UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Gabriela dos Santos Pacífico

Efeitos da incorporação de óxido de grafeno rico em grupo carbonila nas propriedades termomecânicas de concretos de alto desempenho

Juiz de Fora

2025

Gabriela dos Santos Pacífico

Efeitos da incorporação de óxido de grafeno rico em grupo carbonila nas propriedades termomecânicas de concretos de alto desempenho

Dissertação apresentada ao programa ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador (a): Prof.ª Dra. Thaís Mayra de Oliveira

Coorientador (a): Prof.ª Dra. Júlia Castro Mendes

Juiz de Fora

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pacífico, Gabriela dos Santos .
Efeitos da incorporação de óxido de grafeno rico em grupo carbonila nas propriedades termomecânicas de concretos de alto desempenho / Gabriela dos Santos Pacífico. -- 2025.
139 p. : il.

Orientadora: Thaís Mayra de Oliveira
Coorientadora: Júlia Castro Mendes
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

1. Óxido de grafeno. 2. Concreto de alto desempenho. 3. Temperatura elevada. 4. Propriedades mecânicas. I. Oliveira, Thaís Mayra de , orient. II. Mendes, Júlia Castro , coorient. III. Título.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PEC)

Gabriela dos Santos Pacífico

Título: "Efeitos da incorporação de óxido de grafeno rico em carbonila nas propriedades termomecânicas de concretos de alto desempenho"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil . Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 11/03/2025

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Thais Mayra de Oliveira - Orientadora e Presidente da Banca

Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Julia Castro Mendes - Coorientadora

Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Michèle Cristina Resende Farage- Membro titular interno

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Welber Gianini Quirino - Membro titular interno

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Leonardo Gonçalves Pedroti - Membro titular externo

Universidade Federal de Viçosa

Juiz de Fora, 12/03/2025.

Documento assinado eletronicamente por **Thais Mayra de Oliveira**, **Professor(a)**, em 12/03/2025, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **LEONARDO GONÇALVES PEDROTI**, **Usuário Externo**, em 12/03/2025, às 17:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Júlia Castro Mendes**, **Professor(a)**, em 17/03/2025, às 16:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Michele Cristina Resende Farage**, **Professor(a)**, em 18/03/2025, às 15:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Welber Gianini Quirino**, **Professor(a)**, em 24/03/2025, às 16:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2287879** e o código CRC **4CA7B22E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por me sustentar durante os meus estudos e por me conceder saúde e determinação para perseverar.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, especialmente à minha mãe e ao meu marido, pelo amor, incentivo e apoio em todas as minhas decisões ao longo dessa jornada.

À minha orientadora, professora Thaís Mayra de Oliveira, por todo o aprendizado, disponibilidade, dedicação e paciência, sempre me auxiliando e incentivando.

À minha coorientadora, professora Júlia Castro Mendes, por todos os conselhos e críticas construtivas, essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À CAPES, pela bolsa concedida e pelo incentivo ao desenvolvimento científico, e à FAPEMIG, pela oportunidade de participar e contribuir para a realização do projeto TEC APQ 01904/22.

À equipe do laboratório NANO do Departamento de Física, pela parceria e auxílio no desenvolvimento desta pesquisa.

À equipe do laboratório da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP, pelo apoio na realização do ensaio de condutividade térmica.

À Petra Agregados e à Sika, pela disponibilização dos materiais utilizados nesta pesquisa.

À Romilda, por estar sempre à disposição para me auxiliar com os ensaios no laboratório de materiais de construção civil da UFJF.

Ao Aldo Ribeiro de Carvalho e à Marcela Martins Carrara, pelo apoio constante, troca de conhecimentos e pelo trabalho em equipe, que foram fundamentais para o sucesso deste projeto.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

O uso do concreto de alto desempenho (CAD), caracterizado principalmente por sua elevada resistência à compressão e durabilidade, tem crescido significativamente. No entanto, por serem concretos com menor índice de vazios, os CADs têm maior potencial de fragmentação ou lascamentos explosivos (*spalling*) quando sujeitos a altas temperaturas. Nos últimos anos, nanomateriais têm sido adicionados aos concretos, visando melhorar suas propriedades. Dentre eles, o óxido de grafeno tem demonstrado um potencial significativo devido à sua grande área superficial específica, elevada resistência mecânica e boa estabilidade química. Nesse cenário, o presente trabalho avaliou os efeitos da incorporação de óxido de grafeno rico em carbonila (CGO) nas propriedades termomecânicas de CAD C55 submetidos a altas temperaturas (300, 600 e 900 ºC) e temperatura ambiente (TA). Para este fim, foram produzidos dois tipos de CAD: convencional (C-REF) e com CGO na concentração de 0,02% (C-CGO) em relação à massa de cimento. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e à tração, velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU), módulos de elasticidade estático e dinâmico, perda de massa, massa específica, índice de vazios, absorção de água, microscopia eletrônica de varredura (MEV), DRX e condutividade térmica. O estudo demonstrou que a adição do CGO resultou em um aumento de aproximadamente 27% na resistência à compressão e 16,5% na resistência à tração, além de um incremento de 31,5% no módulo de elasticidade, atuando como um reforço na estrutura do material em TA. No tocante às propriedades residuais após altas temperaturas, o C-CGO teve um desempenho melhor, em média, de 26% em relação à resistência à compressão, 13% à tração e 60% ao módulo de elasticidade. Os resultados de condutividade térmica do C-CGO em TA e após exposição as temperaturas adotados foram inferiores aos resultados do concreto C-REF, demonstrando o potencial da incorporação deste nanomaterial para o desenvolvimento de concretos mais isolantes. Esses resultados indicam que a adição de CGO pode atuar na melhoria das propriedades mecânicas e também no desempenho térmico de concretos de alto desempenho submetidos a elevadas temperaturas.

Palavras-chave: Óxido de grafeno; concreto de alto desempenho; temperatura elevada; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The use of High-Performance Concrete (HPC), primarily characterized by its high compressive strength and durability, has grown significantly. However, due to their lower porosity, HPCs present a greater potential for fragmentation or explosive spalling when exposed to high temperatures. In recent years, nanomaterials have been incorporated into concrete to enhance its properties. Among these, graphene oxide has shown significant potential due to its large specific surface area, high mechanical strength, and good chemical stability. In this context, the present study evaluated the effects of incorporating carbonyl-rich graphene oxide (CGO) on the thermomechanical properties of C55-grade HPC subjected to elevated temperatures (300°C, 600°C, and 900°C) and ambient temperature (AT). For this purpose, two types of HPC were produced: a reference mix (C-REF) and a mix containing CGO at a concentration of 0.02% by cement weight (C-CGO). Tests were conducted to assess compressive and tensile strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), static and dynamic modulus of elasticity, mass loss, specific mass, void index, water absorption, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and thermal conductivity.The study demonstrated that the addition of CGO led to an increase of approximately 27% in compressive strength, 16.5% in tensile strength, and a 31.5% increase in modulus of elasticity at ambient temperature, acting as a reinforcement in the material's structure. Regarding residual properties after high-temperature exposure, the C-CGO mix showed superior performance compared to C-REF, with improvements of approximately 26% in compressive strength, 13% in tensile strength, and 60% in modulus of elasticity. Thermal conductivity results for C-CGO at ambient temperature and after exposure to elevated temperatures were lower than those of C-REF, highlighting the potential of this nanomaterial for the development of more thermally insulating concrete. These findings indicate that CGO incorporation can enhance both the mechanical performance and thermal resistance of high-performance concretes subjected to elevated temperatures..

Keywords: Graphene oxide; high-performance concrete; elevated temperature; mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Estrutura molecular do óxido de grafeno (A: Grupo epoxílico, B: Grupo hidroxílico, C: Grupo carboxílico). 19
Figura 2 - Representação gráfica da estrutura do óxido de grafeno (GO) (A) e do óxido de grafeno rico em carbonila (CGO) (B).....20
Figura 3 - Processo de crescimento e mecanismo de formação de cristais de hidratação do cimento em diferentes dosagens de GO (a) Cristais semelhantes a flores: (a1) 0,01% (a2) 0,02%; e (a3) 0,06%. (b) Cristais densos em forma de bastão: (b1) 0,03%;(b2) 0,03%; e (b3) 0,03%. (c) Cristais poliédricos: (c1) 0,04%; (c2) 0,04%; e (c3) 0,04%. (d) Cristais lamelares: (d1) 0,05%; (d2) 0,05%; e (d3) 0,06%. 21
Figura 4 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura de 0,1% (a) e 0,2% (b) de GO em relação à massa de cimento. 23
Figura 5 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura de 0,0% (a), 0,05% (b) e 0,10% (c) de GO em relação à massa de cimento. 23
Figura 6 - MEV de concreto submetido a temperatura de 700 °C. 26
Figura 7 – Mecanismo termo-hídrico efeito s*palling* em concretos expostos a altas temperaturas 28
Figura 8 - Fluxograma do planejamento experimental 32
Figura 9 - Analisador de tamanho de partículas por difração a laser HELOS/BR. 33
Figura 10 - Curva granulométrica do cimento CPV - ARI. 34
Figura 11 – Agregado graúdo - Brita basáltica 0. 34
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado graúdo - Brita 0. 35
Figura 13 - Agregado miúdo - Areia Natural. 36
Figura 14 - Curva granulométrica do agregado miúdo - areia natural. 37
Figura 15 - Adição Mineral Sílica Ativa. 37
Figura 16 - Curva granulométrica da sílica ativa. 38
Figura 17 - Aditivos Sika ViscoCrete GL 51 CB e Sika MasterPolyheed 130. 39
Figura 18 - Óxido de grafeno rico em grupos de carbonila disperso em água. 40
Figura 19 – Materiais pesados para a produção do concreto. 41
Figura 20 - Mistura dos materiais na argamassadeira. 42
Figura 21 – Adição do CGO na mistura. 43
Figura 22 – Corpos de prova cilíndricos 5x10 cm em seus moldes. 44
Figura 23 – Molde para ensaio MEV e DRX. 44

Figura 24 – Disposição das amostras na mufla para exposição térmica. 45
Figura 25 - Ensaio de resistência à compressão axial. 47
Figura 26 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral. 48
Figura 27 - Ensaio de velocidade do pulso ultrassônico. 50
Figura 28 - Ensaio de módulo de elasticidade estático. 51
Figura 29 – Amostras C-REF e C-CGO após exposição térmica para ensaio MEV e DRX. 53
Figura 30 - Microscópio eletrônico de varredura. 53
Figura 31 - Difratômetro de raios X. 54
Figura 32 - Medidor de condutividade DTC 300 TA Instruments. 55
Figura 33 – Amostras cilíndricas (50mm x 25mm) empregadas ensaio de condutividade térmica. 56
Figura 34 - Resultados do ensaio de índices de vazios (I_V) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC. 57
Figura 35 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão (A) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC. 58
Figura 36 - Resultados do ensaio de massas específica real (ρ_r) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC. 60
Figura 37 - Resultados da perda de massa dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, após 300ºC, 600ºC e 900ºC. 62
Figura 38 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC. 64
Figura 39 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC. 66
Figura 40 - Resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC. 68
Figura 41 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico (E_d) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC. 69
Figura 42 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático (E_{ci}) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC. 71
Figura 43 - MEV em TA, magnificação de 3.000x; 5.000x e 10.000x dos traços C-REF e C-CGO. 72
Figura 44 - MEV em 300ºC, magnificação de 3.000x; 5.000x e 10.000x dos traços C-REF e C-CGO. 74

Figura 45 - MEV em 600ºC, magnificação de 3.000x; 5.000x e 10.000x dos traços C-REF e C-CGO. 76
Figura 46 - MEV em 900ºC, magnificação de 3.000x; 5.000x e 10.000x dos traços C-REF e C-CGO. 77
Figura 47 - DRX das amostras C-REF e C-CGO em TA e após exposição a 300ºC, 600ºC e 900ºC....78
Figura 48 - Resultados do ensaio de condutividade térmica dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC 80
Figura 49 - Amostras C-REF e C-CGO em TA e após a exposição as temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C. 82
Figura 50 – Índice de Vazios - TA 107
Figura 51 - Índice de Vazios – 300ºC. 108
Figura 52 - Índice de Vazios – 600ºC. 109
Figura 53 - Índice de Vazios – 900ºC. 110
Figura 54 – Massa específica real - TA 111
Figura 55 - Massa específica real – 300ºC....112
Figura 56 - Massa específica real – 600ºC....113
Figura 57 – Massa específica real – 900ºC. 114
Figura 58 – Absorção de água – TA. 115
Figura 59 – Absorção de água – 300ºC. 116
Figura 60 – Absorção de água 600ºC. 117
Figura 61 – Absorção de água 900ºC. 118
Figura 62 – Perda de massa – 300ºC. 119
Figura 63 – Perda de massa – 600ºC. 119
Figura 64 – Perda de massa – 900ºC. 119
Figura 65 – Velocidade de pulso ultrassônico – TA. 120
Figura 66 – Velocidade de pulso ultrassônico – 300ºC. 121
Figura 67 - Velocidade de pulso ultrassônico – 600ºC. 122
Figura 68 - Velocidade de pulso ultrassônico – 900ºC. 123
Figura 69 – Módulo de elasticidade dinâmico – TA. 124
Figura 70 - Módulo de elasticidade dinâmico – 300ºC. 125
Figura 71 - Módulo de elasticidade dinâmico – 600ºC. 126
Figura 72 - Módulo de elasticidade dinâmico – 900ºC. 127
Figura 73 - Módulo de elasticidade estático – TA. 128

