nkinamubanzi, Mantellato e Flatt, 2016).

Dado que o objetivo principal deste estudo é investigar o impacto do óxido de grafeno no comportamento mecânico do concreto em altas temperaturas, foi escolhido utilizar um aditivo superplastificante em todas as amostras para garantir uma dispersão eficaz do CGO. Para isso, optou-se pelo aditivo ViscoCrete-3535 CB, que é compatível com o cimento CPV ARI da Holcim. Este produto é uma solução aquosa de policarboxilato com propriedades plastificantes. De acordo com informações fornecidas pelo fabricante Sika S.A (2022), a dosagem recomendada para este produto varia de 0,3 a 1,5% em relação à massa dos aglomerantes, e sua densidade é de $1,08 \pm 0,02$ kg/L. Assim, utilizou-se uma dosagem de 0,35% deste aditivo em relação à massa de cimento em todas as amostras. A Figura 17 mostra o aditivo fornecido pela fabricante Sika AS.

Figura 17 - Aditivo ViscoCrete-3535 CB da fabricante Sika AS.



Fonte: Autora (2024).

3.1.5 ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM GRUPO CARBONILA (CGO)

Para conduzir este estudo, o óxido de grafeno rico em grupos carbonila (CGO) foi produzido integralmente pelo grupo Nano da UFJF e, em seguida, disponibilizado para ser incorporado ao concreto. Devido à natureza hidrofílica dos óxidos de grafeno, que possibilita sua dissolução em água, é viável adicioná-los à mistura de concreto. Assim, o grupo Nano forneceu o material por meio de uma solução de CGO em água, com uma concentração de 5mg/ml. Essa quantidade de água foi incluída no cálculo da quantidade total de água, mantendo a proporção água/cimento do traço de concreto.

A solução contendo óxido de grafeno rico em grupos carbonila (CGO) foi disponibilizada em recipientes esterilizados, garantindo a ausência de qualquer risco de contaminação, e com o volume preciso para a fabricação de corpos de prova e placas contendo uma dopagem de 0,02% de CGO em relação à massa de cimento conforme Figura 18. Destacam-se que para a moldagens dos corpos de prova de 0,02% de CGO, foram necessárias 4 unidades 0,02% sobre o peso de

840g cada uma. Durante todo o processo de produção, foram tomadas precauções para assegurar a integridade do recipiente fornecido, possibilitando seu retorno e reutilização pelo grupo Nano sem causar danos.

Figura 18 - Óxido de grafeno rico em grupos de carbonila disperso em água.



Fonte: Autora (2024).

3.2 DOSAGEM DO CONCRETO

O traço do concreto determina a proporção de cada componente em relação à quantidade de cimento, podendo ser expresso em peso ou volume. O traço empregado na pesquisa atual é uniforme para todas as amostras, de 0,02% de CGO. Esse traço é uma adaptação de traços adotados em estudos anteriores desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF (Carvalho *et al.*, 2024) que utilizaram concretos convencionais e foi adotado por Rosa (2023). Os detalhes do traço utilizado são apresentados na Tabela 7

Tabela 7 - Traço utilizados na confecção do concreto.

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

Fonte: Autora (2024).

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O investimento associado à pesquisa para a produção do concreto e óxido de grafeno representa um custo significativo em termos de matéria-prima, considerando que há outros projetos em

andamento nos laboratórios que também demandam esses recursos. Com o intuito de reduzir os custos sem comprometer a qualidade da pesquisa, conforme destacado por Azevedo, Carvalho *et al.* (2020), foram adotadas formas cilíndricas com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Ø50x100 mm), mais conhecidos como corpos de prova de argamassa, resultando em um menor volume de concreto.

Nesse sentido a Teoria da Similitude pode ser aplicada no presente estudo, conforme exposto por Azevedo (2019), considerando-se que a utilização de corpos de prova de Ø50x100 mm para a determinação da resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade pode proporcionar uma economia de até 87,5% de materiais e espaço de armazenamento em relação aos espécimes de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, além de facilidades operacionais.

A partir de estudos desenvolvidos por Rosa (2023), no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da UFJF, foi estabelecido uma dosagem ótima de CGO. Para a autora, apenas a adição de 0,02% de CGO ao concreto resultou em melhorias em todos os parâmetros analisados, com valores significativos, como ensaios de resistência à compressão, resistência a tração e módulo de elasticidade. Partindo desse pressuposto, inicia-se o objetivo desse trabalho: avaliar concretos com incorporação do óxido de grafeno rico em carbonila em uma dopagem ótima de 0,02% de CGO, submetidos a altas temperaturas.

Nesse sentido, foram estabelecidos os gradientes de temperatura para a submissão dos corpos de prova. Assim, destacam-se 300°C, 600°C e 900°C, além da Temperatura Ambiente (TA). Logo, foram produzidos 36 corpos de prova com 0,02% de CGO, onde para cada temperatura, tem-se 9 corpos de prova (Tabela 8). Foram moldados também, 36 corpos de prova como amostras de referências, sem adição de CGO, TA e os 3 gradientes de temperatura (Tabela 9).

Tabela 8 - Corpos de Prova de 0,02% de CGO.

	Temperatura (°C)	Nomenclatura do SubGrupo	Quantidade de corpo de prova de 0,02% de CGO por gradiente de temperatura
0,02% CGO	TA	TA 0,02% CGO	9
	300	300°C 0,02% CGO	9
	600	600°C 0,02% CGO	9
	900	900°C 0,02% CGO	9
	Total: 36		

Fonte: Autora (2024).

Tabela 9 - Corpos de Prova de Referência.

	Temperatura (°C)	Nomenclatura do SubGrupo	Quantidade de corpo de prova de Referência por gradiente de temperatura
REF	TA	TA REF	9
	300	300°C REF	9
	600	600°C REF	9
	900	900°C REF	9

Fonte: Autora (2024).

3.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Para a execução de um traço do concreto, optou-se por utilizar uma argamassadeira devido ao volume relativamente pequeno produzido. Inicialmente, todos os materiais foram pesados e separados. A quantidade de água utilizada na solução aquosa de CGO foi subtraída do volume total. Uma porção da água medida foi então empregada para diluir o aditivo superplastificante na quantidade necessária de acordo com o traço do concreto.

Inicialmente, os agregados graúdo e miúdo foram misturados a seco com o cimento em um tabuleiro de inox até alcançarem uma uniformidade na composição. Em seguida, essa mistura foi transferida para a argamassadeira, onde a água previamente reservada foi adicionada, dando início ao processo de produção do composto. Foi adotada a argamassadeira devido a quantidade reduzida de material e ao agregado graúdo adotado ser brita 0, compatível com o equipamento típico de argamassa que foi adotado. Periodicamente, o equipamento era desligado para remover qualquer material que pudesse aderir nas bordas do recipiente, utilizando-se uma colher de silicone e espátulas para essa tarefa.

Posteriormente, o aditivo diluído em água era introduzido no recipiente da argamassadeira, seguido pela adição do CGO, após agitar manualmente o frasco para evitar a decantação da solução e garantir a preservação do material. A quantidade de água utilizada para diluir o aditivo foi considerada no traço do concreto, de modo a não afetar a relação água/cimento. Todas as formas foram revestidas com desmoldante para facilitar a desmoldagem. A Figura 20, mostra os corpos de prova logo em seguida da moldagem.

Figura 19 - Argamassadeira com a mistura de materiais após a adição do CGO.



Fonte: Autora (2024).

Figura 20 - Corpos de prova após a moldagem.



Fonte: Autora (2024).

O concreto foi moldado de acordo com as diretrizes estabelecidas pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Os corpos de provas foram devidamente identificados e transferidos para a câmara úmida com sua face superior protegida, onde permaneceram curando pelo tempo de 20 h a 24 h para a cura inicial ao ar. Logo em seguida, foram desmoldados como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Desmoldagem dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2024).

Depois, na câmara úmida, os corpos de prova foram submersos em um tanque com água e hidróxido de cálcio, como mostra a Figura 22, assegurando o processo de cura até alcançarem 28 dias de idade. Em seguida, foram retificados, conforme Figura 23, para garantir planicidade e corrigir imperfeições nas superfícies, devendo-se obter a perpendicularidade da superfície obtida com a geratriz do corpo de prova.

Figura 22 - Corpos de Prova Submersos na Câmara Úmida.



Fonte: Autora (2024).

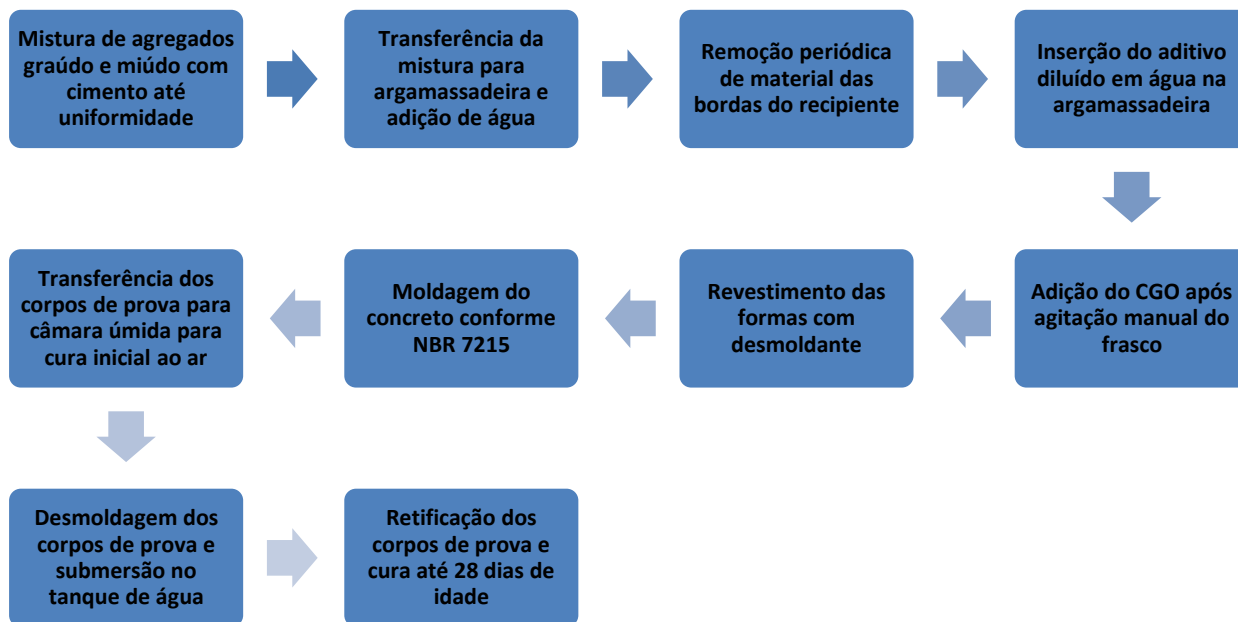
Figura 23 - Corpos de Prova sendo retificados.



Fonte: Autora (2024).

O processo de moldagem foi sistematizado na Figura 24, com o intuito de melhor dispor as informações e facilitar o entendimento da adição do CGO no processo de produção do concreto.

Figura 24 - Sistematização do processo de moldagem dos corpos de prova com CGO.



Fonte: Autora (2024).

Após atingir os 28 dias de idade, os corpos de prova estarão prontos para serem submetidos a altas temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C. Para isso utiliza-se o forno Mufla da marca Up Brasil, disponível no LMCC, com uma taxa de variação de temperatura adotada de 0,5°C/min e um tempo de exposição de 60 minutos após o atingimento da temperatura máxima, conforme publicado por (RILEM, 2000). Assim, para cada temperatura, existe um tempo de exposição térmica indicada, conforme demonstra a Tabela 10.

Tabela 10 - Tempo necessário para atingir temperaturas elevadas na mufla.

Temperatura (°C)	Tempo (hs)
300	11
600	21
900	31

Fonte: Autora (2024).

Assim, os corpos de prova são colocados na mufla em grupos de 9, como mostra a Figura 25. É notável a presença de um espaçamento entre as amostras, visando otimizar a exposição ao

calor na superfície. Além disso, realiza-se um mapeamento da disposição dos corpos de prova, com o intuito de garantir o controle numérico, considerando que a identificação poderia ser comprometida sob determinadas temperaturas. Posteriormente, procede-se à programação da temperatura desejada no forno mufla, onde os corpos de prova são então expostos a elevadas temperaturas. Por fim, são removidos e submetidos aos ensaios subsequentes.

Figura 25 - Disposição dos Corpos de Prova no Forno Mufla.

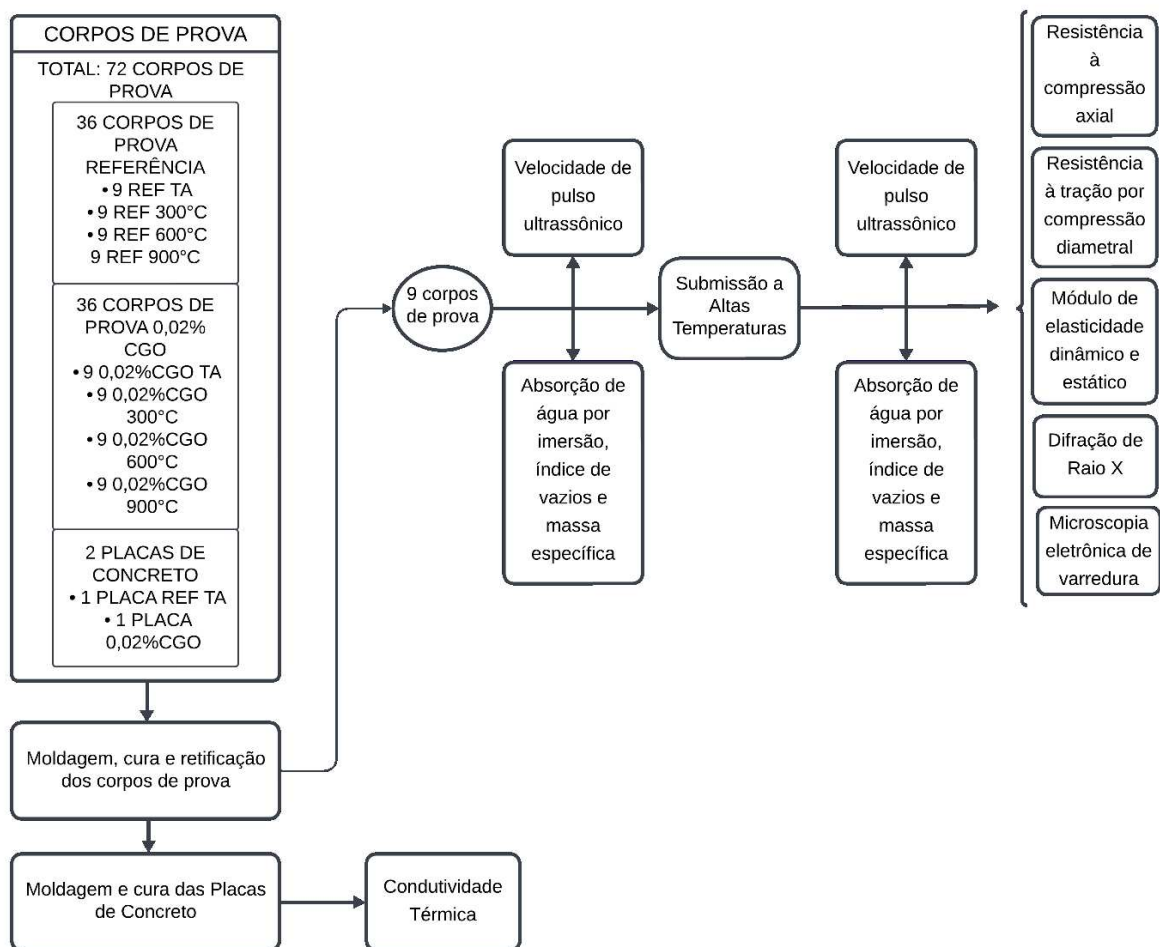


Fonte: Autora (2024).

3.5 MÉTODO DE ENSAIO

A Figura 26 oferece uma visão geral do processo metodológico utilizado nesta pesquisa. As etapas subsequentes detalham minuciosamente cada fase, fornecendo uma compreensão clara das estratégias e técnicas empregadas na coleta e análise de dados. Este roteiro não apenas delinea o caminho seguido nesta investigação, mas também serve como um guia para pesquisadores interessados em replicar ou estender este estudo.

Figura 26 – Fluxo Metodologia Adotada.



Fonte: Autora (2024).

3.5.1 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

O ensaio de condutividade térmica foi realizado pelo método proposto por Garcia (2021) no Aparato Técnico Alternativo (ATA), desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFJF, em sua dissertação de mestrado. O equipamento é constituído por uma caixa de

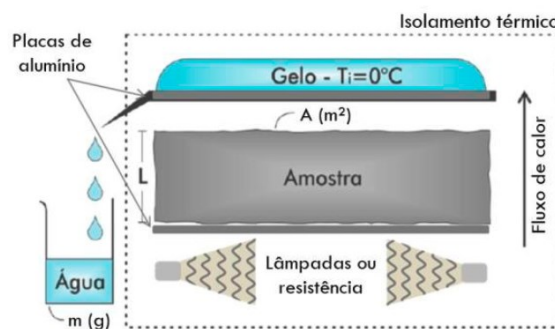
madeira que abriga uma fonte de calor (resistência elétrica), utilizada para gerar um fluxo de calor através de uma placa de concreto posicionada entre duas placas de alumínio (placas frias) e uma placa de gelo (Fonseca, 2023), a Figura 27 mostra a montagem do equipamento com as placas de concreto e a Figura 28 apresenta o esquema de montagem proposto por Garcia (2021).

Figura 27 - Montagem do Equipamento ATA com as placas de concreto e o gelo.



Fonte: Autora (2024).