Figura 74 - Módulo de elasticidade estático – 300ºC. 129
Figura 75 - Módulo de elasticidade estático – 600ºC. 130
Figura 76 - Módulo de elasticidade estático – 900ºC. 131
Figura 77 – Resistência à compressão axial – TA. 132
Figura 78 - Resistência à compressão axial – 300ºC. 133
Figura 79 - Resistência à compressão axial – 600ºC. 134
Figura 80 - Resistência à compressão axial – 900ºC. 135
Figura 81 - Resistência à tração – TA. 136
Figura 82 - Resistência à tração – 300ºC. 137
Figura 83 - Resistência à tração – 600ºC. 138
Figura 84 - Resistência à tração – 900ºC. 139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Transformações na microestrutura do concreto com o aumento da temperatura. 26
Tabela 2 - Propriedades Físico-Químicas do cimento CPV – ARI. 33
Tabela 3 - Caracterização física agregado graúdo - Brita 0. 35
Tabela 4 - Caracterização física agregado miúdo - Areia natural..... 36
Tabela 5 - Características físicas e químicas da sílica ativa. 38
Tabela 6 - Características dos aditivos Sika..... 39
Tabela 7 - Traços de referência (C-REF) e com adição CGO (C-CGO). 41
Tabela 8 - Resultados de índice de vazios (%) de cada corpo de prova..... 99
Tabela 9 - Resultados de massa específica real (g/cm³) de cada corpo de prova. . 100
Tabela 10 - Resultados de absorção de água (%) de cada corpo de prova..... 101
Tabela 11 - Resultados de VPU (m/s) de cada corpo de prova. 102
Tabela 12 - Resultados de perda de massa (%) de cada corpo de prova..... 103
Tabela 13 - Resultados de módulo de elasticidade dinâmico (GPa) de cada corpo de prova. 104
Tabela 14 - Resultados de módulo de elasticidade estático (GPa) de cada corpo de prova. 105
Tabela 15 - Resultados de resistência à compressão (MPa) de cada corpo de prova. 106
Tabela 16 - Resultados de resistência à tração (MPa) de cada corpo de prova. 106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
ARI	Alta Resistência Inicial
C	Carbono
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
C_3S	Silicato tricálcico
$Ca(OH)_2$	Portlandita
CAD	Concreto de alto desempenho
CAR	Concreto de alta resistência
CAR	Concreto de Alta Resistência
CBMMG	Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais
C-CGO	Concreto com óxido de grafeno rico em carbonila
CESAMA	Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora
CGO	Óxido de grafeno rico em grupos carbonila
cm	Centímetro
CO_2	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
C-REF	Concreto de referência sem adição de CGO
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difração de raios-X
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos
g	Grama
GEEs	Gases de efeito estufa
GO	Óxido de grafeno
GPa	Gigapascal
H	Hidrogênio
J	Joules
K	Kelvin
kg	Quilograma

L	Litro
m	Metro
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MG	Minas Gerais
mg	Miligrama
min	Minuto
mm	Mililitro
Mpa	Megapascal
N	Newton
Nano	Grupo de Nanociências e Nanotecnologia
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial de hidrogênio
PIB	Produto Interno Bruto
SCMs	Materiais cimentícios suplementares
SiO_2	Dióxido de silício
TA	Temperatura Ambiente
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFOPUSP	Universidade Federal de Ouro PretoSão Paulo
VPU	Velocidade de propagação de onda ultrassônica
W	Watts
µs	Microssegundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA 13

1.2 OBJETIVO GERAL 16

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

2.1 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO 17

2.2 ÓXIDO DE GRAFENO (GO) 18

2.3 PROPRIEDADES DA MATRIZ COM OXIDO DE GRAFENO 21

2.4 COMPORTAMENTO DO CONCRETO EXPOSTO A TEMPERATURAS ELEVADAS 24

2.5 COMPORTAMENTO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE OXIDO DE GRAFENO EXPOSTO A TEMPERATURAS ELEVADAS 28

3 MATERIAIS E MÉTODOS 31

3.1 VISÃO GERAL 31

3.2 MATERIAIS 32

3.2.1 ÁGUA 32

3.2.2 CIMENTO 32

3.2.3 AGREGADO GRAÚDO 34

3.2.4 AGREGADO MIÚDO 35

3.2.5 ADIÇÃO MINERAL – SÍLICA ATIVA 37

3.2.6 ADITIVOS 38

3.2.7 ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM GRUPOS CARBONILA (CGO) 39

3.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS 40

3.4 PREPARO, CURA E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA 41

3.5 EXPOSIÇÃO TÉRMICA 44

3.6 ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E MASSA ESPECÍFICA REAL 45

3.7 PERDA DE MASSA 46
3.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 46
3.9 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL 48
3.10 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO (VPU) 49
3.11 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO 51
3.12 ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) 52
3.13 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) 54
3.14 ENSAIO CONDUTIVIDADE TÉRMICA 54
3.15 ANÁLISE ESTATÍSTICA 56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 57
4.1 ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E MASSA ESPECÍFICA REAL 57
4.2 PERDA DE MASSA 61
4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL 63
4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL 65
4.5 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO (VPU) 67
4.6 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO 69
4.7 ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) 71
4.8 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) 78
4.9 ENSAIO CONDUTIVIDADE TÉRMICA 79
4.10 ÁNALISE VISUAL E DE MACROPOROS 81
5 CONCLUSÃO 83
REFERÊNCIAS 86
APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE CADA CORPO DE PROVA 99
APÊNDICE B – ANÁLISES ESTATISTÍCAS 107

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo sendo formado principalmente por cimento, água e agregados, podendo conter também aditivos químicos e adições. A produção do cimento é responsável pela emissão de aproximadamente 7% do dióxido de carbono (CO_2) antrópico (Visedo, Pecchio e Battagin, 2019), como o cimento é o insumo principal para produção origem ao concreto, este material é tido como um dos materiais de construção que mais contribui para emissões de CO_2 na atmosfera.

À medida que as tecnologias dos materiais e das técnicas de construção civil avançam, novas características do concreto são requisitadas nos projetos, visando a execução de estruturas mais esbeltas e duráveis. Diversas pesquisas têm focado no concreto de alto desempenho (CAD) para atender às demandas do setor da construção civil por materiais com maior capacidade de carga, baixa permeabilidade e maior durabilidade (Hrabová, Teplý e Hájek, 2019), (Chahar e Pal, 2023). Esse tipo de concreto se caracteriza principalmente por sua elevada resistência à compressão e durabilidade (Oliveira *et al.*, 2018), sendo aplicado em construções de pontes (Akhnoukh, 2020), dormentes ferroviários (Ba e Pyo, 2020) e estruturas hidráulicas (Yu *et al.*, 2024), entre outras estruturas de alto rigor técnico. Este contexto, aliado à necessidade de reduzir o consumo de cimento e as emissões de CO_2, justifica a busca por novas adições ao concreto, que possam melhorar sua eficiência, reduzir o consumo de cimento e promover uma construção mais sustentável.

Entre as adições e aditivos que estão sendo empregados para esse fim, podemos citar a substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares (SCMs) baseados em resíduos, como a cerâmica vermelha (Li *et al.*, 2024), cinzas de casca de arroz (Shirgire *et al.*, 2023), pó de vidro (Muhedin e Ibrahim, 2023) e sílica ativa. O uso desses SCMs não apenas reduz significativamente o carbono incorporado no concreto, mas também contribui para uma gestão sustentável de recursos, uma vez que esses produtos derivam de resíduos industriais (Scrivener, John e Gartner, 2018) (Mohammadi e Ramezanianpour, 2023). A substituição total do cimento Portland também é factível, como visto em matrizes geopoliméricas, mas os geopolímeros ainda são ligantes emergentes e sem uma normatização clara (Carvalho

et al., 2023). Outra tecnologia crescente na construção civil é a inserção de nanomateriais em compósitos cimentícios, os quais potencializam suas propriedades mecânicas e durabilidade (Zheng *et al.*, 2017) (Shamsaei *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o grafeno e seus derivados são nanomateriais que têm se destacado devido às suas propriedades físico-químicas superiores, como elevada área superficial específica, alta condutividade térmica e satisfatória estabilidade química, tornando-os adequados para aplicações na construção civil (Lee *et al.*, 2019). Como exemplo, pode-se citar o óxido de grafeno (GO), um produto da esfoliação química do grafite, com estrutura hexagonal composta por átomos de carbono de camada única (Fonseka *et al.*, 2024). O nanomaterial tem sido alvo de diversas pesquisas recentes (Zeng *et al.*, 2023), (Mao *et al.*, 2024), (Anwar, Liu e Zhang, 2024) e se apresenta como uma alternativa promissora para ser incorporada em matrizes cimentícias de alto desempenho (Hou *et al.*, 2017), (Yu, Bai e Guan, 2023).

O GO é um material produzido pela oxidação do grafeno, contendo grupos funcionais hidroxila e epóxi em seus planos basais, além de grupos carbonila e carboxila em suas bordas (Stankovich *et al.*, 2006). O método de síntese tem um impacto significativo nas propriedades do material, afetando a quantidade e o tipo de grupos funcionais presentes no GO formado (Adéla Jiříčková, Sofer e Sedmidubský, 2022). Nesse contexto, o grupo de Nanociências e Nanotecnologia (Nano) do Departamento de Física de Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pesquisou o grafeno em suas diversas formas e desenvolveu uma modificação do método de Hummers para produzir o GO rico em grupos de carbonila (CGO). O GO possui características hidrofílicas que permitem sua dispersão mais eficiente em água em comparação com outros nanomateriais. Isso facilita sua incorporação na mistura do concreto, resultando em maior resistência mecânica e menor permeabilidade (Kudžma *et al.*, 2019) (Alatawna *et al.*, 2020). Estudos indicam que há melhorias significativas nas propriedades de concretos de ultra alto desempenho (CUAD) com a adição de GO. Chu *et al.,* (2020) observaram um aumento na resistência de compressão de 16,83% em relação ao concreto de referência incorporando 0,05% de GO sobre a massa de cimento e Yeke e Yu (2021) obtiveram resultados semelhantes, encontrando um aumento de 15,8% na resistência a compressão com adições de 0,04%.

As estruturas de concreto estão constantemente expostas a diversas solicitações, entre as quais incluem-se os casos de incêndios. O concreto quando submetidos a elevadas temperaturas tem suas propriedades mecânicas e microestruturais comprometidas (Nasser *et al.*, 2022). Portanto, a resistência ao fogo destaca-se como um aspecto crucial para segurança dos usuários e preservação das estruturas de concreto. Diante disso, nos últimos anos tem havido um interesse crescente pela adição de nanomateriais em compósitos à base de cimento para melhorar a capacidade de resistência ao fogo. Yao e Lu (2021) estudaram os efeitos dos nanotubos de carbono na resistência à compressão e microestrutura do concreto em altas temperaturas obtendo resultados satisfatórios em relação a resistência à compressão e porosidade. Ali, Fared e Osman (2024), por sua vez, investigaram o efeito de temperaturas elevadas em concreto contendo materiais de nanosílica, nanoalumínio e nanovidro como substituto parcial do cimento, observando uma melhoria no desempenho do novo concreto antes e após a exposição a elevadas temperaturas.

No caso do GO, Huang *et al.,* (2024) estudaram as propriedades de materiais à base de cimento reforçados com GO em altas temperaturas assim como os pesquisadores Ren *et al.,* (2024) que analisaram as propriedades mecânicas de impacto e estrutura de poros do concreto contendo GO expostos a altas temperaturas, obtendo resultados promissores na melhoria do desempenho residual dos compósitos cimentícios com a adição deste material.

Apesar de existirem pesquisas que avaliam os efeitos mecânicos da incorporação de GO em concretos (Akarsh *et al.*, 2022) (Walunjkar e Bajad, 2023) (Ja, Mathew e George, 2023), até o momento não foram detectados estudos que investiguem o impacto dessa adição em CAD expostos a altas temperaturas, com o objetivo de analisar não apenas a influência da adição nas propriedades mecânicas residuais, mas também nas propriedades térmicas do material. Além disso, não foi encontrado na literatura nenhum estudo até o momento sobre a incorporação de CGO em CAD, juntamente com análises das propriedades residuais após exposição a altas temperaturas. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo analisar o efeito da incorporação do CGO nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de CAD, em temperatura ambiente (TA) e após a exposição a 300°C, 600°C e 900°C.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é investigar o efeito da incorporação de um novo tipo de óxido de grafeno rico em grupos carbonila (CGO), nas propriedades termomecânicas e microestruturais do CAD exposto a elevadas temperaturas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a influência do CGO nas propriedades termomecânicas e microestruturais do CAD em TA, 300°C, 600°C, 900°C para compreender o comportamento desse material em condições de serviço de alta temperatura.
- Investigar a influência do CGO na condutividade térmica do CAD em temperatura ambiente e sob altas temperaturas a fim de contribuir para o desenvolvimento de materiais com melhor desempenho térmico.
- Contribuir para o desenvolvimento de materiais de construção à base de cimento mais duráveis e sustentáveis que podem ser aplicados a estruturas susceptíveis a elevadas temperaturas;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O CAD é um concreto constituído por agregados graúdos e miúdos, cimento Portland com um consumo aproximado de 450 a 550 kg/m³, materiais cimentícios suplementares (SCMs) e aditivos químicos (Christ, Tutikian e Pacheco, 2015) (Supritha *et al.*, 2023) (Chahar e Pal, 2023). Em geral, esses concretos são constituídos de agregados com dimensões reduzidas e apresentam uma baixa relação água/cimento (Schiavon *et al.*, 2021). A presença de agregados e fílers nesse compósito confere ao material uma maior coesão, tornando a matriz mais densa e afetando a trabalhabilidade, que é normalmente corrigida com a adição de aditivos químicos, também importantes para a redução do fator a/c (Oliveira *et al.*, 2018) (Awadeen *et al.*, 2024).