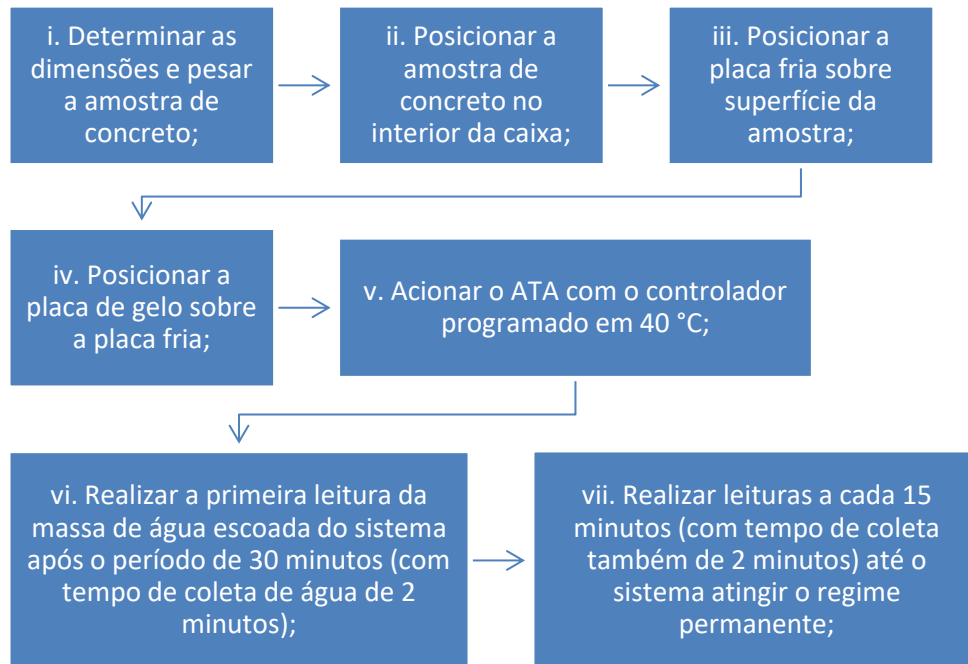
Figura 28 - Ilustração do Princípio de funcionamento do ATA.



Fonte: Garcia (2021).

O ensaio no ATA é realizado pelas as etapas propostas por Garcia (2021), primeiramente, deve-se medir as dimensões e pesar as placas de concreto. Em seguida, colocar a amostra dentro da caixa, posicionar a placa fria sobre a superfície da amostra e, depois, colocar a placa de gelo sobre a placa fria. Com o ATA ligado e o controlador ajustado para 40 °C, realiza-se a primeira leitura da massa de água escoada do sistema após um período de 30 minutos, com um tempo de coleta de água de 2 minutos. A partir daí, fazem-se leituras a cada 15 minutos, também com um tempo de coleta de 2 minutos, até que o sistema atinja o regime permanente. O procedimento está ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Processo de ensaio do ATA para cálculo da condutividade térmica.



Fonte: Garcia (2021).

O dispositivo de baixo custo funciona com base no regime permanente de transferência de calor, com o cálculo da condutividade térmica por meio da equação adaptada da lei de Fourier unidirecional (Equação 1).

$$\lambda = \frac{\Delta Q \times L}{\Delta t \times A \times \Delta T} \times 10^{-3} \quad (1)$$

λ : Condutividade térmica [W/(m.K)];

ΔQ : Massa de água medida (g) x calor latente de fusão da água (333 J/g), em J;

L : Espessura do corpo de prova;

Δt : Tempo de medição da massa de água (120");

A : Área da superfície do corpo de prova;

ΔT : Diferença de temperatura entre a fonte de calor (40 °C) e o gelo (0 °C), em K.

Para a realização do presente ensaio foi necessária a moldagem de placas de concreto que se adequassem ao ATA. Assim, foi desenvolvida uma forma em mdf, como demonstra a Figura

30, no tamanho de 36 cm de comprimento e 38cm de largura, com uma divisória no meio para facilitar a moldagem e manuseio, de forma a priorizar a planicidade e estabilidade do conjunto. Logo, obtém-se duas partes de dimensões 30 cm de comprimento, 14,5cm de largura e 10cm de espessura, que compõe uma placa de concreto, conforme Figura 31. Foram moldadas, dessa maneira, a placa de REF e a placa de 0,02% de CGO, ambas ensaiadas em TA.

Figura 30 - Placa de Concreto imediatamente após a moldagem.



Fonte: Autora (2024).

Figura 31 - Placas de Concreto.



Fonte: Autora (2024).

Assim, por meio do presente ensaio, é possível determinar a condutividade térmica, um parâmetro físico que denota a habilidade de um material em transferir calor, relacionado ao fluxo de calor por condução (Sacht, Rossignolo e Santos, 2010). Esta característica está intrinsecamente ligada à densidade do material, onde o material é sempre consideravelmente mais condutor do que o ar presente em seus poros, do que à composição química do material,

onde materiais amorfos tendem a ser menos condutores do que os cristalinos e do teor de umidade do material (Frota e SCHIFFER, 2006).

Além disso, capacidade de condução térmica está diretamente relacionada à composição volumétrica, natureza e quantidade dos elementos constituintes, como o cimento, os agregados e a água, e à distribuição desses componentes na estrutura do concreto, juntamente com sua porosidade (Sun *et al.*, 2017).

3.5.2 ENSAIOS DE ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E MASSA ESPECÍFICA REAL

Os ensaios de índice de vazios, absorção de água por imersão e massa específica foram conduzidos em todos corpos de prova conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 9778 - Argamassas e Concreto Endurecidos (ABNT, 2005). Esses são ensaios qualitativos e não destrutivos empregados para analisar o desempenho do concreto, especialmente em termos de sua durabilidade. Assim, esses ensaios sustentam as análises feitas do efeito do CGO e de altas temperaturas no concreto.

O índice de vazios indica a proporção do volume de poros em relação ao volume total do elemento (ABNT, 2005). A absorção de água reflete a capacidade do material de permitir a entrada de água em seus poros permeáveis. A massa específica real expressa a relação entre a massa e o volume do material, excluindo os poros permeáveis. Dessa forma, quanto maior o índice de vazios, a absorção e a massa específica, mais fácil será a penetração de água no material, maior será sua porosidade e densidade, respectivamente (ABNT, 2005).

Os corpos de prova foram removidos da câmara úmida, onde estavam imersos em água, e foram pesados enquanto submersos, saturados na superfície seca e, posteriormente, após a secagem. O índice de vazios, a absorção da amostra seca e a massa específica foram calculados, respectivamente, a partir das Equações 2, 3 e 4.

$$I_V = \frac{m_{SSS} - m_s}{m_{SSS} - m_{sub}} \times 100\% \quad (2)$$

$$A = \frac{m_{SSS} - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (3)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_{sub}} \quad (4)$$

I_V : índice de vazios, expresso em porcentagem;

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

ρ_r : massa específica real, expressa em g/cm³;

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

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

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

3.5.3 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO (VPU)

O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, também conhecida como velocidade de pulso ultrassônico (VPU), foi realizado conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 8802 - Concreto endurecido: Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica (ABNT, 2019), de maneira que transdutores são posicionados nas faces planas opostas do corpo de prova com auxílio de gel acoplante para medir a transmissão direta. O ensaio foi realizado no equipamento Pundit Lab da Proceq.

A técnica de velocidade de pulso ultrassônico é amplamente reconhecida como uma das abordagens não destrutivas mais prevalentes empregadas na análise das características do concreto (Bogas e M. Glória Gomes, 2013). Os resultados da velocidade do pulso ultrassônico são influenciados por diversos fatores, incluindo a composição do agregado, a temperatura inicial do concreto, o tipo de cimento utilizado, a TA e a relação água/cimento (Trtnik, Kavčič e Turk, 2009). Além disso, quanto maior a quantidade de poros entre os componentes da matriz, menor será a velocidade de propagação de onda ultrassônica, visto que devido à propagação das ondas em meio sólido, os processos de reflexão e refração que ocorrem quando essas ondas interagem com o ar, agregados e produtos de hidratação, exercem influência sobre esse parâmetro (Mendes *et al.*, 2020).

A velocidade de propagação das ondas é calculada pela Equação 5.

$$V = \frac{L}{t} \quad (5)$$

V : velocidade de propagação, expressa em metros por segundo (m/s);

L : a distância entre pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores, expressa em metros (m);

t : tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção, expresso em segundos.

Figura 32 - Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico.



Fonte: Autora (2024).

3.5.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de resistência à compressão axial, foram realizados conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2018). A resistência à compressão simples é definida como a tensão última aplicada ao corpo de prova, esta, provoca a desagregação do material que o compõe, que se dá pela ruptura da matriz da pasta de cimento (Santos, 2021).

O procedimento de ensaio envolve a aplicação de uma carga axial sobre o corpo de prova, posicionado centralmente na prensa hidráulica, conforme ilustrado na Figura 33, até que ocorra sua ruptura. A partir do valor da carga máxima que resulta na ruptura, registrado pelo equipamento da prensa hidráulica, e dos dados geométricos da seção transversal do cilindro, é viável determinar a resistência característica conforme definido na Equação 6.

Por se tratar de um ensaio destrutivo, foram conduzidos os ensaios, após completarem 28 dias de cura, em três corpos de prova de concreto para cada temperatura do concreto de REF e concreto de 0,02% CGO trabalhado. Ou seja, para REF, três corpos de prova de cada temperatura foram ensaiados: TA, 300°C, 600°C e 900°C. Da mesma forma foi feito para o concreto de 0,02% CGO.

Figura 33 - Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autora (2024).

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (6)$$

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

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

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

3.5.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, foram realizados conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 7222 - Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2011). O corpo de prova é posicionado na prensa hidráulica e é rompido em um plano bem definido em seu diâmetro, perpendicular ao esforço de tração aplicado. É possível determinar a tração direta do concreto pela Equação 8.

Trata-se de um ensaio destrutivo, por isso, foram conduzidos ensaios em três corpos de prova de concreto para cada temperatura do concreto de REF e 0,02% CGO.

Figura 34 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Autora (2024).

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times l} \quad (7)$$

$$f_{ct} = 0,9 \times f_{ct,sp} \quad (8)$$

$f_{ct,sp}$: resistência à tração indireta, medida pelo ensaio de compressão diametral,

expressa em megapascals (MPa);

f_{ct} : resistência à tração direta, expressa em megapascals (MPa);

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

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

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

3.5.6 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

Os ensaios de módulo de elasticidade, foram feitos conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 8522-1 - Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação (ABNT, 2021). Trata-se de um parâmetro mecânico que determina a rigidez de um material e está relacionado com várias propriedades mecânicas, como tensão de escoamento, tensão de ruptura e temperatura de propagação de trincas. É uma característica intrínseca dos materiais e sua magnitude é influenciada pela composição química, microestrutura e pela presença de defeitos, como porosidade e trincas (Almeida, 2012).

Partindo desse pressuposto, a estrutura interna do concreto é influenciada pelos seus componentes, incluindo agregados, pasta de cimento e zona de transição da mistura. Isso tem uma estreita relação com o módulo de elasticidade do material (Mehta e MONTEIRO, 2014). A adição do CGO ao concreto modifica essa estrutura interna, provocando alterações no módulo de elasticidade. Portanto, é crucial analisar o módulo de elasticidade para entender completamente os efeitos dessa adição.

O módulo de elasticidade estático nessa pesquisa foi determinado através da metodologia A descrita na NBR 8522-1 (ABNT, 2021), onde métodos de validade do ensaio são sugeridos a fim de garantir a qualidade. Esse é um ensaio destrutivo, assim foram realizados os ensaios, após completarem 28 dias de cura, em três corpos de prova de concreto para cada temperatura de REF e 0,02% CGO. O ensaio consiste em três ciclos de aplicação de carga equivalente à

30% da ruptura média à compressão axial por um intervalo de tempo de 60 segundos e descarga até 0,5 MPa por mais 60 segundos, conforme

Figura 35 – Ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: Leal (2024)

Para a realização do ensaio, utilizou-se a prensa hidráulica, e o software TestMod, desenvolvido pela DINATEST, para captar as deformações com auxílio de extensômetros do tipo strain gages ligados ao corpo de prova. A partir dos dados, obtém-se o módulo de elasticidade dado pela Equação 9.

$$E_{Ci} = \frac{0,3 \times f_c - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (9)$$

E_{Ci} : módulo de elasticidade estático, expresso em gigapascoals (GPa);

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

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

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

O módulo de elasticidade dinâmico, é obtido através dos dados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico e massa específica através da Equação 10, de acordo com Bauer (2019).

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

E_d : módulo de elasticidade dinâmico, expresso em GPa;

V : velocidade de pulso ultrassônico, expressa em $\frac{m}{s}$;

ρ : massa específica do concreto, expressa em g/cm^3 ;

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

3.5.7 ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

O MEV é utilizado para visualizar e analisar a estrutura e composição de materiais em escalas microscópicas (Scrivener, Snellings e Lothenbach, 2016). Neste contexto, a área ou o microvolume a ser examinado é irradiado por um fino feixe de elétrons. Como resultado da interação desse feixe com a superfície da amostra, uma série de radiações é emitida, incluindo elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-X característicos, elétrons Auger, fótons, entre outros. Essas radiações, quando corretamente captadas, fornecem informações distintas sobre a amostra, como topografia da superfície, composição e cristalografia (Scrivener, Snellings e Lothenbach, 2016).

Os sinais de maior interesse para a formação da imagem de MEV são os elétrons secundários e os retroespalhados. Enquanto os elétrons secundários fornecem uma imagem detalhada da topografia da superfície da amostra, os elétrons retroespalhados revelam informações sobre a variação da composição do material. À medida que o feixe de elétrons primários varia a amostra, esses sinais são modificados de acordo com as variações da superfície, permitindo a obtenção de imagens de alta resolução e a análise da composição da amostra. Portanto, o MEV desempenha um papel fundamental na caracterização e análise de uma ampla gama de

materiais, contribuindo significativamente para a pesquisa e desenvolvimento em diversas áreas científicas e tecnológicas (Scrivener, Snellings e Lothenbach, 2016).

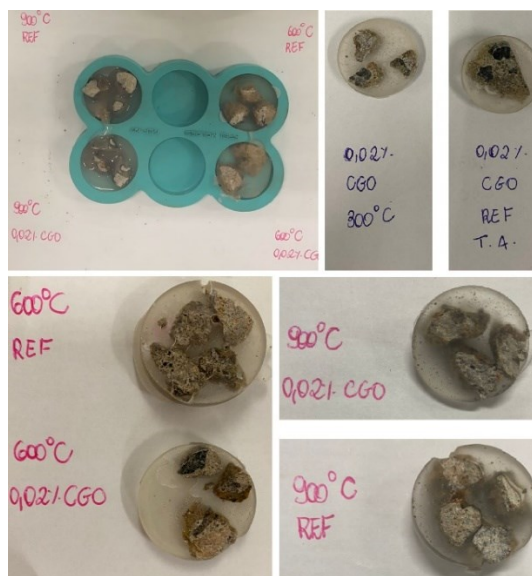
O ensaio foi conduzido em amostras constituídas de resina com fragmentos de corpos de prova, onde a superfície da amostra foi polida de forma que a incidência de feixes de elétrons coincidissem com o material estudado e que favorecesse uma varredura contínua na superfície, o processo de obtenção da amostra é demonstrado na Figura 36. Exemplos de amostras executadas para o presente estudo estão apresentadas na Figura 37. Após a confecção das amostras foi utilizado o aparelho VEJA 3 TESCAN, disponível no Laboratório Nanolab da UFOP para análise das imagens de microscopia de varredura utilizando a técnica de elétron secundário.

Figura 36 - Etapas de produção das amostras de MEV.



Fonte: Autora (2024).

Figura 37 - Amostras de MEV.



Fonte: Autora (2024).

3.5.8 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A base técnica do DRX consiste no fenômeno onde os raios X estão sujeitos a difração quando incidem sobre os átomos presentes em uma estrutura cristalina, em virtude de possuírem comprimentos de onda da mesma ordem de grandeza das distâncias interatômicas (Gomes, 2016).

Para que uma análise de DRX esteja detalhada, além do difratograma, são indispensáveis detalhes como: preparação da amostra, técnica utilizada para a quantificação de fases e fichas cristalográficas utilizadas na quantificação de fases (Pauletto, Brehm e Gomes, 2020). Cada fase apresenta seu próprio padrão de difração, identificado por picos com posições e intensidades relativas específicas. É nessa distinção que se fundamenta a quantificação das fases (Gomes, 2016).

Para a realização da difração de raio X, foi necessária a preparação de amostra utilizando Gral (Almofariz) de Porcelana com pistilo de porcelana e fragmentos dos corpos de prova, de forma que ocorra o destorroamento de 5 gramas do material passante na peneira de malha 100 (abertura de 0,15mm) como mostra a Figura 38.

Figura 38 - Amostra de DRX sendo preparada.



Fonte: Autora (2024).

O ensaio propriamente dito foi realizado no aparelho D2 Phaser 2º Geração Bruker, com radiação CuK α , localizado no NanoLab da UFOP. As amostras preparadas em pó foram dispostas no porta-amostras e submetidos à análise.

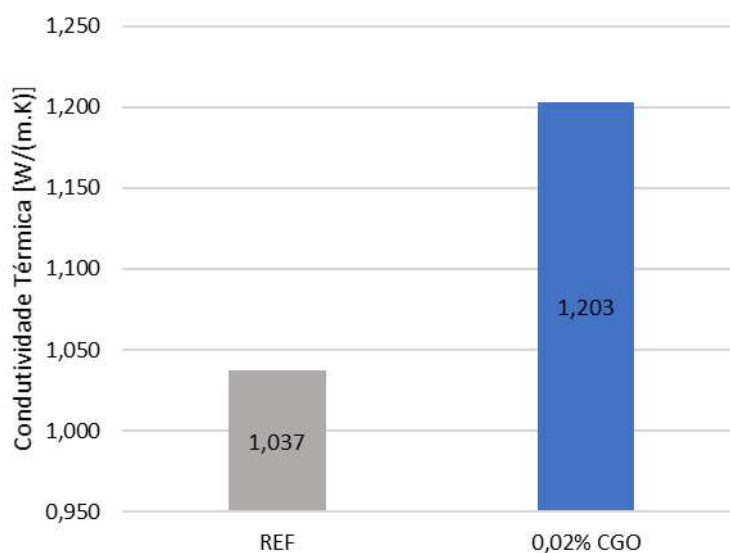
Os parâmetros adotados foram: a faixa de varredura 2θ de 7-70°; passo de 0,04°; tempo de passo de 1 segundo; com 8 rotações do spinner, por segundo e abertura da janela de 0,19 a 0,22 mm. Para a identificação das principais fases cristalinas foi utilizado o software PANalytical X'pert HighScore Plus V3.0. com o banco de dados cristalográfico COD 2023 (Crystallography Open Database).