Os cimentos comumente utilizados na produção do CAD são aqueles mais puros e com partículas mais finas, tais como CP I e CP V ARI. Estes cimentos contêm maior quantidade de silicatos de cálcio (C_2S e C_3S) e menor quantidade de aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) em sua composição (Tutikian, Isaia e Helene, 2011). Os silicatos em maior quantidade nestes cimentos reagem com a água formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que confere a maior parte da resistência ao material, e portlandita (CH ou $Ca(OH)_2$), que confere seu caráter básico (Neville, 2015) (Remus *et al.*, 2024).

Além do cimento Portland, SCMs são geralmente usados na composição do CAD para melhorar suas propriedades, como as cinzas volantes, o metacaulim e a sílica ativa (Patil, Rao e Ghorpade, 2023). A sílica ativa é originada a partir do processo de fundição de ligas de ferro silício e silício industrial. É um material composto de partículas finas com grande área superficial específica e alta atividade pozolânica, composto por aproximadamente 90% de SiO_2 amorfa (Villar-Cociña *et al.*, 2020) (Luo *et al.*, 2022).

Fisicamente, a sílica ativa atua como material de enchimento entre a pasta e o agregado devido às suas pequenas dimensões (efeito filler). Quimicamente, em função do efeito pozolânico, a sílica reage com o $Ca(OH)_2$, produto do processo de hidratação do cimento, produzindo produtos adicionais de C-S-H (Sharaky *et al.*, 2019) (Luo *et al.*, 2022). Essa produção extra de C-S-H forma uma microestrutura mais densa com

porosidade reduzida, o que dificulta a entrada de agentes agressivos, além de promover o aumento da resistência (Chen *et al.*, 2023) (Kumar e Harikrishna, 2024). Eventualmente, outros fílers inertes, como pó de quartzo ou pó de calcário, também podem ser utilizados, visando preencher os poros e estimular a nucleação (Mehta e Monteiro, 2014).

No Brasil, não existe um consenso quanto à definição de CAD, sendo comum confundi-lo com o concreto de alta resistência (CAR) (Tutikian, Isaia e Helene, 2011). As normas brasileiras utilizam somente o termo CAR, dividindo os concretos em duas classes: a classe I se refere a concretos convencionais, de resistência de 20 até 50 MPa, e a classe II diz respeito a concretos de 55 até 100 MPa, tidos como CAR. No entanto, existem outras variações e classificações para esse tipo de concreto, como a apresentada por Nambiar e Haridharan (2021), que definem o CAR como aquele que apresenta resistência entre 50 e 100 MPa, concretos de altíssima resistência entre 100 e 200 MPa, e concretos de ultra-alta resistência acima de 200 MPa.

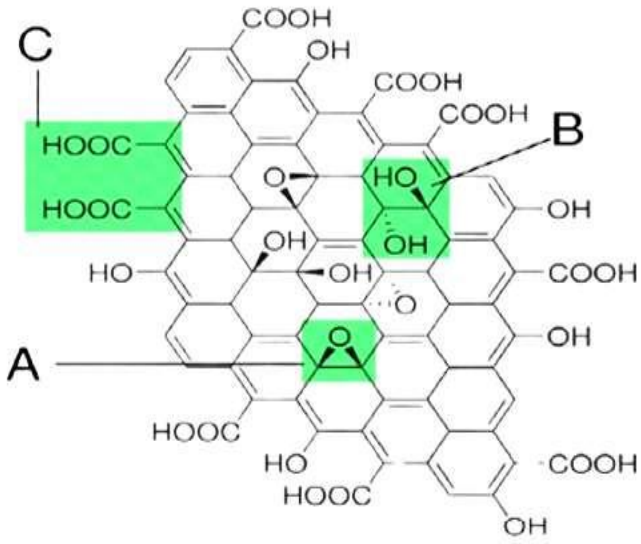
Dada a sua composição, o CAD possui elevada resistência à compressão e módulo de elasticidade, que são cerca de 50% e 30% superiores ao concreto convencional, respectivamente (Oliveira *et al.*, 2018). O CAD possui também desempenho satisfatório no que tange a trabalhabilidade, integridade e sobretudo, durabilidade (Paul e John, 2023), requisitos que diferenciam esse material do CAR. Dessa forma, o CAD é comumente empregado em construções desafiadoras, como o edifício mais alto do mundo, o Burj Khalifa (Aldred, 2010) (Ghorbanzadeh, 2017), e o viaduto mais alto do mundo, o Viaduto de Millau na França (Schlosser *et al.*, 2013) (Arcos, 2018).

2.2 ÓXIDO DE GRAFENO (GO)

Devido à crescente necessidade por materiais com propriedades mecânicas aprimoradas e maior durabilidade, a adição de nanomateriais em compósitos cimentícios tem sido uma inovação amplamente pesquisada (Onaizi *et al.*, 2021) (Liu, Zhong e Mohammadian, 2023) (Hwangbo *et al.*, 2023). Entre os nanomateriais disponíveis, o GO é um derivado do grafeno que foi quimicamente funcionalizado (Korayem *et al.*, 2020). O GO é um material de dimensões nanométricas que apresenta uma estrutura plana de átomos de carbono interligados em formato hexagonal (Akarsh

et al., 2022). Ele é funcionalizado com grupos hidroxílico e epoxílico em seus planos basais e grupos carbonila e carboxílico nas bordas de sua estrutura molecular, conforme ilustrado na Figura 1 (Horta *et al.*, 2021).

Figura 1- Estrutura molecular do óxido de grafeno (A: Grupo epoxílico, B: Grupo hidroxílico, C: Grupo carboxílico).



Fonte: Horta *et al.,* (2021).

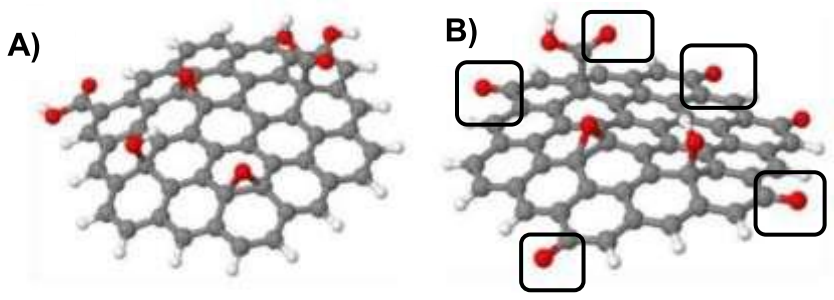
Devido à sua forma e composição química, este nanomaterial possui elevada área superficial específica, elevada resistência à tração, boa dispersão em água, alta condutividade térmica e elétrica, e um elevado módulo de elasticidade (Rocha *et al.*, 2021). O GO apresenta caráter hidrofílico, sendo altamente solúvel em água e solventes orgânicos devido à sua expressiva área superficial específica (Zheng *et al.*, 2017) (Li *et al.*, 2019) e à presença dos grupos funcionais de oxigênio em sua estrutura (Figura 1), que provoca a redução das interações de Van der Waals, intensificação a repulsão eletrostática entre as folhas de GO (Liu *et al.*, 2019) (Akarsh *et al.*, 2022).

O GO é comumente obtido pelo método Hummers, que envolve o processo de oxidação do grafite por microesfoliação química (Adéla Jiříčková, Sofer e Sedmidubský, 2022). Devido às diferenças morfológicas do grafite, que podem apresentar origens, formatos e tamanhos distintos, a estrutura atômica do GO depende diretamente do grafite e da metodologia de oxidação utilizados em sua produção (Deemer *et al.*, 2017) (Hou *et al.*, 2020) (Kim *et al.*, 2021).

Os estudos sobre GO não detalham com precisão a predominância de um determinado grupo oxigenado em relação a outro. Portanto, os GOs estudados podem ou não apresentar diferentes funções químicas e propriedades (Zeng *et al.*, 2023).

O grupo de NANO (Nano) da UFJF explorou as propriedades elétricas, ópticas e espectroscópicas de diferentes amostras de GO, concentrando-se em abordagens oxidativas inovadoras para ajustar suas características físico-químicas. Nesse contexto, Lima *et al.,* (2020) desenvolveram uma modificação do método de Hummers, produzindo óxido de grafeno rico em grupos de carbonila, o CGO. Segundo Lima *et al.,* (2020), o CGO é produzido inicialmente pelo processo oxidação química do grafite em flocos, conforme o método de Hummers. Isso envolve a adição de ácido sulfúrico concentrado e nitrato de sódio sob agitação em água fria, seguida pela lenta adição de permanganato de potássio. Após essa etapa inicial, é adicionado gradualmente ácido sulfúrico menos concentrado à mistura, agitada em uma temperatura adequada. Para finalizar o procedimento, é adicionado peróxido de hidrogênio à mistura, que passará por diversas lavagens a fim de remover íons metálicos e tornar o pH neutro, possibilitando assim a predominância do grupo oxigenado carbonila (C=O), conforme apresentado na Figura 2. O retângulo preto representa grupos funcionais carbonila, e as esferas cinzas, vermelhas e brancas representam os carbonos, oxigênios e hidrogênios, respectivamente.

Figura 2 - Representação gráfica da estrutura do óxido de grafeno (GO) (A) e do óxido de grafeno rico em carbonila (CGO) (B).

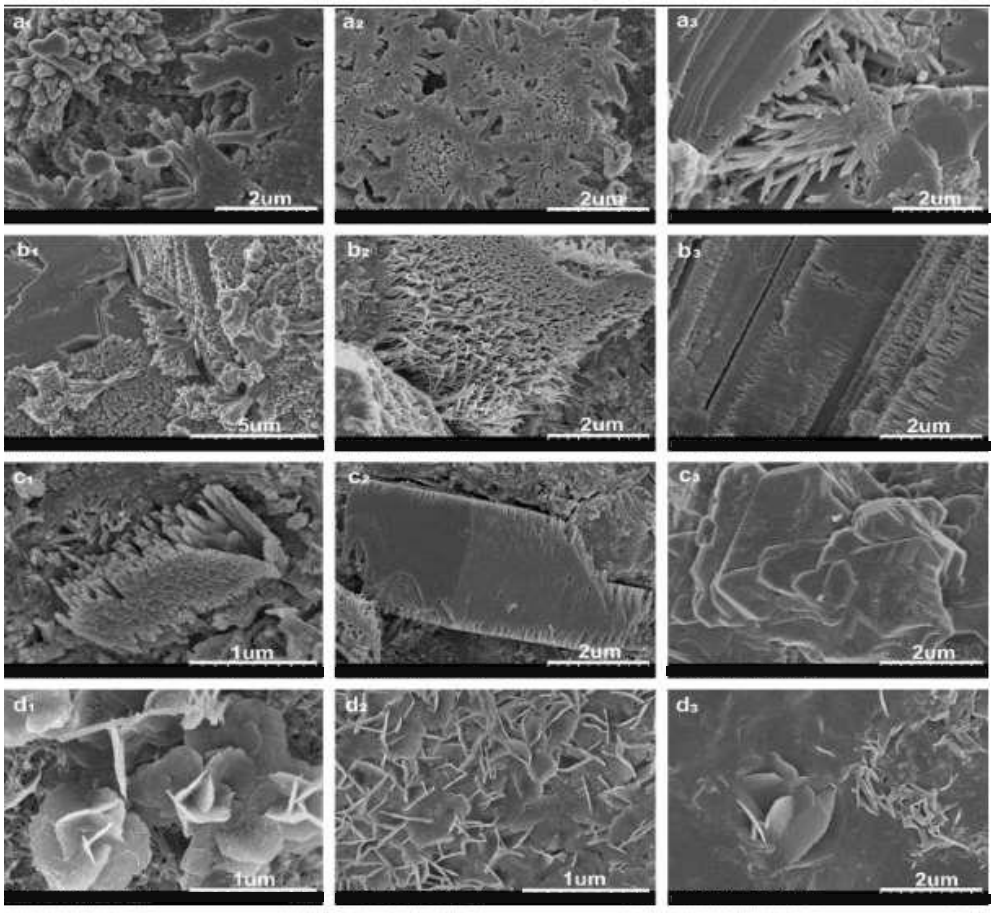


Fonte: Lima *et al.,* (2020).

2.3 PROPRIEDADES DA MATRIZ COM OXIDO DE GRAFENO

Quando aplicado ao concreto, segundo Djenaoucine *et al.,* (2024) o GO é capaz de melhorar o grau de hidratação do cimento em idades avançadas a partir de 28 dias, devido ao fato de seus grupos funcionais reagirem preferencialmente com o C_3S e C_3A, formando núcleos de crescimento para a formação de C-S-H. O GO atua na hidratação do cimento formando cristais de hidratação mais densos, regulares e semelhantes a flores, distribuídos uniformemente na pasta (Lv *et al.*, 2013). Esse processo inicia-se com a formação de cristais em formas de barras durante a reação de hidratação do cimento, regulando a formação das estruturas cristalinas de hidratação, culminando na formação de cristais em formato de flores, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Processo de crescimento e mecanismo de formação de cristais de hidratação do cimento em diferentes dosagens de GO (a) Cristais semelhantes a flores: (a1) 0,01% (a2) 0,02%; e (a3) 0,06%. (b) Cristais densos em forma de bastão: (b1) 0,03%;(b2) 0,03%; e (b3) 0,03%. (c) Cristais poliédricos: (c1) 0,04%; (c2) 0,04%; e (c3) 0,04%. (d) Cristais lamelares: (d1) 0,05%; (d2) 0,05%; e (d3) 0,06%.



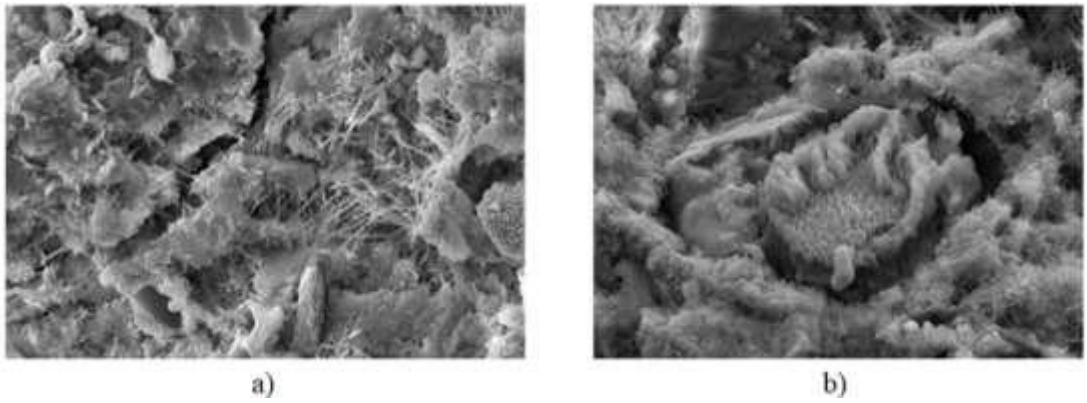
Fonte: Lv *et al.,* (2014).

Os cristais formados preenchem os vazios e fissuras no interior dos compósitos de cimento reduzindo a porosidade, melhorando a microestrutura da matriz e impedindo o acesso de produtos agressivos ao interior do compósito (Indukuri, Nerella e Madduru, 2020) (Liu *et al.*, 2021). Tal fato resulta na densificação da matriz, na diminuição da microfissuração e, consequentemente, no aumento da resistência do compósito (Lv *et al.*, 2014) (Han *et al.*, 2022) (Lu *et al.*, 2023).

Prasuna e Revella (2022) e Reddy e Prasad (2023) conduziram estudos sobre o efeito da adição de GO nas propriedades mecânicas e na durabilidade do CAD. Conforme os autores, quando incorporado a este tipo de concreto, o nanomaterial melhora a estrutura de poros e aumenta a resistência à compressão. Han *et al...* (2022) observaram que a adição de GO resulta em um pequeno acréscimo no módulo de elasticidade, cerca de 6%, o que também foi notado por e Reddy e Prasad (2023) e Ren *et al.,* (2024). Em relação a trabalhabilidade, Davi e Khan (2020), Fonseka *et al.,* (2023) e Reddy e Prasad (2023) constataram que a adição de GO reduz a trabalhabilidade do compósito de cimento, principalmente devido aos seus grupos funcionais hidrofílicos e à sua elevada área superficial.

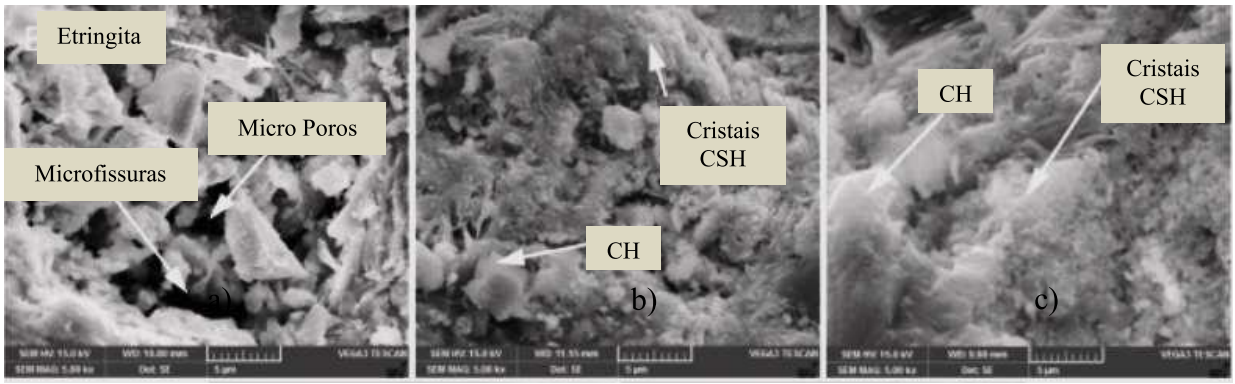
Segundo estudos realizados por Han *et al.,* (2022) e Reddy e Prasad (2023), a quantidade de GO adicionada ao concreto influencia no processo de hidratação do cimento, fornecendo mais locais de nucleação para formação de cristais. Como exposto na Figura 4 e Figura 5, os cristais semelhantes a flores se tornam mais densos à medida que o teor de GO aumenta de 0,1% para 0,2%.

Figura 4 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura de 0,1% (a) e 0,2% (b) de GO em relação à massa de cimento.



Fonte: Han *et al.,* (2022).

Figura 5 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura de 0,0% (a), 0,05% (b) e 0,10% (c) de GO em relação à massa de cimento.



Fonte: Adaptado de Reddy e Prasad (2023).

Diferentes estudos também foram realizados a fim de verificar a influência da adição e nanomateriais à base de grafeno as propriedades térmicas de concretos. Liu *et al.,* (2024) realizaram uma pesquisa sobre os efeitos nas propriedades térmicas de compósitos de cimento reforçados com nanoplaquetas de grafeno. Segundo os autores, a adição de 1% em peso deste nanomaterial é capaz de diminuir a condutividade térmica do compósito em 19,79% conforme a temperatura aumenta.

Já, Mathew e George (2023) analisaram os efeitos da adição de óxido de grafeno reduzido (rGO) em compostos cimentícios e verificaram que o aumento na concentração desse nanomaterial resultou em um aumento na condutividade térmica. Em contrapartida Cheng *et al.,* (2025) observaram uma redução na temperatura interna

proporcionando um conforto térmico aos usuários em ambientes com materiais cimentícios com adição de GO.

2.4 COMPORTAMENTO DO CONCRETO EXPOSTO A TEMPERATURAS ELEVADAS

O concreto pode ser exposto a altas temperaturas ao longo de sua vida útil, seja devido a condições de serviço, em ambientes como usinas nucleares, altos-fornos, chaminés de refinarias, indústrias metalúrgicas, siderúrgicas e petroquímicas onde o material é exposto a elevadas temperaturas por longo prazo; ou devido a situações excepcionais, como incêndios (Meng *et al.*, 2021), (Liu *et al.*, 2024).

Segundo dados disponibilizados pelo Corpo de Bombeiro Militar de Minas Gerais (CBMMG), no ano de 2023 foram registradas mais de 3.700 ocorrências de incêndios em edificações residenciais, comerciais e industriais no estado de Minas Gerais, representando um aumento de 7% em comparação ao ano anterior (CBMMG, 2025). Esse aumento evidencia a necessidade de estruturas mais resistentes a elevadas temperaturas em termos de segurança quando submetidos a situações de incêndios. Incêndios de grande escala, como o da Torre Grenfell em Londres, que resultou na morte de 72 pessoas (G1, 2024), ou o incêndio no Museu Nacional do Rio de Janeiro, que destruiu o acervo com mais de 20 milhões de itens do patrimônio histórico contextos (G1, 2018), ilustram a gravidade dos incêndios em diferentes contextos. Esses casos reforçam a importância da adoção estruturas de concretos com propriedades termomecânicas melhoradas, a fim de garantir a segurança de vidas humanas e aspectos econômicos, assim como a preservação histórica e cultural.

Quando submetido a elevadas temperaturas, as propriedades químicas do concreto são modificadas, o que resulta na redução das suas propriedades mecânicas e alterações significativas na sua microestrutura (Wang, Zhou e Wu, 2023). Dito isto, é imperativo o estudo e desenvolvimento de concretos mais resistentes a altas temperaturas, de forma a suportar os efeitos deletérios da ação de elevadas temperaturas, evitar a ocorrência de danos graves e até mesmo o colapso das estruturas além de possibilitar que sejam realizadas ações emergências que preservem vidas.

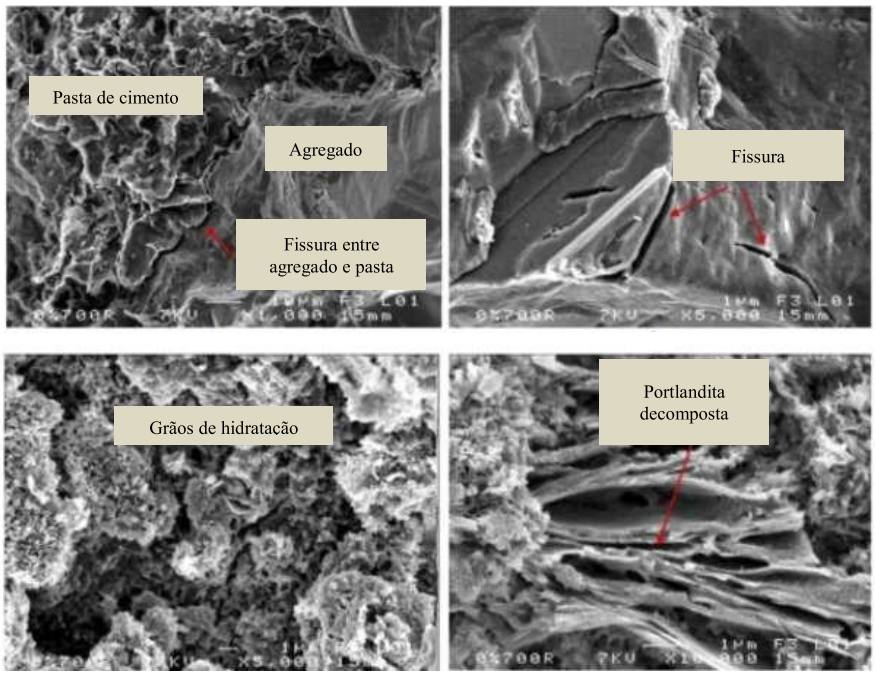
O concreto possui condutividade térmica relativamente baixa, com valores variando entre 1,4 a 2,0 W/(m·K) (Dai *et al.*, 2022) e resiste por mais tempo em situações de incêndio em comparação a outros materiais de construção, como o aço (Battagin e Silveira, 2018), que possui condutividade térmica de 71 W/(m·K) (Nobre, 2025).

Segundo Smith *et al.,* (2013) a condutividade térmica é uma propriedade que determina a capacidade de um material de conduzir calor em condições em que o fluxo de calor não varia ao longo do tempo. Portanto, a condutividade térmica representa a eficiência com que um material transfere calor através de si mesmo. Desta forma, nas edificações, a condutividade térmica dos materiais das estruturas interfere diretamente na transferência de calor entre o ambiente interno e externo ao longo do tempo, sendo um parâmetro crítico que rege a resistência a elevadas temperaturas de estruturas (Zhang *et al.*, 2023) (Martins, 2024).

Em elevadas temperaturas, os poros do concreto se expandem como resultado da decomposição do $Ca(OH)_2$ e as fissuras na interface entre a pasta e os agregados graúdos aumentam progressivamente, devido à dilatação térmica diferencial entre os diferentes componentes do concreto, diminuindo significativamente a resistência do material (Feng *et al.*, 2023) (Guo *et al.*, 2024).

Assim, as modificações provenientes da exposição a altas temperaturas se manifestam principalmente na pasta de cimento, com perda das propriedades ligantes, e também na zona de transição interfacial e no agregado, conforme ilustrado na Figura 6 (Fernandes *et al.*, 2017) (Chen *et al.,* 2022). A Tabela 1 apresenta os aspectos macroscópicos e as mudanças dos constituintes na pasta de cimento quando o concreto é submetido a altas temperaturas.

Figura 6 - MEV de concreto submetido a temperatura de 700 °C.



Fonte: Adaptado de Meftah e Arabi (2024).

Tabela 1 - Transformações na microestrutura do concreto com o aumento da temperatura.

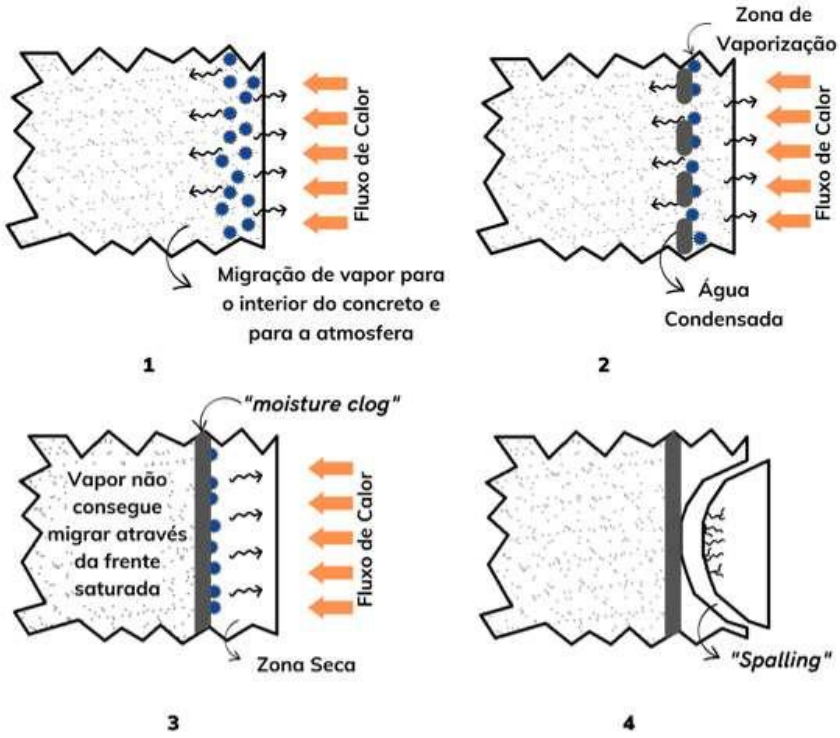
Temperatura (ºC)	Coloração	Efeitos Físicos	Efeitos Químicos
80 ºC	Cinza (Normal)	-	• Transformação dos sulfatos • Desidratação das acículas de etringita cristalizada
100 ºC	Cinza	-	• Perda de água da fase líquida livre e/ou adsorvida. • Decomposição dos silicatos hidratados. • Transformação etringita amorfa
300 ºC	Rosado	• Fissuração Superficial • *Spalling*	• Decomposição dos aluminatos hidratados
480 ºC	Rosado	• Fissuração Superficial	• Decomposição da Portlandita
550 ºC	Rosado a avermelhado	• Fissuração profunda	• Formação de cal livre

Temperatura (ºC)	Coloração	Efeitos Físicos	Efeitos Químicos
570 ºC	Avermelhado	• Fissuração agregado quartzo	• Transformação do quartzo
600 º C	Avermelhado	-	• Decomposição completa das fases C-S-H
800 ºC	Laranja acinzentado		• Decomposição carbonato de cálcio
1.100 ºC	Amarelado	• Esfarelamento e desagregação • Fissuração generalizada	• Formação de wollastonita a partir do C-S-H original

Fonte: Adaptado de Bettagin e Silveira (2018).