4 RESULTADOS

4.1 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A Figura 39 apresenta os resultados de condutividade térmica das placas de REF e de 0,02% de CGO, ensaiadas à TA. A condutividade térmica da placa de concreto aditivado com 0,02% de CGO apresentou um aumento de 15,11%.

Figura 39 - Resultados dos ensaios de Condutividade térmica utilizando o ATA.



Fonte: Autora (2024).

A condução térmica no concreto está intimamente ligada à sua composição, à distribuição completa dos materiais na sua estrutura e à sua porosidade (Sun *et al.*, 2017).

Conseqüentemente, é esperado que a adição de CGO resulte em um aumento da condutividade térmica. Este fenômeno pode ser atribuído ao rearranjo dos vazios, uma vez que foi verificada na literatura que o GO influencia na hidratação do cimento, gerando um efeito de nanonucleação que preenche os vazios e gera nanoporos, facilitando assim a transmissão de calor (Zhang *et al.*, 2024). Portanto, é plausível deduzir que o CGO também pode desempenhar essa mesma função.

Adicionalmente, Mathew e George (2023) investigaram os teores de óxido de grafeno reduzido (rGO) em compostos cimentícios e observaram que o aumento na concentração desse nanomaterial estava correlacionado com um aumento na condutividade térmica. Este padrão de comportamento assemelha-se ao observado neste estudo, onde se verificou um aumento na condutividade com a utilização de 0,02% CGO, conforme a concentração ideal proposta.

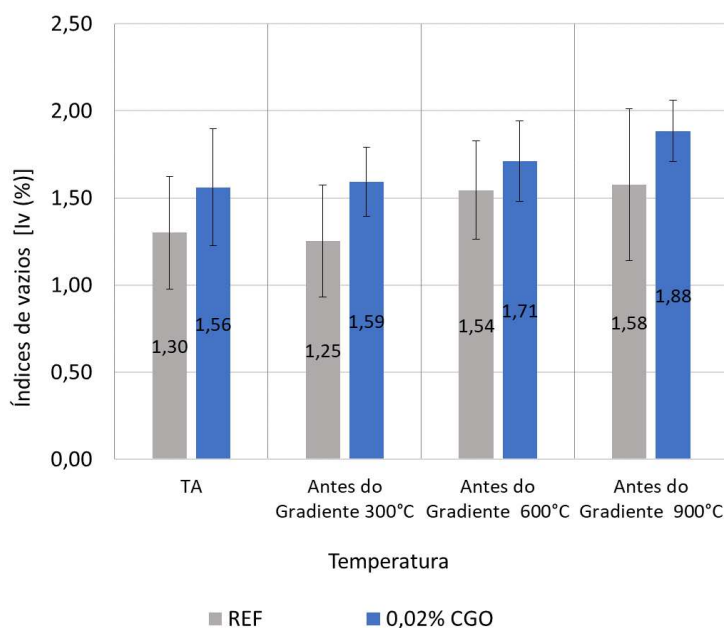
A relação entre a condutividade térmica e a transferência de calor em um material está intrinsecamente ligada à sua densidade. Prakash *et al.* (2024) em sua pesquisa com GO, demonstram que a microestrutura do concreto com GO obteve uma ligação interfacial de poros que a densificaram. Essa melhoria foi atribuída aos grupos funcionais do GO que servem como locais de nucleação para produtos de hidratação do cimento. Da mesma forma, esse fenômeno pode ter ocorrido com 0,02% CGO, já que possui os grupos funcionais carbonila. Materiais mais densos tendem a apresentar uma condutividade térmica mais elevada. Nesse sentido, a incorporação adequada de CGO induz um fenômeno de nanonucleação, que preenche os poros do material e distribui os nanoporos de maneira mais uniforme, denso, dentro da estrutura do compósito.

No que se refere a aplicação do concreto 0,02% CGO em estruturas de construções, a maior condutividade promove o aumento excessivo da temperatura nos ambientes, ocasionando desconforto térmico para os ocupantes. Assim, deve-se avaliar o uso de concreto 0,02% CGO em edificações destinadas a uma ocupação frequente de usuários, como residências, escritórios e hospitais, principalmente, no método construtivo, parede de concreto. Além disso, a condutividade térmica está diretamente ligada aos padrões estipulados pela NBR 15575 (ABNT, 2015), que reconhece a importância do controle térmico para a eficiência energética das edificações e o conforto dos ocupantes, estabelecendo critérios rigorosos a serem seguidos pelos materiais de construção, como enquadramento nas normas ASTM C518 ou ASTM C177 ou ISO 8302.

4.2 ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA REAL

A Figura 40 apresenta os valores de índices de vazios (I_V) dos corpos de prova de REF e 0,02% CGO, antes de serem expostos aos gradientes de calor, em TA. É notável que os concretos com adição de CGO, possuíram um aumento acentuado de índice de vazios. Segundo, Antolín-Rodríguez *et al.* (2024), o GO tem capacidade de promover a reorganização dos poros, ocorrendo, muitas vezes, até a selagem desses vazios. Indukuri e Nerella (2021) demonstraram que a adição de GO também aumentou o número de vazios, ampliou poros do gel e melhorou a microestrutura do compósito cimentício. Tais pressupostos podem ser aplicados para a estrutura do concreto com CGO.

Figura 40 – Comparação de Índices de Vazios REF e 0,02% CGO.

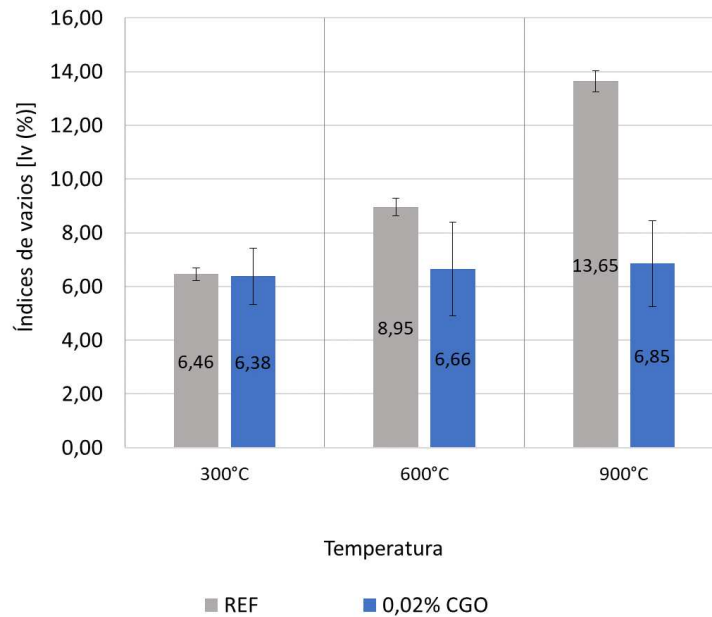


Fonte: Autora (2024).

No que se refere à exposição das amostras a altas temperaturas, verifica-se na Figura 41 um aumento expressivo dos vazios nas amostras de REF, crescendo progressivamente com o aumento da temperatura. Para as amostras de 0,02% CGO, obteve-se também um aumento do índice de vazios ao aumentar a temperatura, porém, esse aumento ocorreu de forma mais discreta em relação a amostras de REF. Esse fenômeno pode ser atribuído à capacidade do CGO de regular os produtos de hidratação do cimento, resultando na formação de estruturas cristalinas regulares e compactas, até quando submetidas a altas temperaturas. Tal afirmação

ratifica pressupostos da pesquisa de Ren, Bai, *et al.* (2024), onde foi observado que o GO realizou uma otimização da estrutura dos poros do concreto, por conseguinte, um aprimoramento das propriedades mecânicas de impacto do GO em altas temperaturas, em comparação com o concreto convencional.

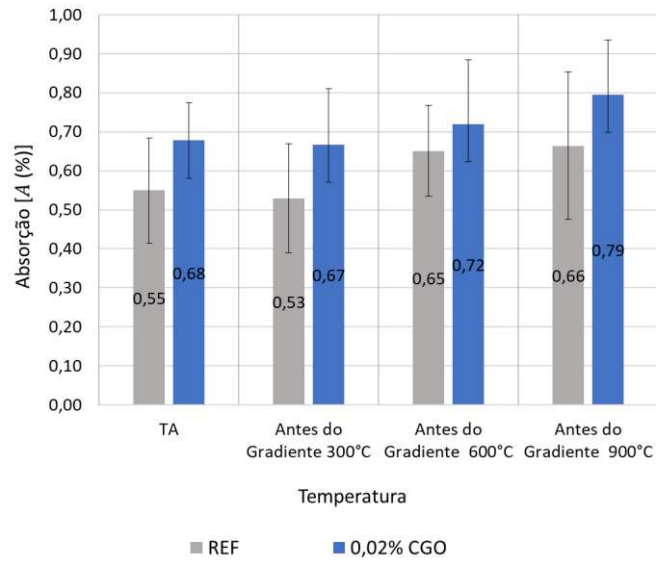
Figura 41 - Comparação de Índices de Vazios REF e 0,02% CGO submetidos a altas temperaturas.



Fonte: Autora (2024).

Antes de serem expostos aos gradientes de calor, os corpos de prova de REF e 0,02% CGO tiveram seus valores de absorção de água por imersão (A), em TA, calculados. Observa-se, Figura 42, que amostras de 0,02% CGO possuem maior absorção quando comparadas às amostras de REF. Logo, o CGO pode ter atuação semelhante ao GO identificado na pesquisa de Mohammed, Sanjayan, *et al.* (2017), onde nanopartículas do GO, contribuíram para a formação de canais em nano e micro escalas, permitindo a liberação de pressão e vapor, além de prevenir o desenvolvimento de trincas e lascamentos. No estudo de Meng *et al.* (2021) é revelado que a presença de GO facilita a mobilidade dos íons, principalmente do Ca^{2+} , potencializando assim a interação entre a superfície do cimento e os íons. Esta forte interação promove a nucleação e o crescimento de CSH e, portanto, a hidratação do cimento, com um aperfeiçoamento da estrutura dos poros e otimização dos produtos de hidratação

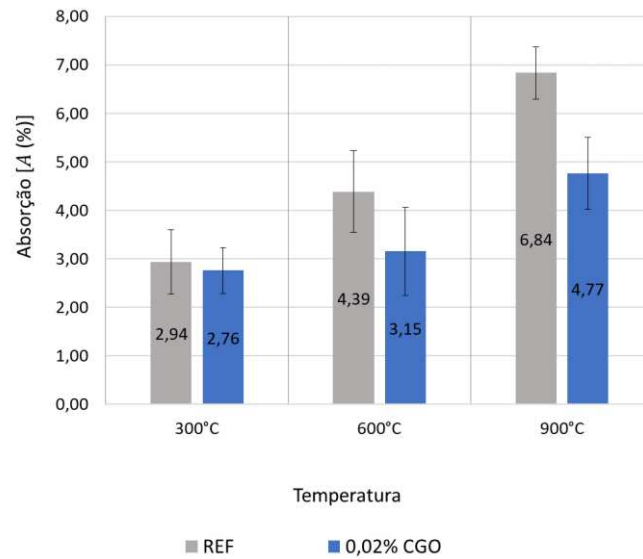
Figura 42 - Comparação de Absorção REF e 0,02% CGO.



Fonte: Autora (2024).

Na Figura 43 é possível observar que entre os concretos submetidos a altas temperaturas, as amostras de 0,02% CGO possuem menor absorção de água quando comparadas as amostras de REF, verificando um benefício da adição do CGO na matriz para altas temperaturas. Prakash *et al.* (2024) afirmam que o GO teve um papel fundamental em reduzir os efeitos adversos das altas temperaturas causadas pelo aquecimento no forno e pela exposição ao fogo direto. Isso se traduziu na diminuição da formação de fissuras. Assim, no que tange a microestrutura do concreto, Lu, Yu e Yin (2020) evidenciam nos seus experimentos que a estabilidade da estrutura CSH é comprometida em temperaturas elevadas, o que se manifesta pelo aumento no comprimento da ligação silício-oxigênio, pela decomposição da cadeia silicatada e pela diminuição na eficiência da hidrólise da molécula de água. No entanto, a adição de GO demonstra eficácia em estabilizar a estrutura CSH.

Figura 43 - Comparação de Absorção REF e 0,02% CGO submetidos a altas temperaturas.

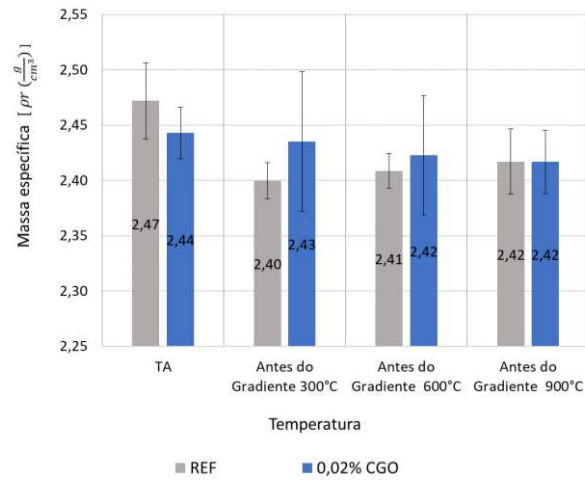


Fonte: Autora (2024).

A Figura 44 expõe as massas específicas (ρ_r) dos corpos de prova de REF e 0,02% CGO em TA. A comparação entre os resultados revela que as amostras com adição de 0,02% CGO apresentam uma massa específica ligeiramente superior em relação às amostras de REF. Esse aumento na massa específica sugere uma maior compactação ou densificação do material quando o CGO é incorporado. Lu *et al.* (2023) apresentam que a inclusão de GO influencia a zona de transição entre a matriz de cimento e os agregados do concreto, por meio da otimização dos poros. Isso propicia a formação de uma microestrutura densa, promovendo uma maior uniformidade em todo o material, em comparação com concretos que não possuem a adição desse nanomaterial.

Ademais, essa diferença de massa específica, entre amostras de REF e 0,02% CGO, pode ser atribuída às propriedades do CGO, que podem atuar como agentes de preenchimento, ocupando espaços vazios e promovendo uma maior coesão entre os componentes do material. Em comparação, Indukuri e Nerella (2021) descrevem ainda que a adição de GO no concreto pode não apenas refinar a estrutura dos poros, mas também regular a formação de produtos de hidratação.

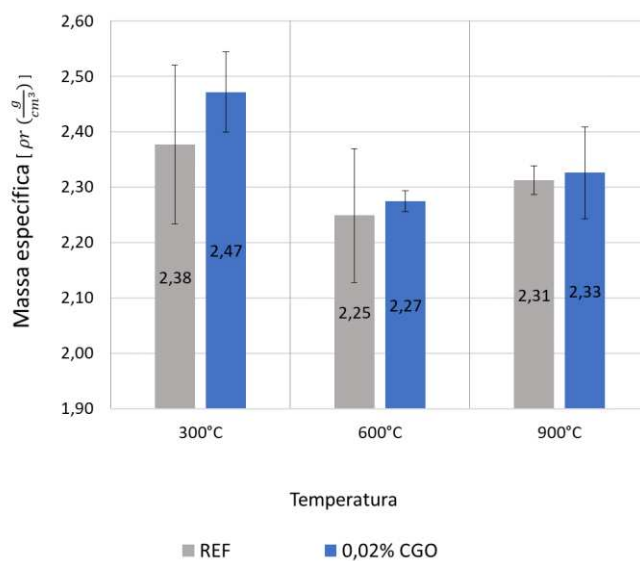
Figura 44 - Comparação de Massa específica REF e 0,02% CGO.



Fonte: Autora (2024).

A partir da análise da Figura 45 é notável que a massa específica das amostras de 0,02% CGO é maior que as amostras de REF, quando submetidas a altas temperaturas. Ren *et al.* (2024) afirma que quando o concreto é submetido a altas temperaturas, a água capilar dentro da pedra de cimento evapora e escapa do concreto. Porém, no concreto com GO que possuem poros de pequeno tamanho, os poros mais finos são deixados após a perda de água, sem perder massa na forma de água, facilitando a compactação sob cargas de impacto, o que é benéfico para melhorar a resistência do concreto. Tal pressuposto pode também ser aplicado ao CGO, devido à proximidade de características com o GO.

Figura 45 - Comparação de Massa específica REF e 0,02% CGO submetidos a altas temperaturas.



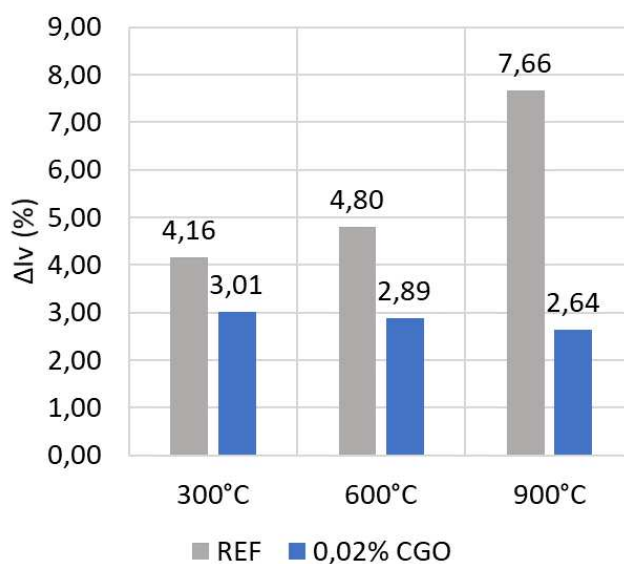
Fonte: Autora (2024).

A Figura 46 – Variação de Índices de Vazios dos gradientes de temperatura com TA. Figura 46 apresenta a variação dos índices de vazios dos gradientes de temperaturas, em comparação com a TA. Observa-se que o concreto 0,02% CGO e o de REF, em 300°C, tiveram uma pequena diferença de variação em relação a TA. Nesse contexto, demonstra-se que o CGO à 300°C regulou e acelerou os produtos de hidratação para formar estruturas cristalinas contínuas e compactas de maneira semelhante ao concreto de REF. A pesquisa de Ren, Bai, *et al.* (2024) apresentou pressupostos interessantes no que tange a composição de vazios de concreto em altas temperaturas. A 200°C a quantidade de poros aumenta em diferentes graus, tornando mais refinados.

Mas, em 600°C e 900°C nota-se o concreto 0,02% CGO teve uma substancial diminuição no índice de vazios, quando comparado ao concreto de REF. A pesquisa de Ren, Bai, *et al.* (2024), esclarece que após ultrapassar os 400 °C, os poros internos da amostra começam a crescer rapidamente, mas o GO atua otimizando a estrutura e impedindo o crescimento desordenado de poros. A 800 °C, há um aumento médio no número de poros muito prejudiciais em comparação com as condições de TA (Ren *et al.*, 2024). A alta temperatura e a incorporação de GO têm um efeito de acoplamento na composição dos poros da amostra. Em ambientes de alta temperatura, a adição de GO pode reduzir o número de poros de grande diâmetro e aumentar ligeiramente a proporção de poros de pequeno diâmetro.

Além disso, salienta-se que conforme a temperatura aumenta no interior do concreto e ocorre a evaporação da água, um gradiente de pressão se forma entre as diferentes áreas da matriz, promovendo o deslocamento do vapor de água tanto para o exterior quanto para o interior do elemento de concreto (Gil, Banerji e Kodur, 2023). Quanto menos poroso for um determinado tipo de concreto, menor será o espaço disponível para a evaporação da água (Kannangara *et al.*, 2022). Como alternativa, o CGO surge oferecendo maior espaço para evaporação de água ao reorganizar os poros nos distintos gradientes de temperatura.

Figura 46 – Variação de Índices de Vazios dos gradientes de temperatura com TA.

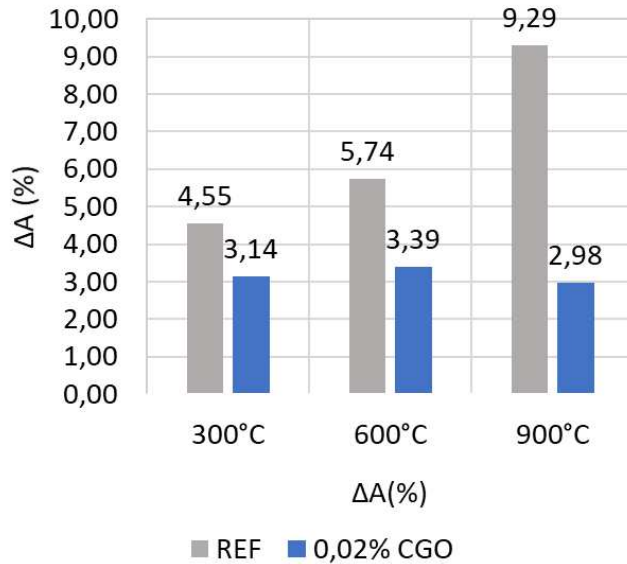


Fonte: Autora (2024).

Na análise da Figura 47, observa-se que tanto o concreto de 0,02% CGO quanto o concreto de REF apresentaram variações mínimas na absorção de água em 300°C em comparação com a TA. Isso sugere que o CGO, a 300°C, facilitou a formação de estruturas cristalinas contínuas e compactas, semelhante ao concreto REF. Em 600°C e 900°C, o concreto com 0,02% de CGO apresentou uma notável diminuição na absorção de água em comparação com o concreto de REF. Ou seja, em temperaturas elevadas, os poros na estrutura do concreto tendem a se expandir devido ao aumento da energia cinética das moléculas (Zaid *et al.*, 2022). À medida que sua permeabilidade diminui, torna-se mais desafiador para o vapor d'água atravessar sua rede de poros (Kannangara *et al.*, 2022). Entretanto, o CGO pode atuar como um agente de preenchimento, ocupando os poros e reduzindo a sua expansão. Isso pode resultar em uma menor permeabilidade do concreto e, conseqüentemente, em uma menor absorção de água em

altas temperaturas. Além disso, o CGO agindo em altas temperaturas promoveu uma certa homogeneização da absorção com valores que variavam de 4 a 7%, passando para 2 e 3 % entre concreto de REF e 0,02%CGO.

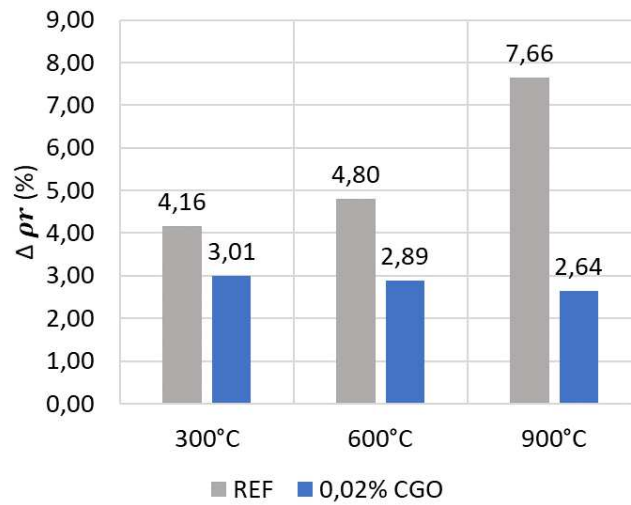
Figura 47 - Variação Absorção de água dos gradientes de temperatura com TA.



Fonte: Autora (2024).

A variação da massa específica dos gradientes de temperatura em relação a TA é apresentada na Figura 48. Revela-se que o concreto de REF possui a maior massa específica em todas as temperaturas. Isso ocorre devido ao preenchimento de poros e à distribuição uniforme e compacta de nanoporos. Esses efeitos combinados resultam em um concreto mais denso e, portanto, com uma massa específica mais elevada em comparação com concreto de REF. Além disso, a presença de CGO pode influenciar a estrutura porosa do material, resultando em uma distribuição mais uniforme de massa e uma maior eficiência na transferência de carga dentro da matriz de concreto (Ren *et al.*, 2024).

Figura 48 - Variação Massa Específica dos gradientes de temperatura com TA.



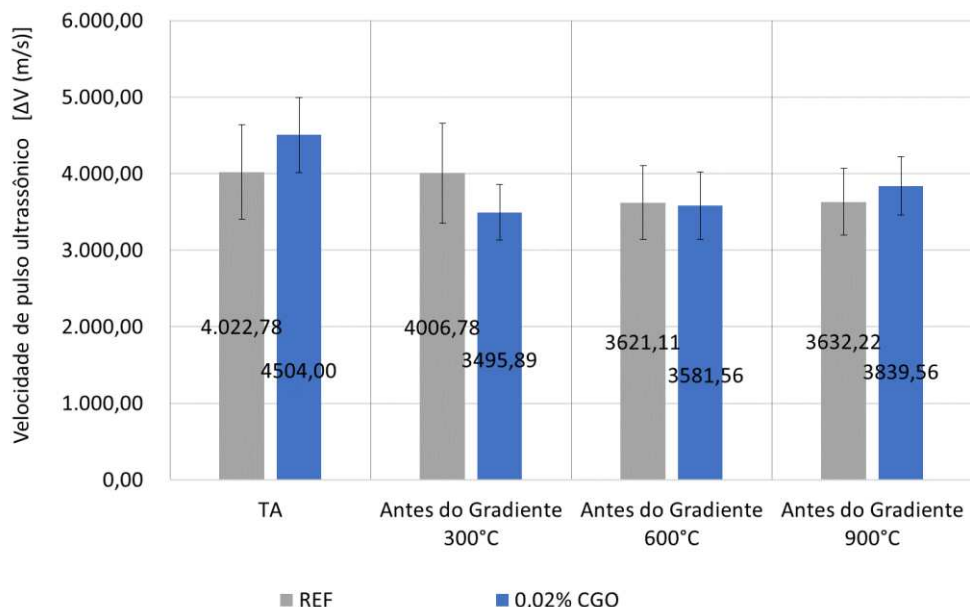
Fonte: Autora (2024).

4.3 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO (VPU)

O ensaio de VPU foi conduzido nos corpos de prova de REF e 0,02% CGO, antes de serem expostos aos gradientes de calor, em TA. Observa-se que a VPU para 0,02% CGO e REF foram semelhantes, no entanto, o concreto de 0,02% CGO obteve um discreto aumento. Esse aumento, segundo Zaid *et al.* (2022), pode ser atribuído ao efeito de nanoenchimento do óxido de grafeno, resultando em uma amostra mais densa em escala nano. Consequentemente, isso melhora a qualidade do concreto e a homogeneidade em sua durabilidade e desempenho mecânico.

Destaca-se que o aumento na VPU observado no concreto 0,02% CGO em comparação com o concreto de REF pode ser atribuído ao efeito de um nanofiller provocado pela adição de CGO ao compósito. Isso leva a uma maior densificação da mistura de concreto devido à presença de poros menores e mais uniformemente distribuídos na matriz. Estudos anteriores por Reddy e Prasad (2023) mostraram um aumento de 6,26% na VPU em concretos desenvolvidos com GO, um material similar ao CGO. Portanto, é razoável esperar que o CGO também atue de forma semelhante como nanofiller.

Figura 49 - Comparação de VPU para REF e 0,02% CGO.

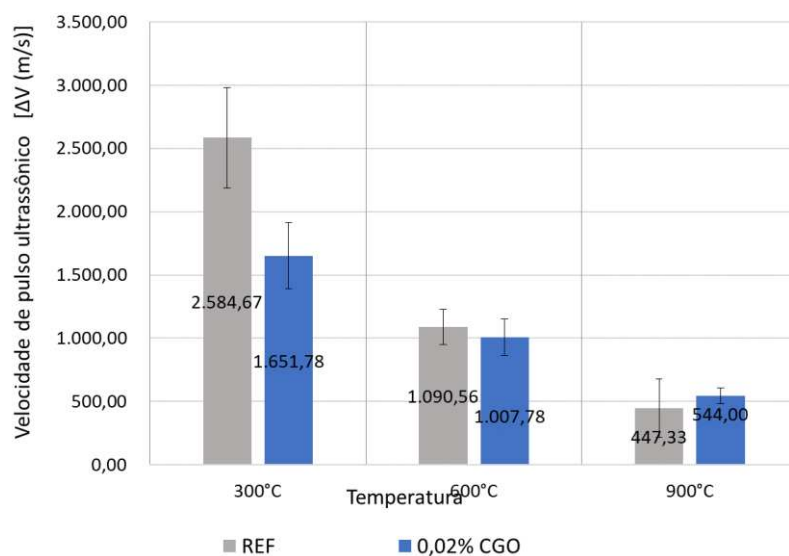


Fonte: Autora (2024).

No que tange a VPU de concretos em altas temperaturas, é notável, por meio da Figura 50, que as amostras de REF e 0,02% CGO possuem uma progressiva diminuição da velocidade ao aumentar o gradiente de temperatura. Tal fenômeno está em consonância com o afirmado por Kudžma *et al.* (2019), de que a onda ultrassônica se propaga em meio sólido, logo, a velocidade tende a decrescer com o aumento das interfaces entre diferentes componentes da matriz, como, vazios e agregados. Visto que, com o aumento do gradiente de temperatura, uma alteração percebida no concreto é o aumento de poros (Li *et al.*, 2022).

Salienta-se que em alguns corpos de prova, submetidos à 900°C, não foi possível medir a VPU, uma vez que ao posicionar os transdutores nas faces do corpo de prova com auxílio de gel acoplante, não se obteve uma transmissão direta. Em altas temperaturas, há um aumento do número de vazios por conta da perda de água e decomposição dos produtos de hidratação, além da geração de microfissuras em razão da deterioração do concreto (Ribeiro e Tutikian, 2018), impedindo a transição de pulsos.

Figura 50 - Comparação de VPU para REF e 0,02% CGO submetidos a altas temperaturas.



Fonte: Autora (2024).

4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de compressão axial foi conduzido nos corpos de prova de REF e 0,02% CGO, em TA e nos gradientes de 300°C, 600°C e 900°C. A Figura 51 revela que em TA, houve um aumento significativo na resistência à compressão no concreto de 0,02% CGO em relação à REF. Isso ocorre devido a adição do CGO potencializar a taxa de hidratação do cimento e regular os produtos de hidratação para formar estruturas cristalinas regulares e compactas, que contribuem para a resistência do material de forma análoga ao GO, conforme exposto por Kang *et al.* (2020).

Na pesquisa desenvolvida por Prakash *et al.* (2024) e Ghafari, Costa e Júlio (2015) utilizando GO, foi identificado que a porosidade da matriz alterada do concreto com GO, cria canais em nano e microescala, contribuindo para reduzir a pressão de vapor e mitigar a formação de fissuras. Este estudo ressalta o potencial do GO como um aditivo versátil em concreto, oferecendo melhorias em resistência, resistência ao calor e desempenho ao fogo para o desenvolvimento de infraestrutura sustentável e resiliente. Considerando que o CGO possui propriedades similares ao GO, é razoável inferir que o CGO também pode desempenhar um papel crucial como aditivo para melhorar a resistência e outras propriedades necessárias para aplicações específicas.

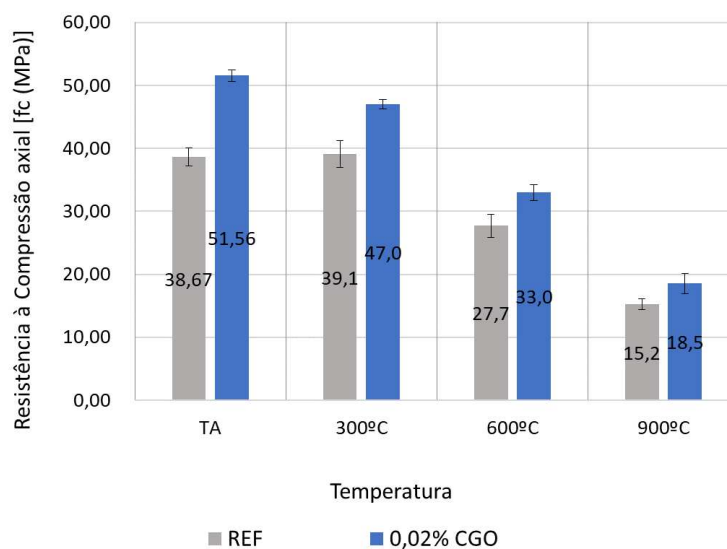
De forma geral, não foi verificado um aumento significativo da resistência a compressão axial para os gradientes de temperatura em relação ao concreto REF. Isso pode ser justificado pela pesquisa de Yan *et al.* (2022), que avaliou a exposição a altas temperaturas de cimento reforçado com óxido de grafeno. Os autores observaram que à medida que a temperatura aumenta, observa-se a evaporação da água do cimento reforçado com GO, onde a quantidade de água evaporada depende do estado da reação e é correlacionada com a relação entre perda de peso e temperatura, podendo tal situação ser aplicada também ao CGO. Ainda assim, Yan *et al.* (2022) explicam que por meio dos efeitos de ligação do GO, o hidrato de silicato de cálcio (C-S-H) é quimicamente produzido, formando um sistema de ponte reticular. Nesse sentido, a adição de GO ao cimento geralmente tem um impacto mínimo na resistência à compressão, exceto em altas temperaturas, como 800°C, devido à ocorrência de descarbonetação por desidratação. (Yan *et al.*, 2022).

Nota-se que nas temperaturas de 600°C e 900°C a diminuição da resistência é mais expressiva em comparação com a TA. Tais resultados estão em consonância com a pesquisa de Ren, Bai, *et al.* (2024) e Ghafari, Costa e Júlio (2015), que utilizaram GO, onde explicam que a interação entre temperatura e GO influencia a resistência de cálculo do concreto por meio de uma diminuição gradual com o aumento da temperatura.

Nesse contexto, a elevação da temperatura desencadeia a perda de água livre tanto na estrutura do concreto quanto na pasta do cimento. Esse processo resulta em fissuras superficiais e na expansão dos agregados. Como resultado direto, surgem tensões internas que prejudicam a capacidade de resistência à compressão da estrutura (Dias *et al.*, 2020). Vale destacar que os fenômenos também contribuem para a redução da resistência à compressão, como a desidratação, a descarbonetação na estrutura e a decomposição térmica do silicato de cálcio hidratado (C-H-S) e do carbonato de cálcio (CaCO₃), apontados na pesquisa de Çavdar (2012).

Ademais, Long *et al.* (2018) demonstraram que a capacidade de melhorar efetivamente o desempenho mecânico do concreto aditivado com GO está intimamente ligada a facilidade do GO ser disperso em água devido à presença de grupos funcionais hidrofílicos contendo oxigênio. Logo, evidencia-se que para o CGO, que possui grupos carbonila de natureza hidrofílica, pode ampliar a promoção da dispersão em água e melhorar a resistência a compressão do concreto.

Figura 51 - Comparação de Compressão Axial para REF e 0,02% CGO.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 52 apresenta a variação de resistência à compressão em relação a TA. Por meio da Figura 52 nota-se que o concreto de REF teve um aumento de resistência de 1% quando comparada a TA e 300°C. Esse pequeno aumento de resistência para a temperatura de 300°C pode ter ocorrido devido à similaridade da matriz de concreto em ambos casos, motivado principalmente pela reação tardia de hidratação dos grãos de cimento, que preenchem os vazios do concreto e aumentam sua resistência, semelhante ao processo de autoclavagem (Yao e Lu, 2021). Além disso, isso pode ter ocorrido em razão do CGO à 300°C não sofrer decomposição química total e conseguir atuar inibindo o desenvolvimento de grandes poros internos sob altas temperaturas e refinando os poros, como também identificado por Ren, Bai, *et al.* (2024) em sua pesquisa com GO à uma temperatura de 200°C.