Além das alterações supracitadas, a exposição do concreto a altas temperaturas pode resultar em uma perda de área da seção transversal do elemento, devido ao efeito de ruptura ou fragmentação explosiva denominado *spalling* (Carvalho *et al.*, 2024). Esse fenômeno é definido como o desplacamento de camadas da superfície do concreto em situações de altas temperaturas conforme apresentado na Figura 7 (Silva, 2016) (Gil *et al.*, 2018). A ruptura explosiva geralmente ocorre em temperaturas de aquecimento entre 300 e 350 °C e durante os primeiros 7 a 30 minutos de um incêndio. Em temperaturas mais elevadas, acima de 1.000 °C, há maior probabilidade de ocorrer fragmentação pós-resfriamento (So, 2016).

Figura 7 – Mecanismo termo-hídrico efeito s*palling* em concretos expostos a altas temperaturas



Fonte: Martins (2024).

O efeito *spalling* ocorre devido à baixa condutividade térmica do concreto, que gera um diferencial de temperatura do interior do compósito e da superfície aquecida, provocando tensões internas (Carvalho *et al.*, 2024). A pressão nos poros resultante da mudança de estado líquido para gasoso da água livre no interior do elemento também contribui para o fenômeno (Mohammad Khaled al-Bashiti, 2023) (Battagin e Silveira, 2018). Por causa da pressão do vapor de água, quanto menos poroso e permeável o concreto, geralmente mais susceptível ao *spalling* ele é (Mohammad Khaled al-Bashiti, 2023). Por isso, há uma grande preocupação com os CAD em situações de incêndio.

2.5 COMPORTAMENTO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO EXPOSTO A TEMPERATURAS ELEVADAS

Quando compósitos cimentícios são submetidos a altas temperaturas, a inserção de nanomateriais à base de carbono, como o GO, torna-se uma excelente alternativa para melhorar suas propriedades mecânicas (Nalon *et al.*, 2021). Han *et al.,* (2022) puderam observar que o GO melhorou as propriedades mecânicas do compósito após a exposição térmica, aumentando a resistência residual à compressão entre 4,23%

(1.000ºC) até 13,91% (250ºC) e reduzindo a fissuração, em relação ao concreto de referência.

Huang *et al.,* (2024), por sua vez, observaram que além da resistência à compressão, o módulo de elasticidade residual de concretos contendo GO também aumenta em comparação com o concreto de referência. O mesmo foi observado por Reddy e Prasad (2023) e Ren *et al.,* (2024). Os autores vinculam o aumento no módulo de elasticidade à otimização da estrutura dos poros do concreto pela adição de GO sob alta temperatura, em que o GO atua reduzindo o número de poros de grande diâmetro e aumentando ligeiramente a proporção de poros de pequeno diâmetro.

De acordo com Li *et al.,* (2022) e Yan *et al.,* (2022), a melhoria das propriedades mecânicas residuais de concretos com GO se deve à melhoria da hidratação da pasta de cimento promovida pelo nanomaterial. Essas reações aprimoradas resultam em cristais de hidratação mais densos que preenchem os poros, colmatando as microfissuras, evitando deformações por retração térmica e reduzindo a fissuração (Li *et al.*, 2022), (Yan *et al.*, 2022). Além disso, o GO age formando microcanais no interior do material, favorecendo a liberação da pressão de vapor quando estes são submetidos a altas temperaturas, evitando o efeito *spalling* (Mohammed *et al.*, 2017) (Chen *et al.*, 2023) (Rao *et al.*, 2024).

Conforme análises de DRX realizadas por Chen *et al.,* (2022) em concretos expostos a altas temperaturas com adição de GO ocorre um refinamento dos cristais de hidratação estabilizados, melhorando assim as propriedades mecânicas da pasta de cimento. Tal fato pode ser explicado pela existência dos grupos funcionais de oxigênio no nanomaterial, que podem se unir por forte atração eletrostática, formando quimicamente produtos de hidratação de cimento (C-S-H) (Yan *et al.*, 2022).

Yang *et al.,* (2024), realizaram um estudo usando simulações de dinâmica molecular controlada para avaliar o efeito da temperatura no desempenho geral dos compósitos cimentícios com adição de GO por meio da análise do comportamento de descolamento interfacial entre o GO e a matriz de cimento. Segundo os autores, as propriedades de adesão da interface do GO com C-S-H diminuem com o aumento da temperatura; e a concentração e distribuição de grupos funcionais do GO têm impacto

na adesão da interface, sendo esta melhorada com o aumento da concentração do grupo funcional (Yang *et al.*, 2024).

As pesquisas existentes sobre concreto com adição de materiais derivados do grafeno apontam que inclusão de GO no concreto pode melhorar suas propriedades mecânicas residuais após exposição a altas temperaturas. No entanto, devido à novidade tecnológica representada pelo óxido de grafeno rico em grupo carbonila (CGO), ainda não foram identificados estudos que investigassem sua aplicação em CADs expostos a altas temperaturas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 VISÃO GERAL

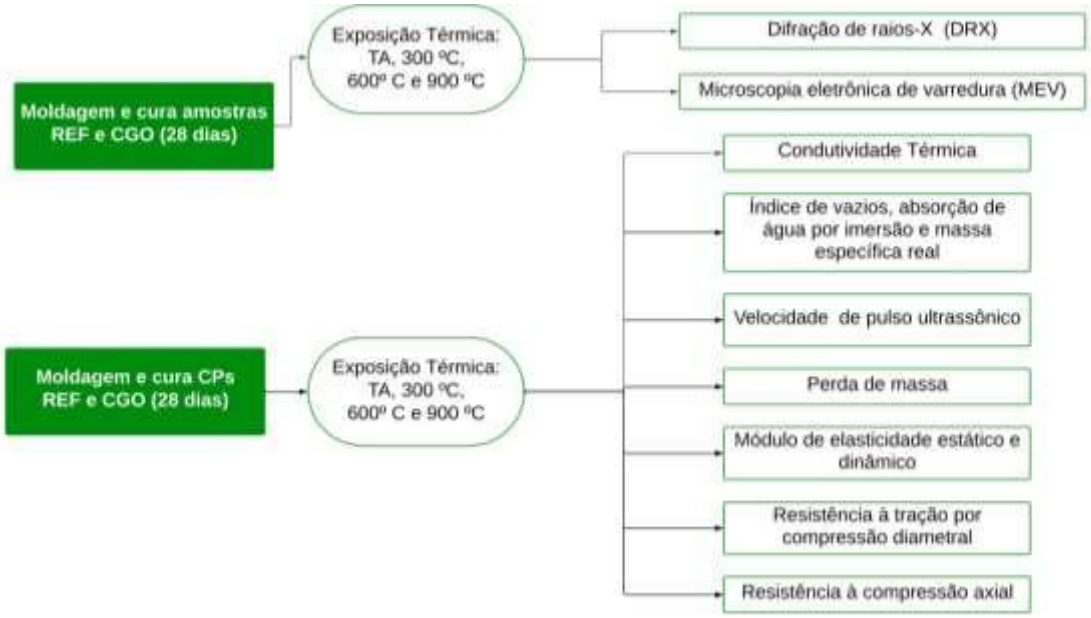
A presente pesquisa engloba as seguintes etapas principais:

1. Caracterização dos materiais utilizados;
2. Produção e moldagem dos corpos de prova de referência e com incorporação de CGO;
3. Ensaios no estado endurecido para caracterização microestrutural;
4. Estudo nas propriedades mecânicas de CAD submetidos à 300ºC, 600ºC e 900ºC;

Foram produzidos dois traços de concreto: concreto de referência sem adição, denominado “C-REF” e concreto com incorporação de 0,02% de óxido de grafeno rico em carbonila, denominado “C-CGO”. Para cada traço, foram produzidos 32 corpos de prova (CPs) cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm altura para os ensaios mecânicos e térmicos e 16 amostras cilíndricas com 3 cm de diâmetro e 0,5 cm de espessura para análise microestrutural. A escolha da moldagem em corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm se baseou no estudo de Azevedo *et al.,* (2020), que comprovou a viabilidade da utilização dos CPs de tamanho reduzido para ensaios de resistência à compressão, de forma a viabilizar a execução desta pesquisa dentro dos recursos e materiais disponíveis. Já a escolha da moldagem de amostras de dimensões com 3 cm de diâmetro e 0,5 cm de espessura foi feita com o intuito de evitar que fossem utilizados fragmentos dos corpos de provas após ensaios mecânicos que pudessem interferir nos resultados a serem obtidos nos ensaios microestruturais.

Na terceira etapa deste trabalho, a fim de avaliar a microestrutura e as propriedades mecânicas dos dois traços de concreto, foram realizados ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU) módulos de elasticidade estático e dinâmico, perda de massa, massa específica, índice de vazios, absorção de água, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e DRX. Por fim, para investigação das propriedades mecânicas residuais, todas as análises foram realizadas após exposição dos corpos de prova às temperaturas de 300ºC, 600ºC e 900ºC, além da temperatura ambiente (TA), conforme esquematizado no fluxograma da Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma do planejamento experimental



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3.2 MATERIAIS

3.2.1 ÁGUA

A água utilizada no preparo do concreto e imersão dos corpos de prova e amostras de concreto é potável e proveniente da rede pública de abastecimento municipal da cidade de Juiz de Fora – MG, com administração feita pela Companhia de Saneamento Municipal (CESAMA).

3.2.2 CIMENTO

O aglomerante utilizado nesta pesquisa foi o cimento CP V-ARI (Alta Resistência Inicial) produzido pela Cimento CSN na fábrica de Barroso em Minas Gerais. O CP V-ARI é um cimento mais puro, contendo entre 90% e 100% de clínquer e sulfatos de cálcio com pequenas adições pozolânicas em sua composição, e apresenta uma moagem mais fina, que proporciona elevadas resistências em um curto intervalo de tempo (ABNT, 2018). Desta forma, optou-se por utilizar este tipo de cimento visando minimizar a influência de fatores externos desconhecidos, possibilitando assim uma avaliação mais precisa da influência da incorporação do CGO na matriz cimentícia do concreto.

As principais características do cimento a ser empregado neste estudo estão exbidas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, de acordo com Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos – FISPQ disponibilizada pela CSN Cimentos. Na Figura 10 apresenta análise granulométrica do cimento utilizado, realizada na UFJF com o auxílio do granulômetro a laser HELOS/BR-OM (Figura 9) que permite uma análise rápida do tamanho de partículas de 0,1 µm a 875 µm.

Tabela 2 - Propriedades Físico-Químicas do cimento CPV – ARI.

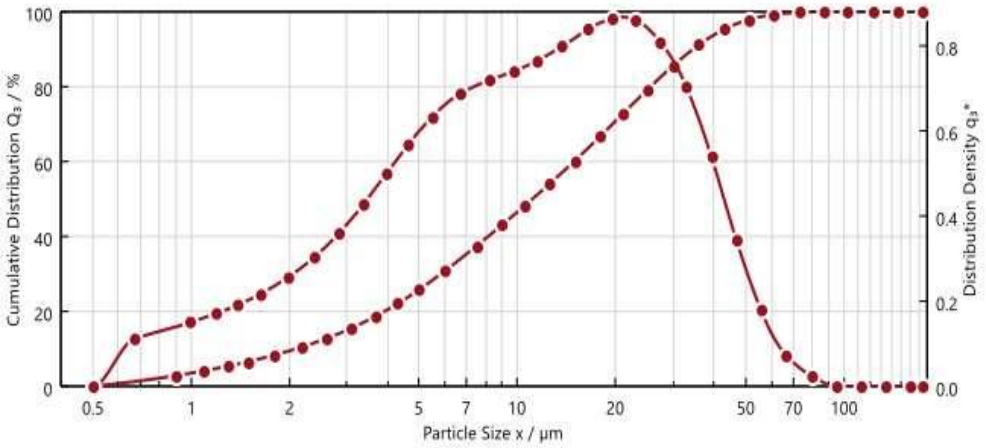
Propriedades Físico-Químicas	
Estado físico	Sólido
Forma	Pó
Cor	Cinza
Odor	Característico
pH	13
Massa específica aparente	1,2 g/cm³
Densidade	2,99 g/cm³
Solubilidade em ácido clorídrico	99%l
Solubilidade em água	1,5 g/l

Fonte: CSN (2024).

Figura 9 - Analisador de tamanho de partículas por difração a laser HELOS/BR.

Fonte: Autora (2025).

Figura 10 - Curva granulométrica do cimento CPV - ARI.