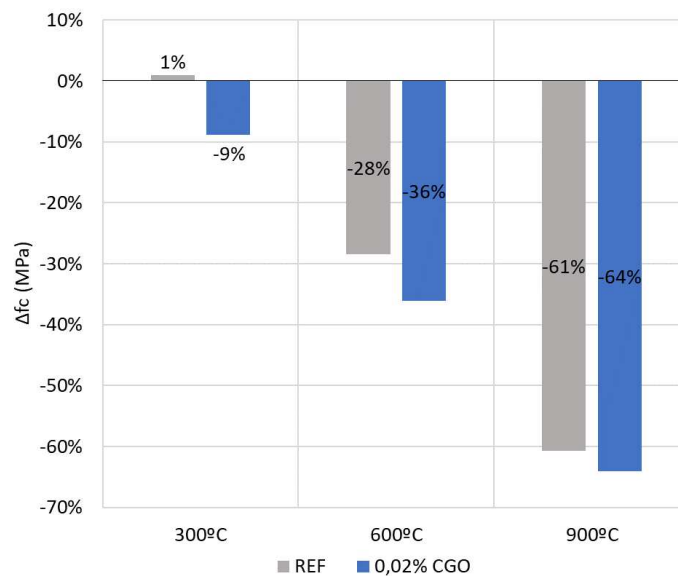
Assim, dado que existe uma diminuição da resistência à medida que a temperatura aumenta, o concreto de REF destacou-se por apresentar os melhores resultados em comparação com sua resistência em TA. A redução desse percentual é semelhante a 900°C para ambos os grupos, 61% e 64%, uma vez que o CGO começa a degradar a partir de 600°C (Han *et al.* (2022); Mohammed *et al.* (2017))

Ademais, ao analisar as resistências absolutas entre os grupos, a situação favorece o concreto de 0,02% CGO, ou seja, o CGO tem efeito positivo no concreto em altas temperaturas. Isso pode ocorrer pelo CGO influencia a retenção de água através do fenômeno da nanonucleação e

também impede a propagação de fissuras, atuando como um reforço na estrutura (Guo *et al.*, 2024; Prakash *et al.*, 2024);

Radman e Joorabchi (2019) apresentaram em sua pesquisa que a adição do GO melhora a resistência à compressão do concreto, mas ao mesmo tempo reduz sua trabalhabilidade. É notável que o CGO atuou melhorando a resistência à compressão, em todos os gradientes de temperatura. Porém, durante a produção do concreto, não houve perda da trabalhabilidade da mistura. Ao contrário do evidenciado pelos autores, houve facilidade de manejo dos materiais que compõe o concreto durante os processos de mistura, transporte e moldagem dos corpos de prova. É possível ainda, associar a notável trabalhabilidade do concreto de 0,02% CGO no que tange a aplicação em peças estruturais, já que tem praticidade na disposição adequada nas formas, adensamento e cobrimento ao redor das armaduras.

Figura 52 - Variação de Resistência à compressão em relação a TA.



Fonte: Autora (2024).

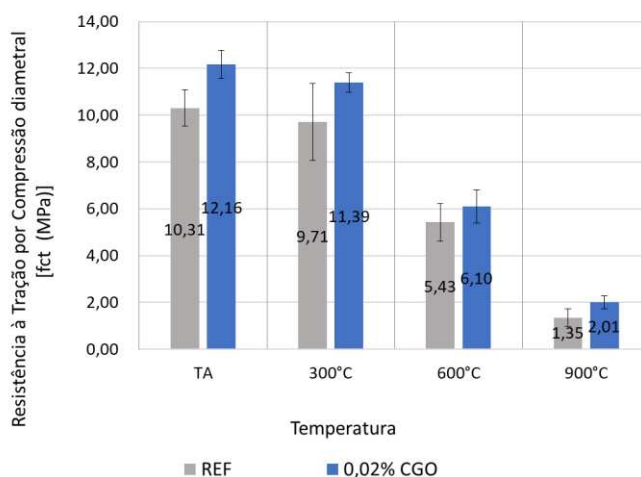
4.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de tração por compressão diametral foi conduzido nos corpos de prova de REF e 0,02% CGO, em TA e nos gradientes de 300°C, 600°C e 900°C, conforme apresenta Figura 53. Nota-se que a resistência à tração por compressão diametral foi comprometida com o aumento

da temperatura, assim como foi evidenciado para a resistência à compressão axial. Este fenômeno ocorre devido à desidratação do concreto e da pasta de cimento, resultando na redução da resistência mecânica. A elevação da temperatura provoca a evaporação da água contida no material, causando um processo de secagem que pode desencadear fissuras microscópicas. Essas fissuras são ampliadas pela expansão térmica dos agregados, o que intensifica as tensões internas dentro da estrutura (Chen *et al.*, 2022).

É notória que a resistência a tração do concreto 0,02% CGO teve um pequeno acréscimo em relação ao concreto de REF, que se manteve ao longo dos gradientes de temperatura. Tal observação vai de encontro ao proposto por Ren, Bai, *et al.* (2024), que afirma que o GO adicionado ao concreto regula a hidratação do cimento e seus produtos para formar estruturas cristalinas regulares e compactas. Chaturvedy, Pandey e Singh (2023) relataram que o GO aumenta significativamente a resistência à tração resultando em melhorias de até 7,06%. Esses efeitos do GO contribuem para aumentar a resistência do material de maneira comparável à adição de CGO. Assim, Dias *et al.* (2020) destaca a importância de análises dos processos termo-higroscópicos na engenharia civil, especialmente em estruturas sujeitas a condições de alta temperatura, para entender processos macroscópicos.

Figura 53 - Comparação de Tração para REF e 0,02% CGO.



Fonte: Autora (2024).

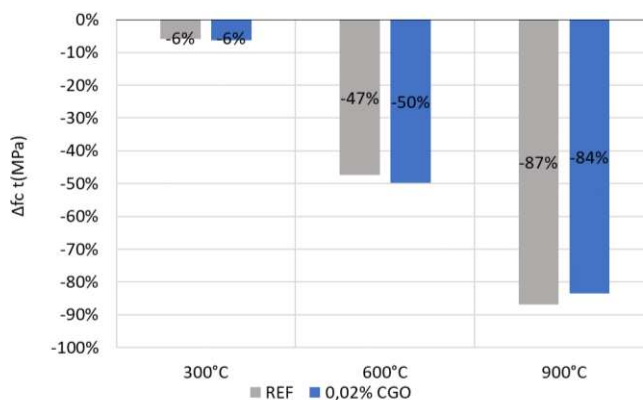
Por meio da Figura 54, observa-se que na temperatura de 300°C para ambos os grupos, houveram a mesma redução de resistência à tração comparada com a TA, corroborando

também, o mesmo fato evidenciado na resistência à compressão, de existe uma semelhança da alteração da composição do concreto em ambos quando submetidos a 300°C (Yao e Lu, 2021).

Dessa maneira, tem-se que os resultados de resistência à tração com o aumento da temperatura se assemelham aos de resistência à compressão. No entanto, na resistência à tração, observa-se uma degradação mais significativa do concreto à medida que a temperatura aumenta, devido à menor capacidade do concreto de resistir às forças de tração (Mohammed *et al.*, 2017). A pesquisa de Memon *et al.* (2019) corrobora com tal constatação., aos autores afirmar que quando a temperatura da superfície do concreto aumenta, surgem tensões compressivas ao longo da superfície aquecida e também surgem tensões de tração derivadas e perpendiculares a ela. Se essas tensões diferenciais ultrapassam a capacidade de resistência à tração do concreto, ele se rompe, formando fissuras (Memon *et al.*, 2019).

Pode-se citar, que em 900°C, tanto para o concreto de REF, quanto para 0,02% CGO, a média de resistência a tração foram menores que 2MPa. Essa redução é justificada pelo desenvolvimento de várias fissuras, tanto em escala micro quanto macro, devido às tensões térmicas e à maior suscetibilidade da resistência à tração a essas fissuras (Mohammed *et al.*, 2017).

Figura 54 - Variação de Tração em relação a TA.



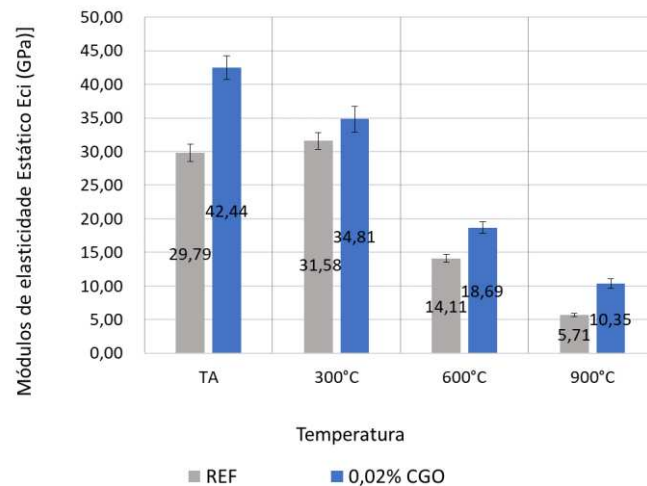
Fonte: Autora (2024).

4.6 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

O ensaio de módulo de elasticidade Estático (Eci) foi conduzido nos corpos de prova de REF e 0,02% CGO, em TA e nos gradientes de 300°C, 600°C e 900°C, conforme apresenta Figura 55. Salienta-se que quanto maior o módulo de elasticidade do concreto, menor é sua capacidade de

deformação (Rosa, 2023). Bheel e Mohammed (2024) explicam que a adição de GO ao compósito cimentício resulta em aumento do módulo de elasticidade. Isto é conseguido através do processo de endurecimento composto facilitado pelo impacto do modelo GO. Os resultados evidenciam um aumento no módulo de elasticidade estático do concreto 0,02% CGO em relação ao de REF para todos os gradientes de temperatura, conforme o mesmo resultado apresentado na determinação da resistência à compressão, já que existe semelhanças na determinação dessas propriedades. Ou seja, entende-se que o CGO atuou aumentando o módulo de elasticidade estático, verificando assim, uma menor é sua capacidade de deformação.

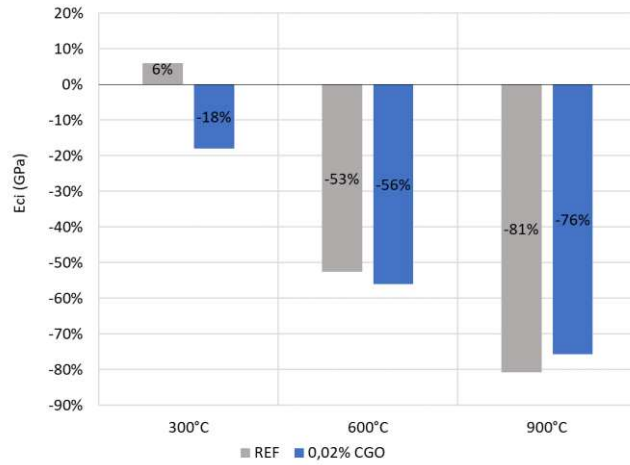
Figura 55 - Comparação do módulo de elasticidade estático para REF e 0,02% CGO.



Fonte: Autora (2024).

A Figura 56 apresenta a variação do módulo de elasticidade estático dos gradientes de temperatura em relação a TA. Observa-se que à 300°C, o concreto de REF obteve um aumento no módulo de elasticidade estático. Entende-se, dessa maneira, que a rigidez do concreto de REF à 300°C, sob cargas aplicadas lentamente, é 24% maior que o concreto de 0,02% CGO.

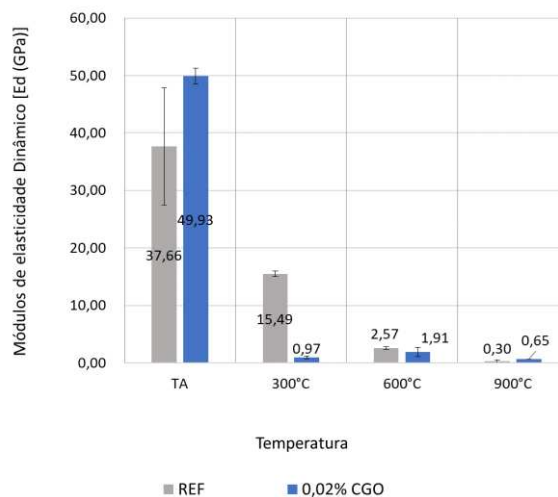
Figura 56 - Variação do módulo de elasticidade estático em relação a TA.



Fonte: Autora (2024).

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi conduzido nos corpos de prova de REF e 0,02% CGO, em TA e nos gradientes de 300°C, 600°C e 900°C, conforme apresenta Figura 57. Observa-se que tal índice acompanhou o mesmo crescimento que o estático, uma vez que é medida da capacidade do material de armazenar energia sob essas condições dinâmicas, como vibrações ou impactos rápidos.

Figura 57 - Comparação do módulo de elasticidade dinâmico para REF e 0,02% CGO.

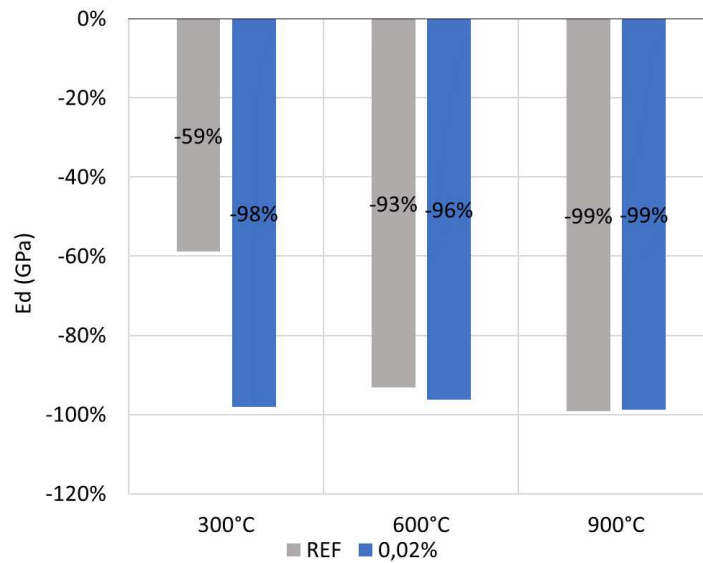


Fonte: Autora (2024).

A Figura 58 apresenta a variação do módulo de elasticidade dinâmico dos gradientes de temperatura em relação a TA. O concreto de REF e 0,02% CGO em 900°C, tem a mesma

porcentagem, que pode ser justificada pelo CGO não estar mais presente na matriz cimentícia, ou seja, nessa temperatura houve a decomposição do aditivo. Isso é confirmado pelos valores menores de VPU para o concreto com 0,02% de CGO a 300°C e 600°C em comparação com o concreto de REF. Ademais, a presença de vários componentes na estrutura, incluindo agregados, pasta de cimento e CGO, afeta negativamente esse valor (Han *et al.*, 2022).

Figura 58 - Variação do módulo de elasticidade dinâmico em relação a TA.



Fonte: Autora (2024).

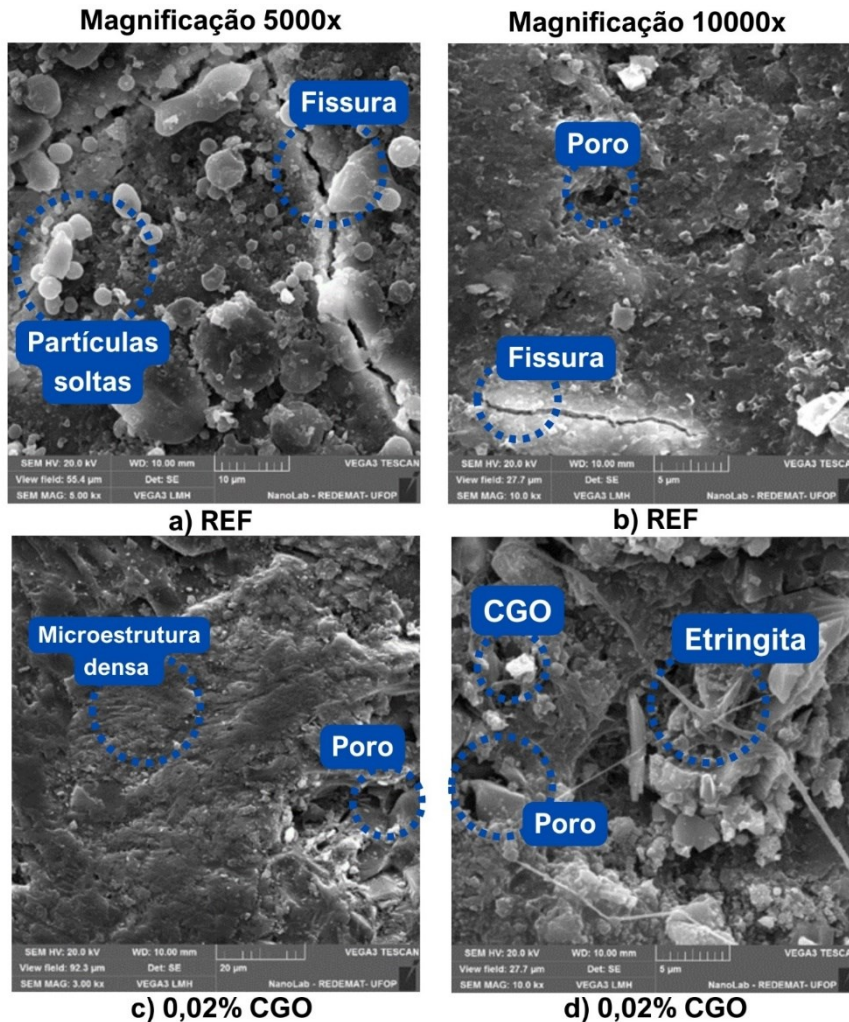
4.7 ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Os resultados da MEV das amostras em TA estão apresentados na Figura 59. São identificados, na Figura 59 (A) e (B), do concreto de REF, fissuras, poro e partículas soltas na superfície do compósito. Os poros e as fissuras foram associados com base nas imagens da MEV de Zhang, *et al.* (2024) em sua pesquisa utilizando GO e nanotubos em concretos. Já as partículas soltas verificadas, foram apresentadas na pesquisa de Ren, Bai, *et al.* (2024), que utiliza concretos aditivados com GO em altas temperaturas.