Fonte: UFJF (2025).

3.2.3 AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo utilizado foi a brita 0, originada de rochas basálticas, fornecidas pela Quibrita Mineradora de Campinas em São Paulo (Figura 11). A análise granulométrica e os resultados dos demais ensaios de caracterização física do agregado graúdo estão exibidos nas Tabela 3. A curva granulométrica é exibida na Figura 12. Na figura, pode-se observar que o agregado graúdo em questão se encontra próximo a zona de granulometria entre 4,72 mm e 12,5 mm, correspondente a brita 0 de acordo com NBR 7211 (ABNT, 2022).

Figura 11 – Agregado graúdo - Brita basáltica 0.

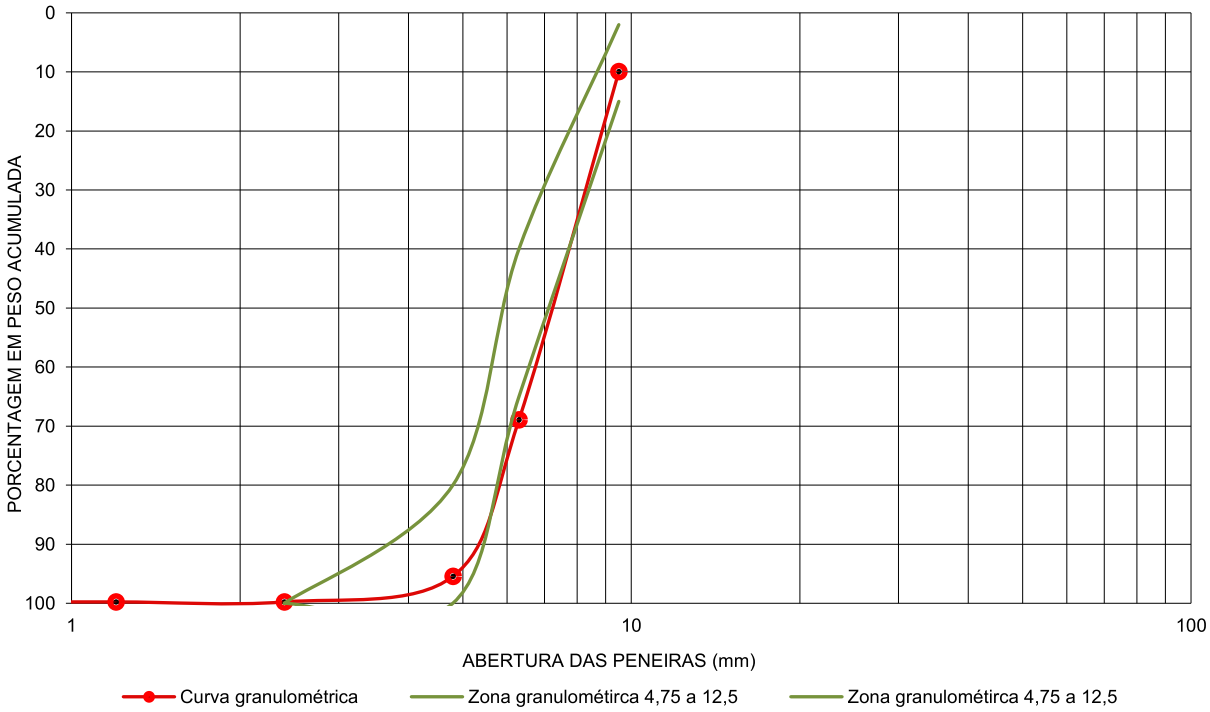
Fonte: Autora (2025).

Tabela 3 - Caracterização física agregado graúdo - Brita 0.

Propriedades Físicas	
Módulo de Finura	6,04
Dimensão Máxima Característica (mm)	9,50
Massa Específica Real (g/cm³)	2,789
Massa Unitária (g/cm³)	1,428
Teor de Material Pulverulento (%)	0,25
Absorção (%)	0,6

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 12 - Curva granulométrica do agregado graúdo - Brita 0.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3.2.4 AGREGADO MIÚDO

Como agregado miúdo, utilizou-se areia de origem natural do Rio Preto no estado de Minas Gerais (Figura 13). Para a determinação dos parâmetros de utilização do agregado miúdo, foi realizado o ensaio de caracterização granulométrica em acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022). Os resultados dos ensaios e a análise granulométrica estão expostos na Tabela 4 e a curva granulométrica na Figura 14. É possível verificar que as propriedades físicas se encontram em conformidade com o padrão esperado

para agregados convencionais e que a curva está dentro da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2022), com maioria das faixas granulométricas dentro da zona ótima.

Figura 13 - Agregado miúdo - Areia Natural.

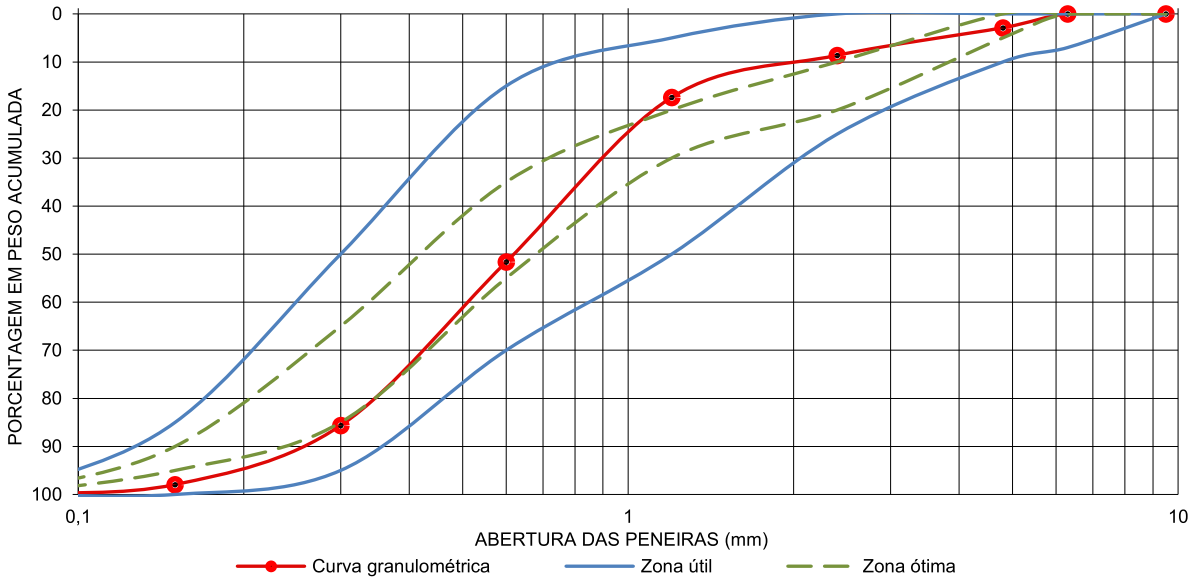
Fonte: Autora (2025).

Tabela 4 - Caracterização física agregado miúdo - Areia natural.

Propriedades Físicas	
Módulo de Finura	2,64
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,80
Massa Específica Real (g/cm³)	2,597
Massa Unitária (g/cm³)	1,526
Teor de Material Pulverulento (%)	1,92

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 14 - Curva granulométrica do agregado miúdo - areia natural.

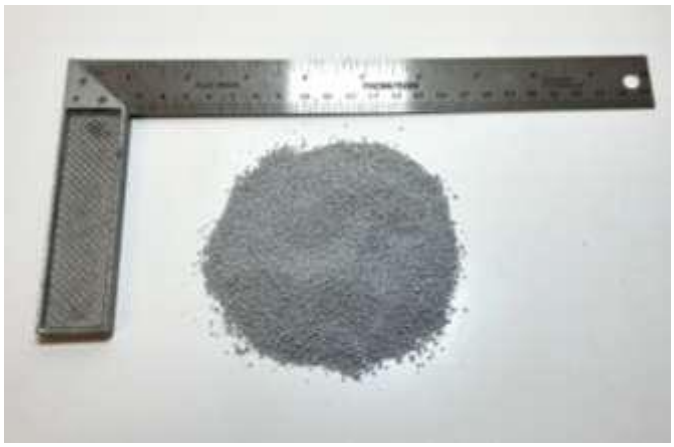


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3.2.5 ADIÇÃO MINERAL – SÍLICA ATIVA

Para contribuir nas propriedades mecânicas, durabilidade e trabalhabilidade do concreto estudado nesta pesquisa, foi utilizada a sílica ativa da marca Down (Figura 15), com características físicas e químicas conforme apresentado na Tabela 5 e análise granulométrica (Figura 16) realizada na UFJF com o auxílio do granulômetro a laser HELOS/BR-OM (Figura 9).

Figura 15 - Adição Mineral Sílica Ativa.



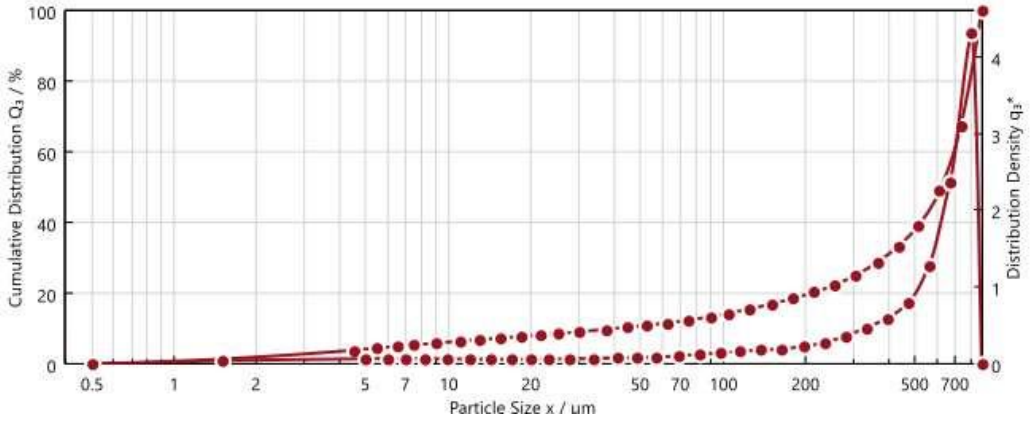
Fonte: Autora (2025).

Tabela 5 - Características físicas e químicas da sílica ativa.

Propriedade	**Valor/Qualidade**
Massa Específica	2220 Kg/m³
Teor de SiO_2	>90%
Superfície Específica	~19.000 m²/Kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,2 ym
Massa unitária não densificado	<350 kg/m³
Massa unitária – densificado	>350 Kg/m³

Fonte: Down (2024).

Figura 16 - Curva granulométrica da sílica ativa.



Fonte: Autora (2025).

3.2.6 ADITIVOS

Levando em conta que a grande área superficial do CGO tende a reduzir a trabalhabilidade da mistura, torna-se necessário utilizar aditivos no preparo das amostras (Gong *et al.*, 2015). Para garantir a trabalhabilidade e, principalmente, possibilitar a dispersão, foram utilizados um aditivo plastificante de pega normal com alto desempenho, Sikament MasterPolyheed 130, e um aditivo superplastificante de terceira geração, Sika ViscoCrete GL 51 (Figura 17), cujas características fornecidas pelo fabricante se encontram na Tabela 6.

Figura 17 - Aditivos Sika ViscoCrete GL 51 CB e Sika MasterPolyheed 130.

Fonte: Autora (2025).

Tabela 6 - Características dos aditivos Sika.

Característica	**Sika ViscoCrete GL51 (Superplastificante)**	**Sika MasterPolyheed 130 (Plastificante)**
Composição	Éter policarboxílico modificado	Combinação de dispersantes orgânicos em base aquosa
Densidade	1,082 – 1,142 Kg/L	1,10 Kg/L
pH	6,00 - 7,00	8,00
Dosagem recomendada	0,7 a 0,9 % em relação ao peso de aglomerantes	0,5 a 0,8% em relação ao peso de aglomerantes

Fonte: Sika (2021), Sika (2024).

3.2.7 ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM GRUPOS CARBONILA (CGO)

Foi utilizado neste trabalho o CGO produzido e fornecido pelo grupo NANO - UFJF. Por apresentar propriedades hidrofílicas, sendo facilmente dissolvido em água, este nanomaterial já foi disponibilizado disperso em água na concentração de 5mg/ml, facilitando sua incorporação ao concreto. A quantidade de água utilizada na dispersão do CGO foi contabilizada na quantidade total de água da mistura para manter a relação água/cimento do traço do concreto. A solução aquosa contendo CGO era disponibilizada em frascos esterilizados, de forma a evitar contaminações e com volume específico para cada dosagem conforme exibido na Figura 18

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

Fonte: Autora (2025).

O CGO utilizado nesta pesquisa tem sua caracterização e procedimento de síntese apresentadas em detalhes na tese de doutorado de Lima (2017), que comprovou a predominância da carbonila em relação a outros grupos oxigenados. O Grupo Nano – UFJF, responsável por produzir e disponibilizar o CGO utilizado para a produção do concreto estudado, adotou o mesmo processo de síntese de Lima (2017).

3.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS

Para um melhor entendimento da influência do CGO nas propriedades do CAD, foi utilizado nesta pesquisa o mesmo traço para as amostras de referência e com adição de CGO. O traço do concreto se baseia no estudo de Motta *et al.,* (2024) que investigou o comportamento termomecânico de um CAD desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia (UFJF) com adição de nanotubos de carbono funcionalizados e não funcionalizados.

A porcentagem de adição de CGO, por sua vez, foi determinada conforme resultados de ensaios mecânicos apresentados na pesquisa de Rosa *et al.,* (2024), que testou diferentes concentrações de CGO em relação à massa de cimento para concreto de classe de resistência C35. O teor de CGO adotado para a produção do CAD com adição de CGO neste estudo foi o que apresentou os melhores resultados nos ensaios mecânicos na pesquisa de Rosa *et al.,* (2024), 0,02%. A Tabela 7 exibe os traços em massa de referência e com adição de CGO utilizados nesta pesquisa.

Tabela 7 - Traços de referência (C-REF) e com adição CGO (C-CGO).

	Cimento	Areia Natural	Brita 0	Fator a/c	Consumo de cimento (Kg/m³)	Aditivo Plastif. (%)	Aditivo Superplast. (%)	Sílica Ativa (%)	CGO (%)
C-REF	1	1,175	1,189	0,4	545	0,2	0,25	12	0
C-CGO	1	1,175	1,189	0,4	545	0,2	0,25	12	0,02

Fonte: Motta (2023).

3.4 PREPARO, CURA E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Após caracterizados todos os materiais, o cimento, brita 0 e sílica foram pesados seguindo as proporções indicadas. Fez-se necessário realizar a correção de umidade do agregado miúdo (areia), que implicou na redução da quantidade de água a ser utilizada no processo de produção dos corpos-de-prova.

A quantidade de água pesada para ser utilizada na mistura foi o volume de água total do traço descontado o volume de água da solução de CGO em meio aquoso e o volume de água presente em forma de umidade na areia. Parte da água restante pesada foi usada para diluir os aditivos plastificante e superplastificante em quantidade adequada conforme o traço do concreto. A Figura 19 exibe os materiais já pesados e separados para virada do traço de concreto.

Figura 19 – Materiais pesados para a produção do concreto.

Fonte: Autora (2025).

Devido ao pequeno volume de concreto a ser produzido nesta pesquisa e para proporcionar melhor dispersão de CGO na mistura, optou-se por utilizar a argamassadeira no preparo do traço. Inicialmente, para produção do traço referência do CAD, em uma bandeja foram misturados manualmente os agregados graúdos e miúdos e em seguida acrescentados a sílica ativa e o cimento para posterior mistura de todos os materiais até obter uma mistura uniforme. Na sequência, essa mistura foi adicionada à argamassadeira, seguida pela primeira porção de água (70% do total pesado) e ligado o equipamento para homogeneização por aproximadamente 2 minutos. Por fim, o restante da água, juntamente com os aditivos, foi adicionado nesta ordem sendo realizada novamente a mistura mecânica por mais 2 minutos (Figura 20). Durante o processo de mistura, quando observado visualmente que havia material aderido na superfície interna da argamassadeira, a mesma era desligada e o material desprendido das bordas com auxílio de uma espátula.

Figura 20 - Mistura dos materiais na argamassadeira.

Fonte: Autora (2025).

Para a produção do traço com incorporação do CGO, o processo de mistura se deu de forma semelhante, sendo acrescentado logo após a adição dos aditivos, a solução aquosa de CGO previamente agitada manualmente com movimentos circulares visando eliminar a possibilidade de sedimentação do nanomaterial, como ilustrado na Figura 21**Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 21 – Adição do CGO na mistura.

Fonte: Autora (2025).

Após realizada a mistura, os CPs foram moldados conforme os parâmetros estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 2019) nos moldes cilíndricos. O concreto foi inserido nas fôrmas fabricadas em bronze previamente lubrificadas com uma camada de desmoldante líquido para facilitar a etapa de desforma. O concreto foi adicionado em três camadas nas fôrmas, sendo cada uma delas adensadas manualmente com aplicação de 30 golpes distribuídos uniformemente com um soquete metálico em toda a seção transversal da fôrma, sem afetar a base (Figura 22).

Na sequência, foi realizado o rasamento da superfície com a borda da fôrma utilizando espátula e os corpos de prova devidamente identificados e cobertos com pano úmido. Também foram moldadas pequenas amostras em moldes de 3 cm de diâmetro e 0,5 cm de espessura para realização do ensaio MEV e DRX (Figura 23). Posteriormente, após moldagem, as amostras foram levadas para a câmara úmida até que pudessem ser desenformadas após 48 horas. Após a desforma, foram imersas em um balde com água, onde permaneceram até os 28 dias de idade.

Figura 22 – Corpos de prova cilíndricos 5x10 cm em seus moldes.

Fonte: Autora (2025).

Figura 23 – Molde para ensaio MEV e DRX.

Fonte: Autora (2025).

3.5 EXPOSIÇÃO TÉRMICA

Com exceção das amostras testadas em TA, as demais foram inseridas em um forno mufla da marca Up Brasil após 28 dias de idade, já secas ao ar, para serem expostas a temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C, permitindo assim avaliar as mudanças nas suas propriedades mecânicas (Figura 24). Foi adotada uma curva linear de temperatura, com uma taxa de variação de 1°C/min (Han *et al.*, 2022) e tempo de exposição após o atingimento da temperatura máxima de 180 minutos visando garantir uma temperatura constante da superfície ao interior de todos os CPs testados (Nadeem, Memon e Lo, 2014) (Heikal *et al.*, 2014). Após serem submetidas às

diferentes temperaturas, as amostras permaneceram no interior da mufla até atingirem novamente a temperatura ambiente. Na sequência todos os corpos de provas foram inseridos novamente em tanque com água para reidratação e posteriormente serem ensaiados para determinação de suas propriedades residuais.

Figura 24 – Disposição das amostras na mufla para exposição térmica.

Fonte: Autora (2025).

3.6 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 real foram realizados pelo método da pesagem hidrostática conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009) a fim investigar e caracterizar os vazios permeáveis do concreto. Por serem ensaios de fácil execução, optou-se por realizar os mesmos para todos os 32 CPs de referência e 32 CPs com adição de CGO em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC após cura de 28 dias.

O ensaio de índice de vazios exprime a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Posto isto, quanto maior esse índice, mais difícil é a penetração de água nos poros do concreto. Para determinação do índice de vazios utiliza-se a equação 1 a seguir:

$$I_V = \frac{m_{sss} - m_s}{m_{sss} - m_{sub}} \times 100\% \qquad (1)$$

I_V: índice de vazios, expresso em porcentagem (%);

m_{sss}: massa da amostra saturada superfície seca, expressa em gramas (g);
m_s: massa da amostra seca em estufa, expressa em gramas (g)
m_{sub}: massa da amostra saturada imersa em água, expressa em gramas (g).

O ensaio de massa específica real é obtido por meio da equação 2. Este parâmetro relaciona a massa e o volume do corpo de prova, sem considerar os poros permeáveis. Portanto, um concreto mais permeável apresenta um maior valor de massa específica real. Além disso, esse parâmetro também é considerado no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico a partir de dados da velocidade de pulso ultrassônico.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_{sss} - m_{sub}} \qquad (2)$$

ρ_r: massa específica real, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

A absorção de água por imersão é uma propriedade que está relacionada a permeabilidade dos materiais, quanto maior for o valor da absorção, mais poros interconectados existem em seu interior. Para isto, os corpos de prova submersos em água serão retirados do balde, pesados submersos, pesados saturados com superfície seca e pesados após a secagem. Os cálculos de absorção por imersão serão realizados utilizando a equação 3:

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

A: Absorção, expressa em porcentagem (%).

3.7 PERDA DE MASSA

A perda de massa foi determinada em porcentagem por meio da pesagem dos 32 corpos de prova de cada traço em TA e após exposição as temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C. A pesagem dos CPs foi realizada por meio de uma balança da marca Marte, com carga máxima 5kg e precisão 0,1g.

3.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para obter a resistência à compressão dos concretos produzidos nesta pesquisa, 2 corpos de provas de cada traço expostos à temperatura ambiente e à cada limite de

temperatura (C-REF e C-CGO) foram rompidos após cura de 28 dias, de acordo com as recomendações e procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2018). Antes dos ensaios, foi necessário que os corpos de prova tivessem sua superfície limpas e planas. Para isso, os corpos de prova passaram por um processo de retificação de suas extremidades a fim de garantir o nivelamento das faces evitando possíveis imperfeições provindas da moldagem.

O ensaio consiste na aplicação de uma força gradual no corpo de prova centralizado em uma prensa hidráulica até que ocorra seu rompimento. Foi utilizada uma prensa hidráulica Contenco Pavitest disponível no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, com capacidade de 100 T (Figura 25).

Figura 25 - Ensaio de resistência à compressão axial.

Fonte: Autora (2025).

Com o valor da carga máxima exibido na prensa que ocasionará a ruptura e as dimensões do CP, é possível obter a resistência característica expressa pela equação 4:

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \tag{4}$$

fc: resistência à compressão axial, expressa em Megapascal (MPa);

F: força máxima aplicada, expresso em newtons (N);
D: diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

A resistência à compressão em geral é considerada a principal propriedade do concreto na construção civil. Portanto, este ensaio objetiva avaliar os efeitos da incorporação do CGO ao concreto quando comparado ao de referência e avaliar o grau de redução na resistência devido ao aumento da temperatura de exposição ao calor (resistência residual).

3.9 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado seguindo as especificações da NBR 7222 (ABNT, 2011) utilizando a prensa hidráulica Contenco Pavitest, com capacidade de 100 T. Neste ensaio, o corpo de prova foi posicionado no equipamento e os pratos ajustados até exercerem compressão suficiente para manter a posição do CP de forma que a carga fosse aplicada continuamente nas duas geratrizes diametralmente opostas do mesmo (Figura 26).

Figura 26 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Fonte: Autora (2025).

Devido ao fato do concreto ser um material pouco resistente à tração, julgou-se importante realizar este ensaio a fim de avaliar se a incorporação do CGO é capaz de influenciar positivamente esta propriedade. Desta forma, foram rompidos 2 corpos de

provas de cada traço (C-REF e C-CGO) em temperatura ambiente e expostos a cada limite de temperatura após cura de 28 dias.

De posse do valor da força obtido pelo equipamento e dimensões do CP, obtém-se os resultados da tração de forma indireta por meio da equação 5. O resultado do valor da resistência à tração direta pode então ser obtido com o uso da equação 6.

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

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

f_{ct}: resistência à tração por compressão diametral, expressa em Megapascal (MPa);
F: força máxima aplicada, expressa em newtons (N);
D: diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);
l: comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

3.10 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

O ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) mede o tempo que uma onda longitudinal percorre o CP, cujas dimensões são conhecidas. Seguindo recomendações da NBR 8.802 (ABNT, 2021), o ensaio deve ser realizado preferencialmente por meio do posicionamento dos transdutores emissor e receptor nas faces planas opostas de cada CP (transmissão direta) com fina camada de gel acoplante. Antes das medições de VPU dos corpos de prova de concreto, o equipamento Pundit Lab (*Portable Ultrassonic Non-Destructive Digital Indicating Tester*) da Proceq disponível no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora foi calibrado conforme instruções do fabricante (Figura 27).

Figura 27 - Ensaio de velocidade do pulso ultrassônico.

Fonte: Autora (2025).

O ensaio foi realizado em todos os corpos de prova moldados nesta pesquisa aos 28 dias de idade, devido ao fato de ser um ensaio não destrutivo e de fácil execução. Ele permite analisar como a incorporação do CGO pode influenciar nas descontinuidades e distribuição dos vazios no interior do CP. Segundo Mendes *et al.*, (2020) quanto menor a VPU, maior a quantidade de poros entre os componentes da matriz.

Para a transmissão direta adotada, para cada leitura foi registrado o tempo de percurso das ondas em (μs). Os resultados da VPU foram então determinados através da Equação 7.

$$V = \frac{L}{t} \tag{7}$$

V: velocidade de propagação, expressa em metros por segundo (m/s);
L: distância entre os 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 (s).

3.11 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

O módulo de elasticidade se refere ao comportamento elástico de um material, estando diretamente ligado à microestrutura do mesmo. Como a incorporação de CGO modifica a microestrutura do CAD, torna-se importante avaliar essa influência. Este parâmetro pode ser obtido pelo coeficiente angular da reta tangente à curva tensão x deformação durante o regime elástico, de acordo com a NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

O ensaio de módulo de elasticidade estático é realizado por meio de ensaio mecânico destrutivo em que é aplicada uma tensão no corpo de prova que se relaciona ao deslocamento dentro da região de deformação elástica. Por ser destrutivo, foram utilizados 3 corpos de prova para cada traço a cada temperatura, com idade de 28 dias, e o ensaio foi realizado com base na NBR 8522-1 (ABNT, 2021). Essa norma recomenda a aplicação de uma carga correspondente a 30% da carga ruptura média à compressão axial por um intervalo de tempo de 60 segundos e descarga até 0,5 MPa por mais 60 segundos, sendo este ciclo repetido três vezes. Neste ensaio, o CP foi colocado centralizado em uma prensa hidráulica conectada a um computador com software TestMod, desenvolvido pela DINATESTE, que armazena os dados sobre as deformações com auxílio de extensômetros do tipo *strain gages* fixados em lados opostos de cada CP (Figura 28).

Figura 28 - Ensaio de módulo de elasticidade estático.

Fonte: Autora (2025).

Por meio dos dados obtidos, é possível calcular o módulo de elasticidade estático pela equação 8.

$$E_{Ci} = \frac{0{,}3 \times f_c - 0{,}5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (8)$$

E_{ci}: módulo de elasticidade estático, expresso em Gigapascal (GPa);
f_c: média da resistência à compressão axial, expressa em Megapascal (MPa);
ε_b: deformação específica média do corpo de prova sob maior tensão ($\varepsilon=\Delta L/L$);
ε_a: deformação específica média do corpo de prova sob tensão básica ($\varepsilon=\Delta L/L$);

Por sua vez, o módulo de elasticidade dinâmico é obtido a partir dos resultados do ensaio de VPU e massa específica real utilizando a equação 9, segundo Bauer (2019).

$$E_d = \frac{V^2 \times \rho(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \times 10^6 \quad (9)$$

E_d: módulo de elasticidade dinâmico, expresso em Gigapascal (GPa);
V: velocidade de pulso ultrassônico, expressa em m/s;
ρ: massa específica real do concreto, expressa em g/cm³;
μ: coeficiente de Poisson, sugerido como μ=0,2 por Mehta e Monteiro (2014).