Nos resultados do concreto de 0,02% CGO, Figura 59 (C) e (D), presume-se a identificação do CGO, devido à presença de uma estrutura distinta das ainda não descrita na literatura. Ainda assim ensaios adicionais são necessários para confirmar definitivamente a presença e caracterizar completamente o CGO, uma vez que não existem literaturas para tal embasamento.

São identificados poros (Devi e Khan, 2019), microestrutura mais densa (Kudžma *et al.*, 2019) e Etringita, produto da reação de hidratação em conjunto com do C₃S e do gesso (Peng *et al.*, 2019).

Figura 59 - MEV das Amostras em TA.

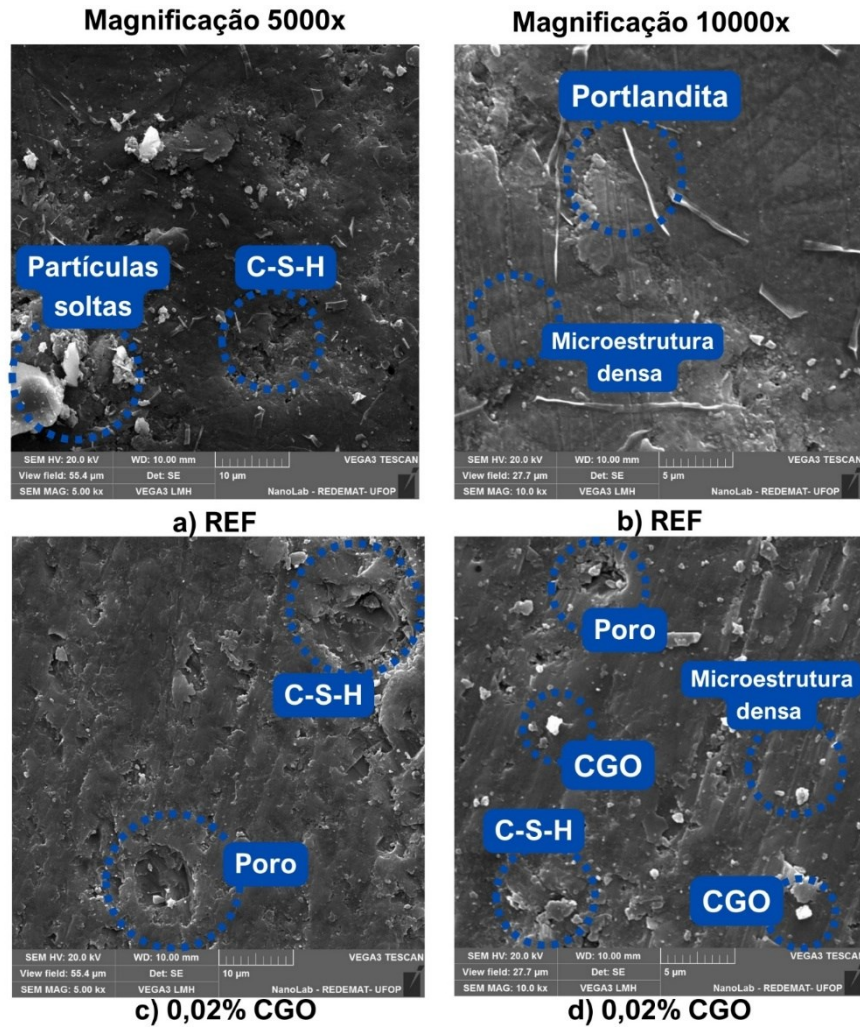


Fonte: Autora (2024).

Os resultados da MEV das amostras à 300°C estão apresentados na Figura 60. Segundo Yu *et al.* (2024) a estrutura interna do concreto começa a mudar efetivamente somente quando a temperatura ultrapassa 400 ° C. Nesse sentido, verifica-se de forma geral, o início do pico de decomposição do C-S-H (Ribeiro e Tutikian, 2018), na temperatura de 300°C. Os resultados do concreto de REF, Figura 60 (A) e (B), revelam portlandita (Ren *et al.*, 2024), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Kudžma *et al.*, 2019), partículas soltas (Ren *et al.*, 2024) e microestrutura densa (Krishna *et al.*, 2023).

Os produtos da MEV do concreto de 0,02% CGO, Figura 60 (C) e (D), apresenta poros (Devi e Khan, 2019), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Zhang *et al.*, 2024) e microestrutura mais densa (Krishna *et al.*, 2023). Além disso, acredita-se possui a estrutura de CGO.

Figura 60 - MEV das Amostras à 300°C.

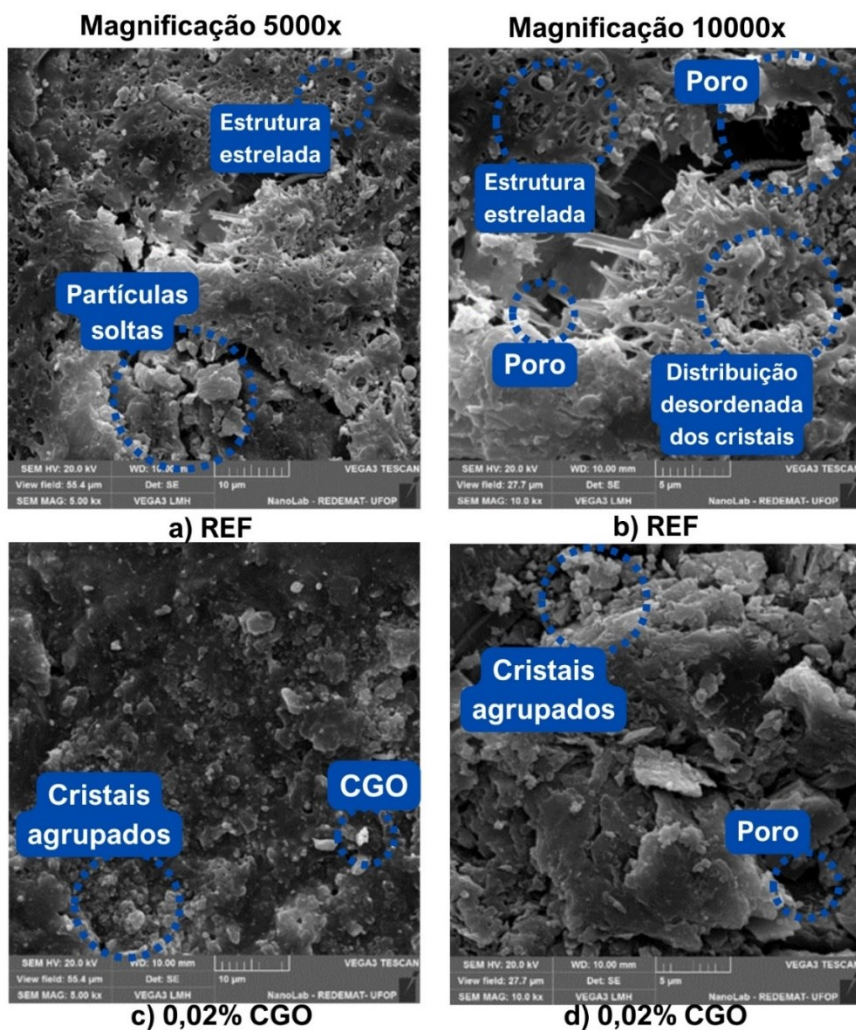


Fonte: Autora (2024).

Os resultados da MEV das amostras à 600°C, estão apresentados na Figura 61. Conforme Yu *et al.* (2024) após a exposição a 600 °C, ocorre a cimentação da interface entre o agregado e a argamassa se solta e as fissuras na interface se expandem ainda mais. Segundo Ribeiro e Tutikian (2018), até chegar na temperatura 600°C ocorrem transformações dos agregados e dissociação do Ca(OH)_2 em CaO e água, liberação das águas livres e transformações de agregados.

Os resultados do concreto de REF, Figura 61 (A) e (B), revelam poros (Devi e Khan, 2019), estrutura estrelada (Zhang *et al.*, 2024), partículas soltas e distribuição desordenada de cristais de hidrato (Ren *et al.*, 2024). É nessa temperatura que evidencia-se o efeito *spalling* com o aumento da pressão dos poros, também conhecido como mecanismo higrotérmico (Li *et al.*, 2021). Os resultados da MEV do concreto de 0,02% CGO, Figura 61 (C) e (D), apresenta poros (Devi e Khan, 2019), CGO (Ren *et al.*, 2024) e cristais agrupados (Zhang *et al.*, 2024).

Figura 61 - MEV das Amostras à 600°C.



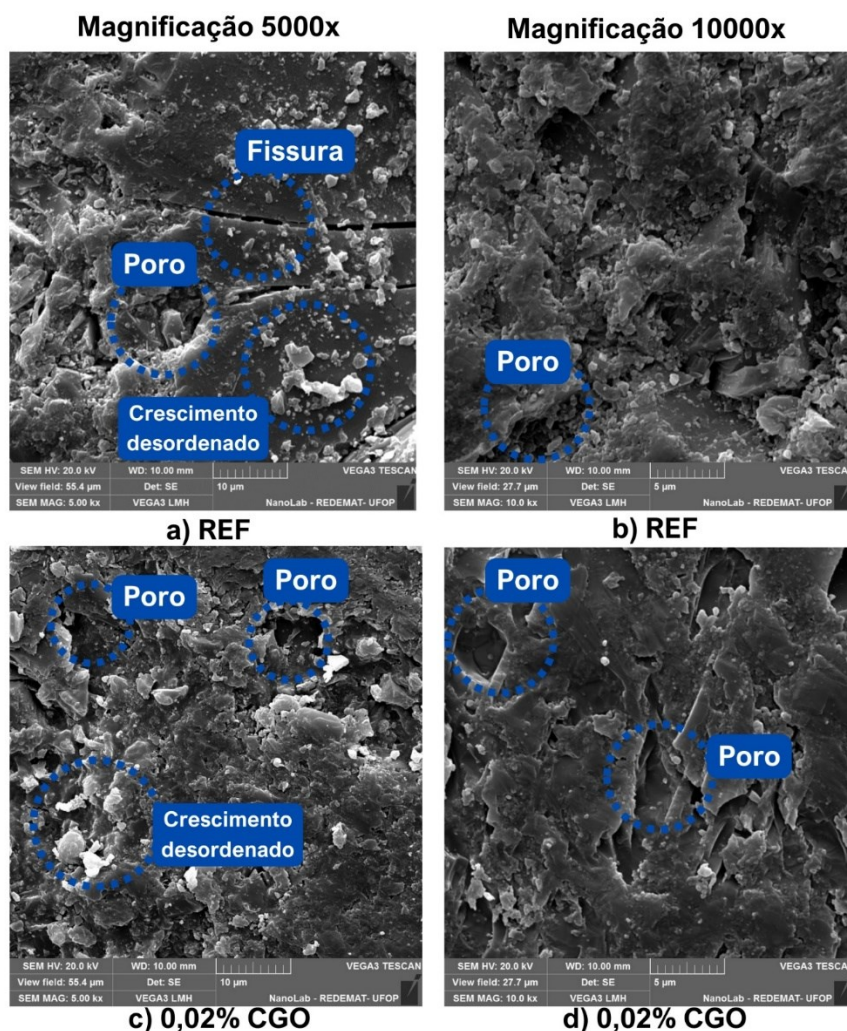
Fonte: Autora (2024).

Por fim, os resultados da MEV das amostras à 900°C estão exibidos na Figura 62. Yu *et al.* (2024) aborda que após a exposição a 800 °C, a matriz é severamente danificada, isso deve-se principalmente à grande diferença na capacidade térmica específica entre o agregado e a argamassa dentro do concreto. Sob a influência da alta temperatura, a dilatação térmica do agregado e da argamassa é diferente, o que provoca a expansão de fissuras na interface entre o

agregado e a argamassa. A expansão de fissuras na interface é um dos principais fatores que afetam o pico de tensão do HPC

As imagens da MEV do concreto de REF, Figura 62 (A) e (B) apresenta poros (Devi e Khan, 2019), fissura (Zhang *et al.*, 2024) e crescimento desordenado (Ren *et al.*, 2024). Para o concreto de 0,02% CGO, Figura 62 (C) e (D), também demonstram-se (Devi e Khan, 2019), fissura (Zhang *et al.*, 2024) e crescimento desordenado (Ren *et al.*, 2024). Na amostra, não foi possível verificar a presença de CGO. Serão necessários ensaios adicionais para constatar a presença efetiva do material.

Figura 62 - MEV das Amostras à 900°C.



Fonte: Autora (2024).

Nessa perspectiva, conforme Zhang *et al.* (2024) afirmam, ao incorporar GO à mistura de concreto, os grupos funcionais com oxigênio na superfície têm a capacidade de adsorver os componentes ativos do cimento, promovendo a formação de locais de nucleação. Como resultado, aglomerados cristalinos de produtos de hidratação CSH e CH são gerados,

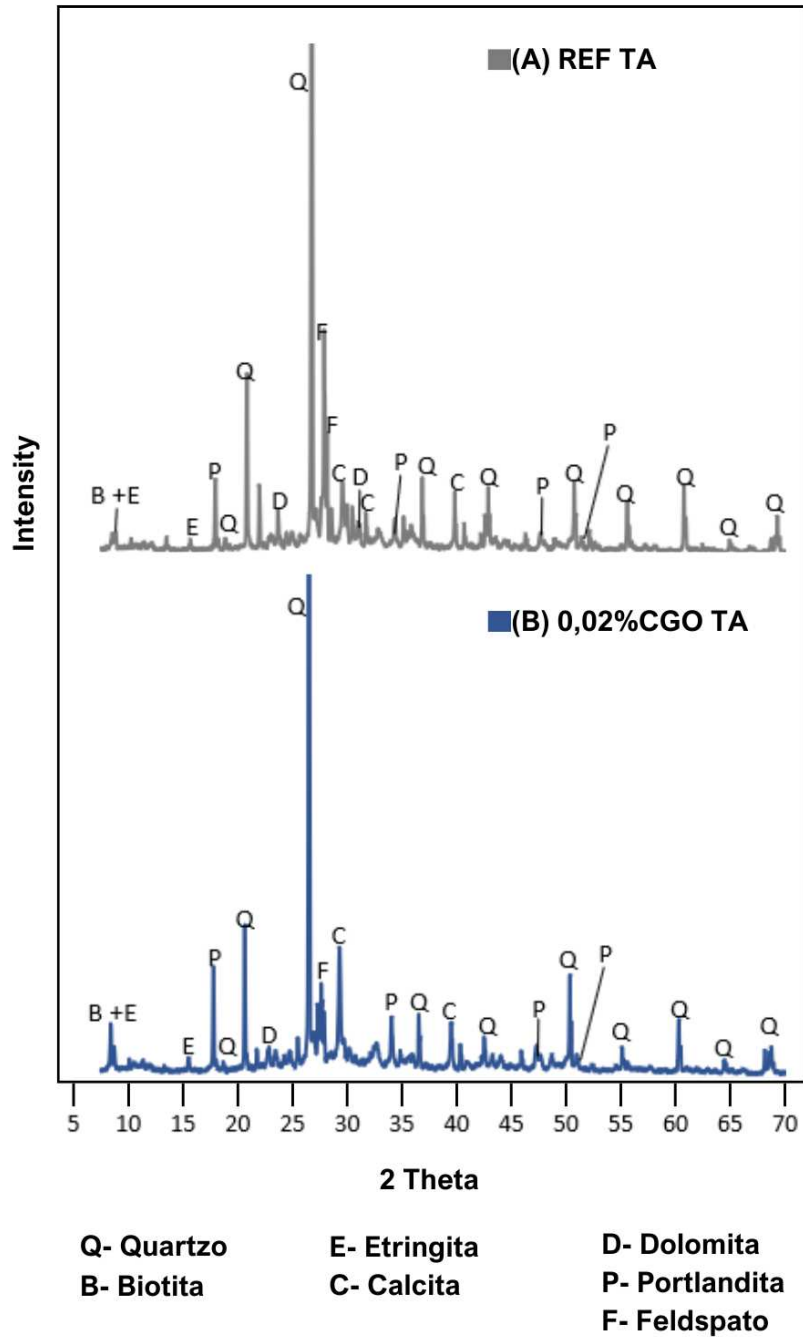
apresentando formas semelhantes a pétalas e poliédricas (Zhang *et al.*, 2024). Tal fenômeno possivelmente ocorreu com mais intensidade na MEV dos concretos com 0,02%CGO, em TA. Nesse sentido, corroborando o proposto de Zhang *et al.* (2024) a hidratação efetiva do concreto, com adição de CGO, preenche os poros internos do concreto, diminui sua porosidade, aprimora sua compactação e contribui para o aumento da resistência e durabilidade. Para que essa avaliação seja mais precisa para os concretos com 0,02% de CGO é recomendado para estudos futuros a utilização de um detector de energia dispersiva. Assim, a identificação das fases de hidratação CSH e CH será mais precisa por meio dos semiquantitativos químicos identificados, sendo esta uma limitação do presente estudo.

4.8 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Os resultados de DRX são gerados em formatos de gráficos, onde é possível verificar a caracterização estrutural do concreto. As fases cristalinas encontradas estão relacionadas com as composições químicas do material. Em geral, nas amostras apresentadas, foram encontrados os materiais: quartzo, biotita, etringita, calcita, dolomita, portlandita e feldspato, identificadas pelos picos cristalinos nos gráficos. Já as partes contínuas dos gráficos são identificadas pela presença de material halo amorfo, ou seja, apesar do indicativo de fase amorfa, o gráfico também pode apresentar fases cristalinas (Pauletto, Brehm e Gomes, 2020).

A Figura 63 mostra os resultados de DRX para as amostras do concreto de REF e de 0,02% CGO à TA. Em TA, não foi evidenciada a mudança de fases ao adicionar 0,02% de CGO, ou seja, o CGO não alterou ou inibiu picos cristalinos e todas as fases quartzo, biotita, etringita, calcita, dolomita, portlandita e feldspato foram identificadas. Isso também foi verificado na pesquisa de Kudžma *et al.* (2019), a modificação da pasta de cimento com GO não causou quaisquer alterações observáveis na sua composição de fases. Demonstra-se que os principais padrões são atribuíveis a produtos cristalinos típicos da hidratação do cimento Portland (portlandita CH ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e etringita $\text{C}_3\text{AS}_3\text{H}_32$), em consonância ao encontrado por (Lu *et al.* (2023), Verma, Chowdhury e Chakrabarti (2023) e Hulagabali, Vesmawala e Patil (2023)

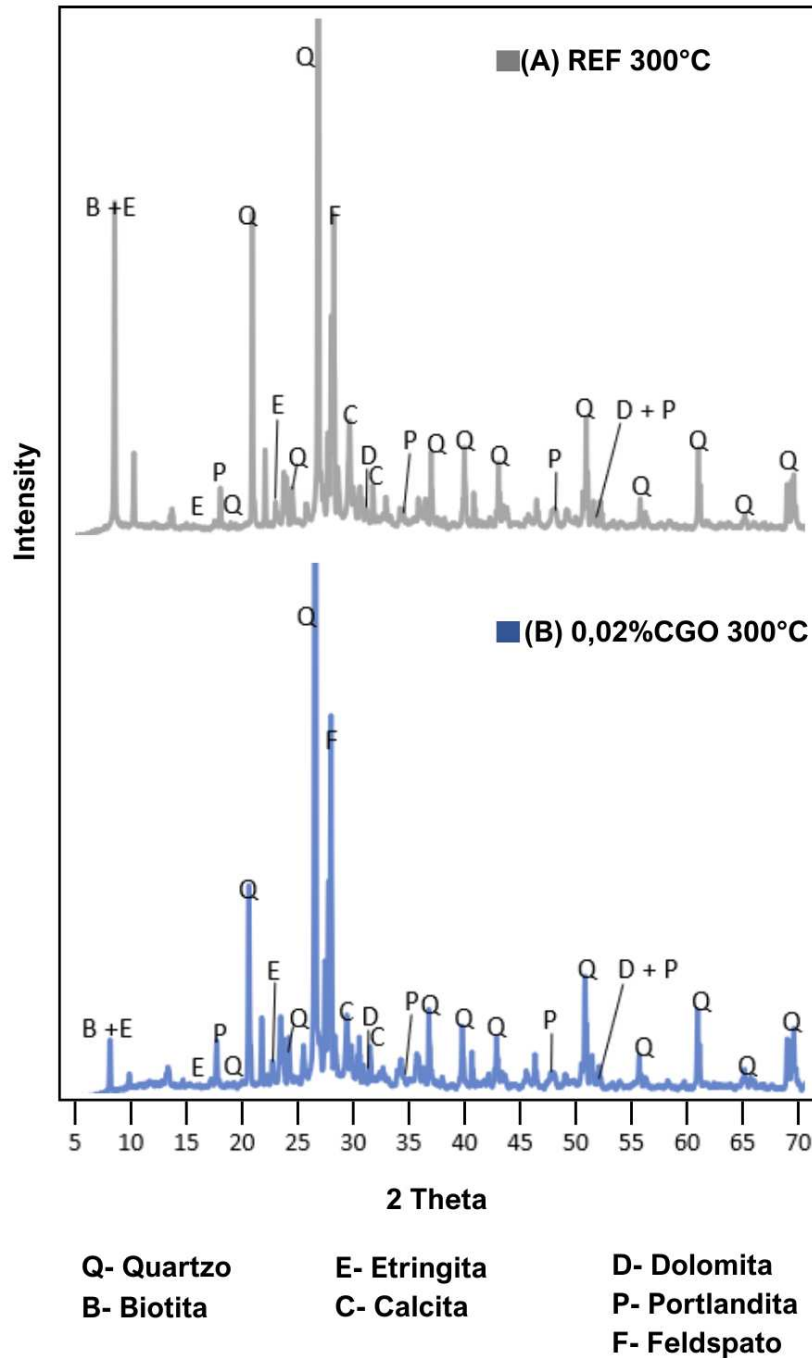
Figura 63 - DRX de amostras em TA.



Fonte: Autora (2024).

Em 300°C observou-se alterações nas fases entre a amostra de REF e a amostra de 0,02% CGO. Houve uma diminuição dos picos cristalinos em 0,02%CGO, indicando potencial aumento de fase amorfa e possivelmente o aumento dos poros. No concreto de REF, a presença de picos proeminentes indica a presença de uma fase cristalina dominante, que é complementada por uma fase amorfa menor presente no concreto (Rihan *et al.*, 2024).

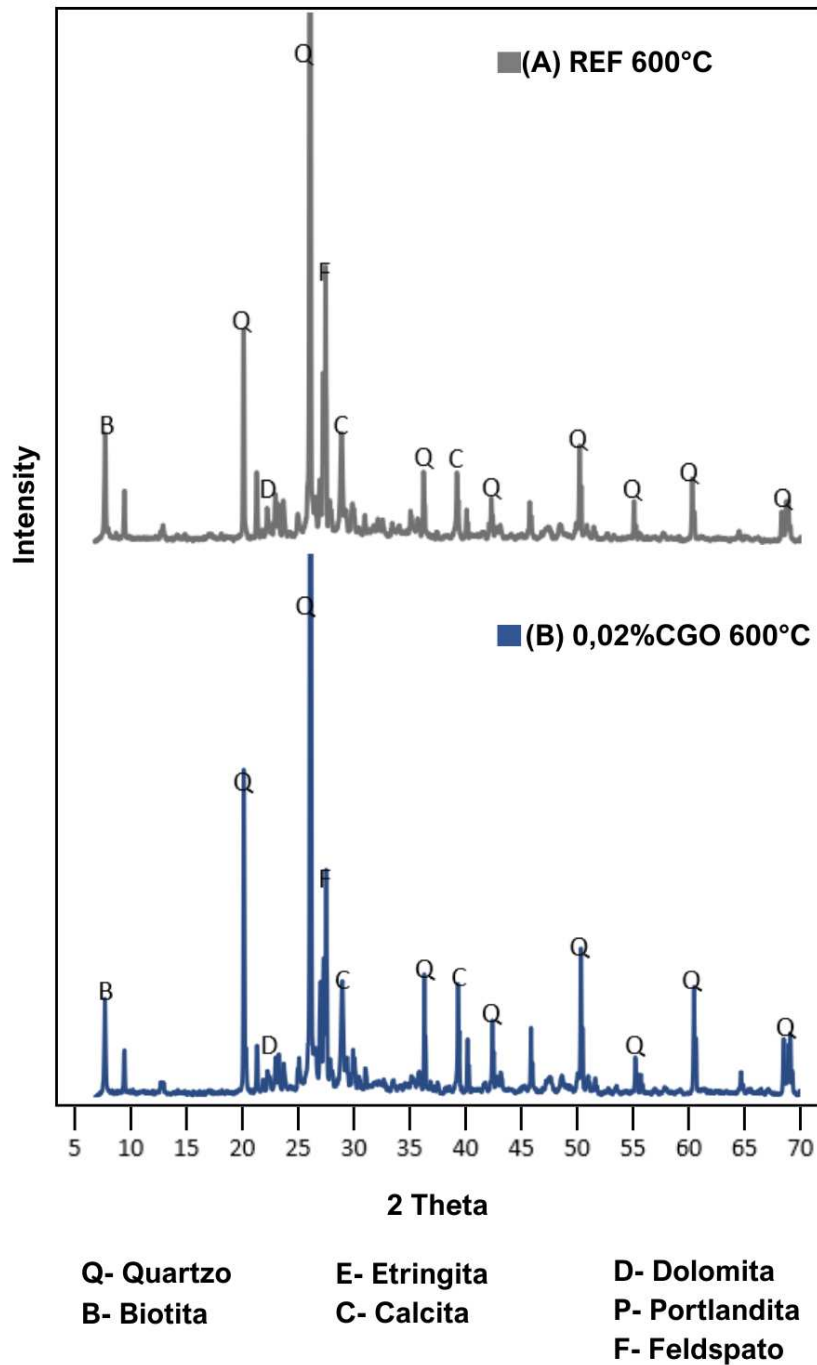
Figura 64 – DRX de amostras à 300°C.



Fonte: Autora (2024).

Na temperatura de 600°C, houve a diminuição da quantidade dos picos cristalinos, ou seja, o aumento da temperatura modificou a quantidade de estrutura cristalina da matéria. Ribeiro e Tutikian (2018) afirmam que até essa temperatura, há a transformação dos agregados (quartzo e areias), confirmando a diminuição do pico cristalino de etringita e portlandita, quando comparados a TA. Segundo Cardoso (2020), a etringita sofre desidroxilação à 250°C e a portlandita entre 400°C e 500°C.

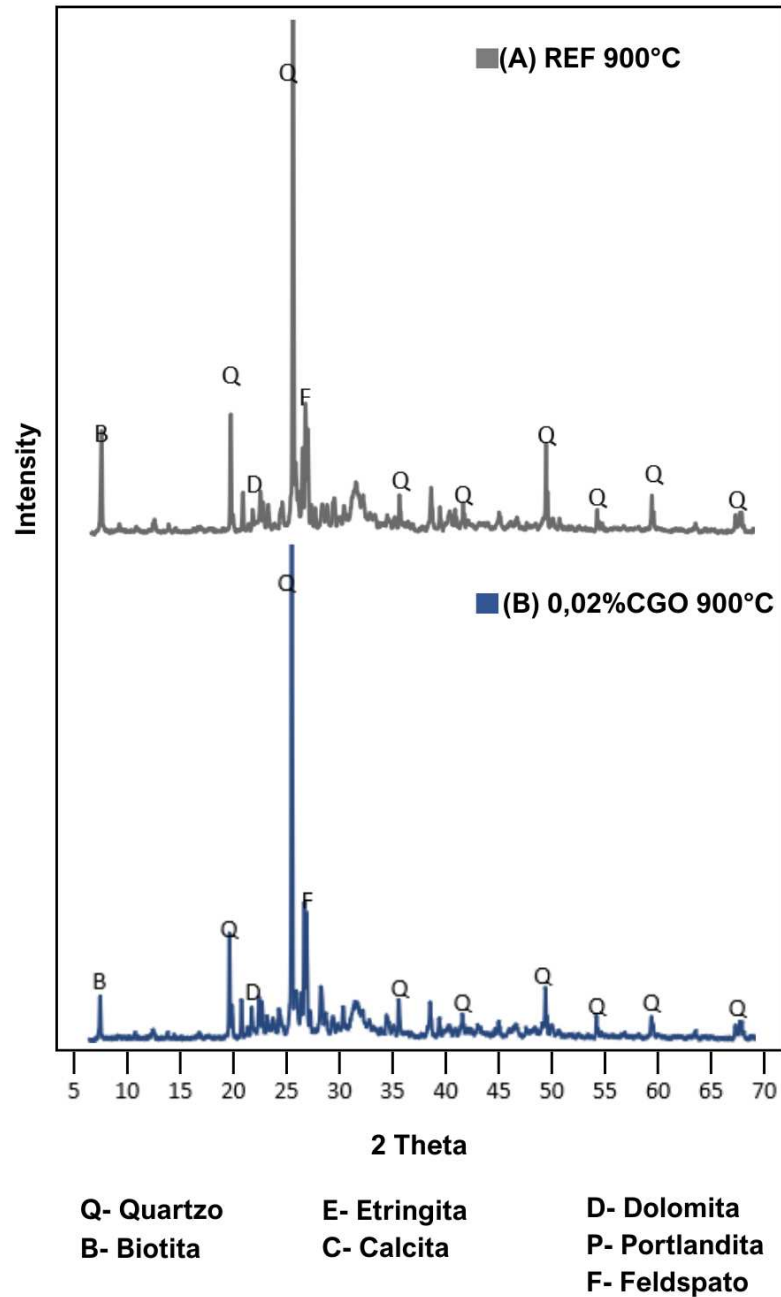
Figura 65 - DRX de amostras à 600°C.



Fonte: Autora (2024).

Na temperatura de 900°C, é observada a ausência, além da etringita e portlandita, da calcita e dolomita, apresentando a diminuição desses picos cristalinos e da maior predominância de fases halo amorfas. Segundo Santos (2021), a calcita em 850°C se transforma em óxido de cálcio e dióxido de carbono e a dolomita, em temperaturas acima de 800°C sofre o fenômeno de decarbonização, que gera óxido e dióxido de carbono.

Figura 66 - DRX de amostras à 900°C.



Fonte: Autora (2024).

A partir dos resultados das análises de DRX, é evidente que o CGO não induziu a formação de qualquer fase cristalina, mas sim pode ter contribuído como um acelerador na hidratação do cimento. Isso ocorreu devido à ligação covalente entre os grupos funcionais oxigenados do GO e os produtos resultantes da hidratação do cimento (Lin, Wei e Hu, 2016).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve o objetivo de avaliar a viabilidade técnica da adição de 0,02% de CGO ao concreto de 35Mpa, submetidos aos gradientes de temperatura (TA, 300°C, 600°C e 900°C). Observou-se que o CGO apresenta características promissoras tanto em termos de reforço mecânico quanto microestrutural em altas temperaturas, atribuídas aos seus grupos funcionais ativos, como os grupos carbonila. Essa substância demonstra capacidade de impactar positivamente o processo de hidratação do cimento e aprimorar as propriedades mecânicas do concreto. Nesse sentido, foi avaliada a condutividade térmica, o comportamento termomecânico do concreto, seus aspectos físicos diante da exposição térmica, bem como a análise de alterações cristalográficas desenvolvida nas diferentes temperaturas propostas.

- A condutividade térmica aumentou com a adição de CGO;
- Em altas temperaturas houve um aumento progressivo de índice de vazios e absorção para concreto de REF e 0,02% CGO, devido a criação de poros, vazios e transformações químicas;
- A presença de grupos carbonila no CGO pode facilitar a dispersão dos compósitos;
- No concreto de 0,02% CGO, em altas temperaturas, ocorre uma otimização na matriz, com a redução de poros e vazios em comparação ao concreto de REF;
- Houve uma diminuição da VPU ao aumentar o gradiente de temperatura, indicando, aumento de vazios ao aumentar temperaturas;
- Nas temperaturas de 600°C e 900°C a diminuição da resistência é mais expressiva em comparação com a TA;
- O CGO pode influenciar na retenção de água através do fenômeno da nucleação e também impedir a propagação de fissuras, atuando como um reforço na estrutura;
- A resistência a compressão e tração à 300°C nos concretos de REF e 0,02% CGO tiveram resultados próximos e pode ter ocorrido devido à similaridade da matriz de concreto em ambos casos, motivado principalmente pela reação tardia de hidratação dos grãos de cimento;
- Em 300°C foi observado alterações nas fases entre a amostra de REF e a amostra com 0,02% CGO, diminuindo os picos cristalinos, indicando potencial aumento de fase amorfa;
- O CGO não induziu a formação de qualquer fase cristalina, mas contribuiu como um acelerador na hidratação do cimento;

- O CGO promoveu melhorias no concreto, oferecendo propriedades aditivas positivas principalmente em concretos expostos à temperatura de 300°C.

5.1 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a aplicação de 0,02% CGO para concreto armado;
- Verificar a concentração ótima do concreto com outras derivações do óxido de grafeno, com a síntese especificada pelo grupo NANO, como o grupo epóxi (EGO);
- Verificar a concentração ótima para concretos de alto desempenho com CGO;
- Avaliar o custo de produção do concreto com 0,02%CGO;
- Verificar a aplicação do CGO em compósitos geopoliméricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432** Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações -Procedimento. [S.l.]: [s.n.], 2001.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49:** Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. [S.l.]: [s.n.], 2001.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65:** Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. [S.l.]: [s.n.], 2003.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. [S.l.]: [s.n.], 2005.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. [S.l.]: [s.n.], 2009.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:** Concreto e argamassas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. [S.l.]: [s.n.], 2011.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). [S.l.]: [s.n.], 2015.

ABNT. NBR 15575 - "Edificações habitacionais - Desempenho", 2015.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582:** Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. [S.l.]: [s.n.], 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. [S.l.]: [s.n.], 2018.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. [S.l.]: [s.n.], 2019.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7218: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. [S.l.]: [s.n.], 2019.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. [S.l.]: [s.n.], 2019.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. [S.l.]: [s.n.], 2021.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. [S.l.]: [s.n.], 2021.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16973: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. [S.l.]: [s.n.], 2021.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. [S.l.]: [s.n.], 2021.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Métodos de ensaio. [S.l.]: [s.n.], 2022.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos. [S.l.]: [s.n.], 2022.

AÏTCIN, P.-C.; FLATT, R. J. **Science and technology of concrete admixtures**. Sawston: Woodhead Publishing, 2015.

ALMEIDA, S. M. D. **ANÁLISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND ATRAVÉS DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E DE FREQUÊNCIA RESSONANTE**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. [S.l.]. 2012.

ANDOLFATO, R. P. Controle Tecnológico Básico do Concreto. **Universidade Estadual Paulista**, 2002. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/control-tecnologico-basico-do-concreto.pdf>>.

ANDRÉ GEORGE CAMALIONTE, S. P. A. D. P. A. M. V. R. COMPÓSITO DE CIMENTO E ÓXIDO DE GRAFENO: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, v. 18, p. 47-66, 2018.

ANTOLÍN-RODRÍGUEZ, A. et al. Performance of graphene oxide as a water-repellent coating nanomaterial to extend the service life of concrete structures. **CellPress**, Janeiro 2024.

ASSUNÇÃO, W. R. D.; ALMEIDA, G. M. D.; GOMES, L. G. Análise Estatística da Influência do Tipo de Cura na Resistência Mecânica do Concreto de Cimento Portland. **Engenharia Civil e suas Aplicações**, v. 7, 2021.

AZEVEDO, C. F. D. **Teoria da similitude e análise**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2019.

AZEVEDO, C. F. D. et al. Compressive strength of reduced concrete specimens considering dimensional distortion of coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 257, Outubro 2020.

BAMFORTH, P. No AccessThe water permeability of concrete and its relationship with strength. **Magazine of Concrete Research**, v. 43, p. 233-241, 2011.

BARBOZA, L. D. S.; FILHO, F. M. D. A. Concreto autoadensável com baixo consumo de cimento: impacto da redução do consumo de cimento na resistência à compressão. **Matéria - Rio de Janeiro**, v. 23, 2018.

BASTOS, A. P. O. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES NO COMPORTAMENTO DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND COM E SEM ADIÇÃO DE FÍLERCALCÁRIO**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre, p. 91. 2016.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland**. São Paulo. 2009.

BHEEL, N.; MOHAMMED, B. S. Modelling and optimization of long-term modulus of elasticity and Poisson's ratio of graphene oxide based engineered cementitious composites by using response surface methodology, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963524001626>>.

BOGAS, J. A.; M. GLÓRIA GOMES, A. G. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. **Ultrasonics**, v. 53, p. 962-972, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X12002739?via%3Dihub>>.

CÁNOVAS, M. F. Patología y Terapéutica del Hormigon Armado, Madrid: Dossat, 1984.

CARDOSO, J. O. M. **NFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NANOSÍLICA E NANO-METACAULIM NA FORMAÇÃO DE ETRINGITA TARDIA: ESTUDOS DE DISPERSÃO DAS ADIÇÕES E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE PASTAS SUBMETIDAS À CURA TÉRMICA**. Universidade Federal de Sergipe. [S.l.], p. 166. 2020.

CARRIÇO, A. et al. Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, 164, Março 2018. 121-133.

CARVALHO, A. R. D. et al. Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, p. 23, 2023.

CARVALHO, A. R. D. et al. Perspectiva dos estudos brasileiros quanto ao óxido de grafeno em matrizes de cimento portland e geopoliméricas. **V ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES**, Novembro 2023.

CARVALHO, A. R. D. et al. Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. **Construction and Building Materials**, 403, 3 November 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823027952>>.

CARVALHO, A. R. D. et al. Analysis of the thermomechanical behavior of different concretes with vermiculite and submitted to elevated temperatures. **REM, Int. Eng. J.**, 77, n. 3, jul.sep 2024.

ÇAVDAR, A. A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836811004525>>.

CBMMG. INSTRUÇÃO TÉCNICA N. 06: SEGURANÇA ESTRUTURAL DAS EDIFICAÇÕES. **Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <<https://www.bombeiros.mg.gov.br/normastecnicas>>. Acesso em: 14 Dezembro 2023.

CHATURVEDY, G. K.; PANDEY, U. K.; SINGH, M. P. Analyzing the behavior of graphene oxide on high-strength rubberized concrete properties using different optimization techniques. **Diamond and Related Materials**, 2023.

CHEN, Y. et al. High-temperature properties of cement paste with graphene oxide agglomerates. **Construction and Building Materials**, 2022.

CHUAH, S. et al. Investigation on dispersion of graphene oxide in cement composite using different surfactants. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 519–527, Fevereiro 2018.

CNN BRASIL. Incêndio em prédio deixa 15 vítimas em Belo Horizonte. **CNN BRASIL**, 2023. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/incendio-em-predio-deixa-15-vitimas-em-belo-horizonte/>>. Acesso em: 23 Março 2024.

CNN BRASIL. Depósito usado pela Receita Federal é destruído após incêndio no porto de Santos. **CNN BRASIL**, 2024. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/deposito-usado-pela-receita-federal-e-destruido-apos-incendio-no-porto-de-santos/>>. Acesso em: 23 MARÇO 2024.

CTIF (Ed.). **World Fire Statistics**. [S.l.]: Centre of Fire Statistics (International Association of Fire and Rescue Services), v. 17, 2012. Disponível em: <https://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report17_world_fire_statistics_2012.pdf>.

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

DEVI, S. C.; KHAN, R. Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete. **Journal of Building Engineering**, 2019.

DIAS, A. R. D. O. et al. Behavior of concrete subjected to high temperatures. **Matéria**, Rio de Janeiro, 2020.

FONSECA, T. D. D. S. **DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA TERMOISOLANTE PARA REVESTIMENTO DE PAREDES DE ALVENARIA EM EDIFICAÇÕES COM USO DE AREIA DE BRITAGEM E VERMICULITA**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. JUIZ DE FORA. 2023.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. Manual de conforto térmico. São Paulo: Studio Nobel, v. 7, 2006. p. 243.

G1. Incêndio atinge cabine de força no subsolo do Edifício Itália, prédio histórico no Centro de SP. **G1**, 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2024/02/18/incendio-atinge-cabine-de-forca-no-subsolo-do-edificio-italia-no-centro-de-sp.ghtml>>. Acesso em: 23 Março 2024.

GAO, W. The Chemistry of Graphene Oxide. **Graphene Oxide**, p. 91-95, Janeiro 2015.

GAO, Y. et al. Reinforced impermeability of cementitious composites using graphene oxide-carbon nanotube hybrid under different water-to-cement ratios. **Construction and Building Materials**, 222, 20 Outubro 2019. 610-621.

GARCIA, D. R. **DESENVOLVIMENTO DE APARATO TÉRMICO ALTERNATIVO DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO ISOLANTES**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2021.

GENCEL, O. et al. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. **Construction and Building Materials**, p. 20, 2021.

GHAFARI, E.; COSTA, H.; JÚLIO, E. N. B. S. Critical review on eco-efficient ultra high performance concrete enhanced with nano-materials. **Construction and Building Materials**, 2015.

GIL, A.; BANERJI, S.; KODUR, V. Factors influencing pore pressure measurements in concrete during heating and its influence on fire-induced spalling. **Cement and Concrete Composites**, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946523003025#bib14>>.

GOMES, L. B. **Estudo da formação do alnbo4 no sistema (x al2o3 + 1-x nb2o5) por técnicas de difração de raios x e microscopia eletrônica em função da composição e temperatura de tratamento térmico**. Porto Alegre. 2016.

GUIMARÃES AURELIANO, L. **ASPECTOS ECONÔMICOS E TÉCNICOS DA LAVRA DE AGREGADOS**. Universidade Federal de Goiás. CATALÃO, p. 53. 2018.

GUO, J. et al. Study on the evolution of concrete pore structure and moisture transfer mechanism after high temperature based on different sequence NMR technology. **Construction and Building Materials**, v. 422, Abril 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824008808>>.

HAN, B. et al. Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 70, Março 2015. 69-81.

HAN, S. et al. Graphene-oxide-reinforced cement composites mechanical and microstructural characteristics at elevated temperatures. **Nanotechnology Review**, 2022.

HANDOO, S.; AGARWAL, S.; AGARWAL, S. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1009-1018, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601007360?via%3Dihub>>.

HOU, D. et al. Reactive molecular dynamics and experimental study of graphene-cement composites: Structure, dynamics and reinforcement mechanisms. **Carbon**, v. 115, p. 188-208, Maio 2017.

HULAGABALI, M. M.; VESMAWALA, G. R.; PATIL, Y. D. Synthesis, characterization, and application of graphene oxide and reduced graphene oxide and its influence on rheology, microstructure, and mechanical strength of cement paste. **Journal of Building Engineering**, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223007659?via%3Dihub>>.

INDUKURI, C. S. R.; NERELLA, R. Enhanced transport properties of graphene oxide based cement composite material. **Journal of Building Engineering**, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221000309?via%3Dihub>>.

INDUKURI, C. S. R.; NERELLA, R. Enhanced transport properties of graphene oxide based cement composite material, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221000309?via%3Dihub#fig1>>.

JA, T. S.; MATHEW, M.; GEORGE, S. Experimental investigations on the impact of graphene-based oxides in concrete. **Materialtoday: proceedings**, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323043249#b0005>>.

KANG, X. et al. Dissolution and precipitation behaviours of graphene oxide / tricalcium silicate composites. **Composites Part B: Engineering**, 1 April 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107800>>.

KANNANGARA, T. et al. Existing theories of concrete spalling and test methods relating to moisture migration patterns upon exposure to elevated temperatures – a review. **Case Stud. Constr. Mater.**, 2022.

KRISHNA, A. et al. Mechanical properties of high-strength micro steel fibre reinforced concrete subjected to high temperatures. **MaterialsToday: proceedings**, 2023.

KUDŽMA, A. et al. Study on the Effect of Graphene Oxide with Low Oxygen Content on Portland Cement Based Composites. **MDPI**, 2019.

LEAL, L. L. **Efeitos do óxido de grafeno nas propriedades termomecânicas do concreto**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA FACULDADE DE ENGENHARIA. [S.l.]. 2024.

LI, L. et al. Surface Cracking and Fractal Characteristics of Cement Paste after Exposure to High Temperatures. **Investigation and Application of Fractals in Civil Engineering Materials**, Agosto 2022.

LI, X. et al. Incorporation of graphene oxide and silica fume into cement paste: A study of dispersion and compressive strength. **Construction and Building Materials**, 123, Outubro 2016. 327-335.

LI, Y. et al. Pore pressure build-up and explosive spalling in concrete at elevated temperature: A review. **Construction and Building Materials**, 2021.

LIMA, A. H. D. et al. Origin of optical bandgap fluctuations in graphene oxide. **The European Physical Journal B**, v. 93, Junho 2020.

LIMA, C. I. V. et al. CONCRETO E SUAS INOVAÇÕES. **Cadernos de Graduação Ciências exatas e suas tecnologias**, Maceió, v. 1, p. 31-40, 2014.

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, Fevereiro 2016.

LONG, W.-J. et al. Enhanced dynamic mechanical properties of cement paste modified with graphene oxide nanosheets and its reinforcing mechanism. **Cement and Concrete Composites**, 2018.

LU, D. et al. Nano-engineering the interfacial transition zone between recycled concrete aggregates and fresh paste with graphene oxide. **Construction and Building Materials**, junho 2023.

LU, L.; YU, Z.; YIN, B. Structure evolution of the interface between graphene oxide-reinforced calcium silicate hydrate gel particles exposed to high temperature. **Computational Materials Science**, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025619307396>>.

LV, S. H. et al. Fabrication of polycarboxylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 66, p. 1-9, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946515300573?via%3Dihub>>.

MARTINS, A. C. P. et al. Steel slags in cement-based composites : an ultimate review on characterization, applications and performance. **Construction and Building Materials**, 12 julho 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais, São Paulo, 1994.

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

MEMON, S. A. et al. Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature – A review. **Construction and Building Materials**, 2019.

MENDES, J. C. et al. Correlation Between Ultrasonic Pulse Velocity and Thermal Conductivity of Cement-Based Composites. **Journal of Nondestructive Evaluation**, Abril 2020.

MENG, S. et al. The role of graphene/graphene oxide in cement hydration. **Nanotechnology Reviews**, 2021.

MOGHADAM, M. A.; IZADIFARD, R. A. Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures. **Fire Safety Journal**, 113, Maio 2020.

MOHAMMED, A. et al. Effects of graphene oxide in enhancing the performance of concrete exposed to high-temperature. **Australian Journal Of Civil Engineering**, v. 17, p. 61-71, 2017.

MOKHTAR, M. M. et al. Mechanical performance, pore structure and micro-structural characteristics of graphene oxide nano platelets reinforced cement. **Construction and Building Materials**, 138, 1 Maio 2017. 333-339.

MOTTA, E. F. B. **Comparação da adição de nanotubos de carbono funcionalizados e não funcionalizados**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. JUIZ DE FORA, p. 102. 2023.

NASSER, I. M. et al. The effect of nanosilica incorporation on the mechanical properties of concrete exposed to elevated temperature: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, 29, 04 Janeiro 2022. 15318-15336.

NAYMING et al. Simple room-temperature preparation of high-yield large-area graphene oxide. **International Journal of Nanomedicine**, p. 3443-3448, 19 Dezembro 2011.

NKINAMUBANZI, P.-C.; MANTELLATO, S.; FLATT, R. J. Superplasticizers in practice. **Science and Technology of Concrete Admixtures**, p. 353-377, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/288116885_Superplasticizers_in_practice>.

OLIVEIRA, A. M. C. P. D. **Consumo de água na produção de concreto usinado: quantificação e principais fatores de influência.** Consumo de água na produção de concreto usinado: quantificação e principais fatores de influência. São Leopoldo. 2020.

PARVEEN, S.; RANA, S.; FANGUEIRO, R. A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofiber Reinforced Cementitious Composites. **Journal of Nanomaterials**, Janeiro 2013.

PAULETTO, A. R.; BREHM, F. A.; GOMES, L. B. ANÁLISE DO USO DA TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X EM ESTUDOS SOBRE MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES. **Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**, Porto Alegre, setembro 2020.

PENG, H. et al. Mechanical properties and microstructure of graphene oxide cement-based composites, 2019.

PRAKASH, J. et al. Role of graphene oxide infusion in concrete to elevate strength and fire performance in construction concrete. **Diamond and Related Materials**, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963524004825#bb0090>>.

PULIYASSERI, R. et al. Synthesis of nitrogen-doped graphene oxide by nanosecond pulsed laser ablation of graphene in liquid for bioimaging applications. **Diamond and Related Materials**, v. 143, Março 2024.

RADMAN, A.; JOORABCHI, N. Property assessment of concretes with graphene oxide mixed cement. **IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng**, 2019.

REDDY, P. V. R. K.; PRASAD, D. R. The role of graphene oxide in the strength and vibration characteristics of standard and high-grade cement concrete. **Journal of Building Engineering**, 2023.

REN, B. et al. Impact mechanical properties and pore structure of graphene oxide. **Journal of Building Engineering**, v. 85, 2024.

REN, B. et al. Impact mechanical properties and pore structure of graphene oxide. **Journal of Building Engineering**, v. 85, 2024.

RIBEIRO, D. V.; TUTIKIAN, B. F. Durabilidade do concreto submetido a situações extremas. In: _____ **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018.

RIHAN, M. A. M. et al. Effect of sugarcane bagasse ash addition and curing temperature on the mechanical properties and microstructure of fly ash-based geopolymer concrete. **Open Ceramics**, 2024.

RILEM. **RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX, SYSTÈMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES. RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 4: Tensile strength**. Viena (Áustria): [s.n.], 2000.

RODRIGUES, D. C. **INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS DO CONCRETO: UMA**. UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRÍ. JUAZEIRO DO NORTE, p. 52. 2018.

ROSA, N. P. **ESTUDO DA VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM CARBONILA AO CONCRETO SOB ÓTICAS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**. Juiz De Fora. 2023.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Materials Research**, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/250030119_Avaliacao_da_condutividade_termica_de_concretos_leves_com_argila_expandida>.

SANTOS, B. M. **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO VIA ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: estudo comparativo**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. [S.l.]. 2021.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

SHEIK, T. M. et al. The mechanics of carbon-based nanomaterials as cement reinforcement — A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 303, 2021.

SOGAYAR, A. R.; DIAS, L. I. R.; PEREIRA, M. C. **Utilização de óxido de grafeno em concreto com resíduos de construção civil**. Mackenzie. Higienópolis. 2021.

STANKOVICH, S. et al. Graphene-Based Composite Materials. **Nature**, p. 282-286, Julho 2006.

STRAPASSON, H. V. et al. Efeito da nanossílica sobre as propriedades mecânicas de concretos de alta resistência. **CONCRETO & Construções**, v. 103, p. 74-76, 2021.

SUN, Y. et al. Thermal conductivity and mechanical properties of porous concrete materials, 209, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X17312417?via%3Dihub>>.

THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. **ACTIVITY REPORT**. Bruxelas: CEMBUREAU, 2021.

TRTNIK, G.; KAVČIČ, F.; TURK, G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. **Ultrassônico**, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0041624X08000851?via%3Dihub>>.

TUFAIL, M. et al. Effect of Elevated Temperature on Mechanical Properties of Limestone, Quartzite and Granite Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, 11, 2017. 17-28. Disponível em: <<https://ijcsm.springeropen.com/articles/10.1007/s40069-016-0175-2>>.

VALLURUPALLI, K. et al. Effect of graphene oxide on rheology, hydration and strength development of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 265, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820323163?via%3Dihub>>.

VERMA, P.; CHOWDHURY, R.; CHAKRABARTI, A. Effect of adding highly reduced graphene oxide (rGO) nanosheets based nanomaterial on cement composites. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

VERMA, P.; CHOWDHURY, R.; CHAKRABARTI, A. Effect of adding highly reduced graphene oxide (rGO) nanosheets based nanomaterial on cement composites. **Materials Today Proceedings**, 2023.

VICENTINI, N. C. **Síntese e Caracterização de Óxido de Grafeno Reduzido e Sulfonado via Sal Arildiazônio de Ácido Sulfanílico para aplicações em Eletrônica Orgânica**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2019.

WANG, Z.-K. et al. Damage evolution and dynamic constitutive model of geopolymeric concrete at elevated temperature, Janeiro 2016.

XU, L. et al. Study on Mechanical Properties of Basalt Fiber-Reinforced Concrete with High Content of Stone Powder at High Temperatures. **Advances in Materials Science and Engineering**, 17 Dezembro 2021.

YAN, J. et al. High Temperature Exposure Assessment of Graphene Oxide Reinforced Cement. **Frontiers In Materials**, 9, 2022. Disponivel em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2022.786260/full>>.

YANG, H. et al. Experimental study of the effects of graphene oxide on microstructure and properties of cement paste composite. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 102, Novembro 2017. 263-272.

YANG, H. et al. Experimental study of the effects of graphene oxide on microstructure and properties of cement paste composite. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 102, 2017. Disponivel em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X17302804>>.

YAO, Y.; LU, H. Mechanical properties and failure mechanism of carbon nanotube concrete at high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 297, 2021. Disponivel em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821015427?via%3Dihub>>.

YU, Z. et al. Research on uniaxial mechanical performance of high-performance concrete after high temperature rapid cooling and damage mechanism analysis, 2024.

ZAID, O. et al. Experimental study on the properties improvement of hybrid graphene oxide fiber-reinforced composite concrete. **Diamond and Related Materials**, 2022.

ZHANG, R. et al. Mechanism of graphene oxide concrete macro-micro properties evolution under large temperature difference freeze-thaw action. **Construction and Building Materials**, v. 415, 2024.