3.12 ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A fim de investigar e caracterizar a morfologia das fases formadas e compostos químicos no CAD de referência com a adição de CGO em TA e após exposição as temperaturas de 300ºC, 600ºC e 900ºC, foram realizadas análises qualitativas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para visualização da microestrutura em alta ampliação e resolução.

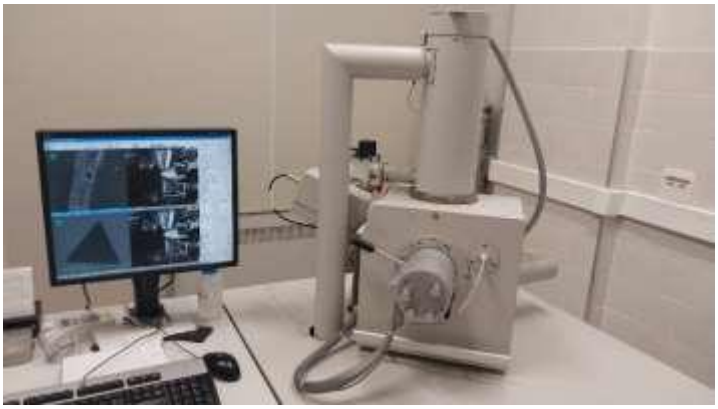
Para realização da análise da microestrutura dos concretos deste estudo, foram utilizadas amostras produzidas de dimensões 3 cm de diâmetro por 0,5 cm de espessura (Figura 29). O ensaio de MEV foi realizado no laboratório de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) utilizando um microscópio eletrônico de

varredura da marca FEI (modelo Quanta 250), feixe de elétrons com energia de 20.000 kV e com medidas no modo alto vácuo, com a pressão variando na ordem de 10^{-5} e 10^{-6} mbar (Figura 30).

Figura 29 – Amostras C-REF e C-CGO após exposição térmica para ensaio MEV e DRX.

Fonte: Autora (2025).

Figura 30 - Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Autora (2025).

3.13 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Para complementar a análise qualitativa dos compostos químicos, foi realizado ensaio de difração de raios-X (DRX) para averiguar o efeito da temperatura e da incorporação do CGO nas alterações dos produtos hidratados do cimento, a partir das mudanças nas fases cristalinas.

Para realização deste ensaio, foram examinadas uma amostra de cada traço submetida a cada uma das temperaturas adotadas desta pesquisa após cura de 28 dias conforme Figura 29. Para obter os padrões de difração, foi utilizado um difratômetro de raios X Bruker D8 Advance (Figura 31), utilizando fonte de radiação Cu-Kα (λ = 1,5406 Å) a 40 keV e corrente de cátodo de 20 mA, em uma faixa de 5º a 80º com resolução de 0,02°, disponível no laboratório de Física na Universidade Federal de Juiz de Fora.

Figura 31 - Difratômetro de raios X.

Fonte: Autora (2025).

3.14 ENSAIO CONDUTIVIDADE TÉRMICA

O ensaio de condutividade térmica desta pesquisa foi realizado na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP por meio de um medidor de

condutividade térmica modelo DTC 300 da marca TA Instruments conforme Figura 32, que mede a condutividade térmica em uma ampla faixa de temperaturas.

Figura 32 - Medidor de condutividade DTC 300 TA Instruments.

Fonte: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - USP (2025).

O funcionamento do aparelho consiste em um módulo calorímetro, localizado na pilha inferior, para a medição da condutividade térmica, e um forno de proteção lateral para evitar perda de calor nas bordas. A resistência de contato é minimizada pela aplicação de uma carga pneumática à pilha de teste, e pelo uso de um composto de interface termicamente condutor. O equipamento funciona em uma faixa de temperatura de -20°C a 300°C e de condutividade térmica de 0,1 a 40 W/(m·K).

Para realização deste ensaio são necessárias amostras cilíndricas com dimensões de 50mm de diâmetro e 25mm de espessura. Foram ensaiadas 4 amostras do traço C-REF em TA, 300º C, 600ºC e 900ºC e 4 amostras do traço C-CGO em TA, 300º C, 600ºC e 900ºC (Figura 33). Portanto, optou-se por seccionar os CPs de dimensões 5x10 cm em TA em discos nas dimensões necessárias para execução do ensaio com auxílio de serra diamantada em corte via seco. As amostras após serem expostas à elevadas temperaturas foram polidas com lixas números 80 e 150 a fim de reduzir a superfície áspera após o corte. Na sequência, as amostras foram limpas para remover eventuais resquícios de materiais ainda na superfície possibilitando dessa forma a realização da medida da condutividade térmica pelo equipamento.

Figura 33 – Amostras cilíndricas (50mm x 25mm) empregadas ensaio de condutividade térmica.

Fonte: Autora (2025).

3.15 ANÁLISE ESTATÍSTICA

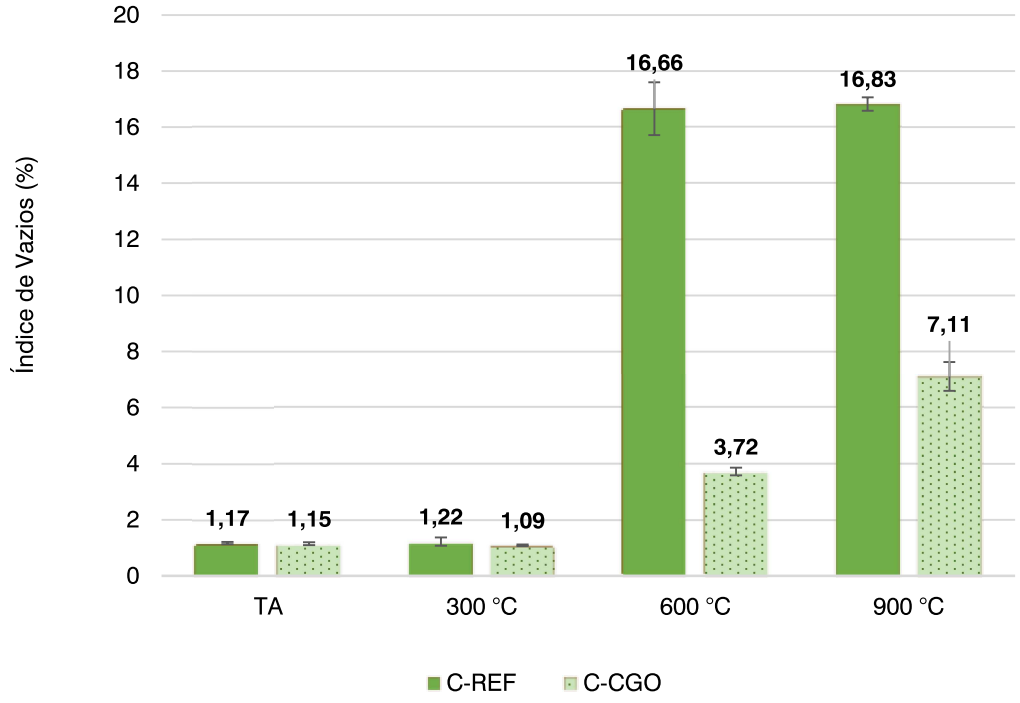
Considerando o tipo de pesquisa adotado é importante realizar uma análise estatística para validação dos resultados obtidos verificando se existe, ou não, uma diferença significativa entre as médias dos resultados, apontando se os resultados são satisfatórios, ou inconclusivos. Assim, os dados experimentais obtidos nesta pesquisa foram analisados pelo método estatístico de análise de variância com um fator (one-way ANOVA) com o auxílio do programa Jamovi. Esta análise foi escolhida por permitir comparar as médias de dois ou mais grupos de forma a determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre eles. O nível de significância adotado será de 0,05, ou seja, as diferenças entre as médias dos grupos foram consideradas significativas quando os dados se diferem acima de 5%. Quando necessário foi usado o teste de Tukey para múltiplas comparações quando as variâncias foram semelhantes (homoscedasticidade) e o teste de Games-Howell quando as variâncias foram desiguais (heterocedasticidade).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

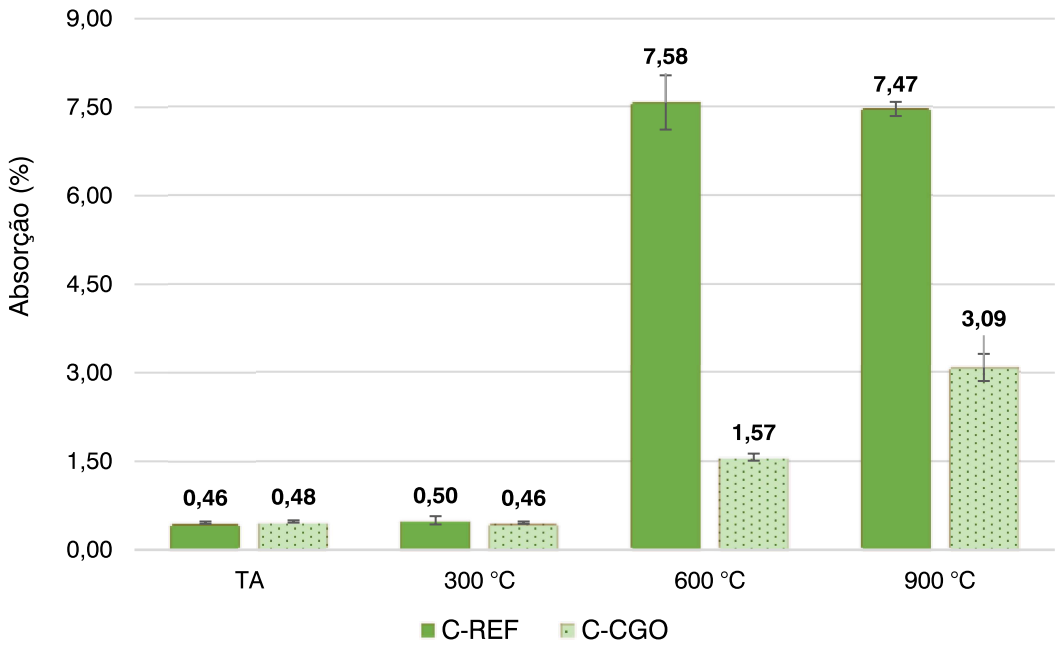
A Figura 34 exibe os resultados dos índices de vazios (I_V) dos CPs de CAD convencional (C-REF) e com adição de 0,02% de CGO (C-CGO), em temperatura ambiente (TA) e após serem expostos a 300ºC, 600ºC e 900ºC. Já a Figura 35 os resultados de absorção de água por imersão (A) dos CPs de CAD C-REF e C-CGO em TA e após a exposição as temperaturas adotadas.

Figura 34 - Resultados do ensaio de índices de vazios (I_V) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 35 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão (A) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

É possível observar um aumento progressivo do índice de vazios e absorção de água nos concretos à medida em que se aumentou a temperatura em ambos os concretos estudados. Esse fenômeno ocorre devido à decomposição dos produtos originados no processo de hidratação do cimento, à perda de água e ao aumento das microfissuras no concreto com o aquecimento (Ren *et al.*, 2024) (Rao *et al.*, 2024).

Em comparação aos CPs C-REF nota-se que os CPs C-CGO tiveram um aumento do índice de vazios menos acentuado com o aumento da temperatura. Chu *et al.*, (2020) demonstraram que a adição de GO em concretos de alta resistência também proporcionou uma redução no número de vazios em relação ao convencional, devido ao aumento nos produtos de hidratação e densificação da microestrutura.

As análises estatísticas indicam que em TA e após a exposição a temperatura de 300°C não houve diferença significativa entre os dois traços analisados para o parâmetro de índice de vazios e absorção de água. Acredita-se que tal fato possa ter ocorrido pois quando concretos são submetidos a temperaturas próximo a 300ºC a

decomposição de seus produtos de hidratação ainda é bem sutil, ocorrendo nesta faixa de temperatura uma maior perda de água livre e adsorvida (Battagin e Silveira, 2018), (Ribeiro e Tutikian, 2018).

Chu *et al*., (2020) e Yeke e Yu (2021) observaram que a adição de GO em concretos de ultra alto desempenho em TA foi capaz de reduzir a porosidade do compósito, devido a melhoria da estrutura de poros ocasionada pela ação do material na matriz. O GO atua formando novos cristais no processo de hidratação do cimento, criando uma rede que preenche os vazios e fissuras no interior do material, reduzindo, portanto, o índice de vazios e absorção de água desempenhando um papel de barreira (Indukuri, Nerella e Madduru, 2020) (Liu *et al.*, 2021). No presente trabalho, não foi observado esse fenômeno de forma estatisticamente significativa para TA.

Nas temperaturas de 600ºC e 900ºC houve uma maior diferença no índice de vazios e absorção de água entre os traços C-REF e C-CGO, sendo esta variação mais evidenciada na temperatura de 600ºC. Acredita-se que em 900ºC houve uma menor variação possivelmente devido à decomposição dos grupos funcionais de oxigênio do CGO, em especial o grupo carbonila, resultando na formação de defeitos em nanoescala (Chen, Li e Du, 2023).

A maior variação nas temperaturas de 600ºC e 900ºC sugere que o CGO possa atuar no refinamento dos poros do CAD devido a sua capacidade de potencializar a formação de produtos de hidratação do cimento mais resistentes a temperaturas elevadas e sua capacidade de evitar a formação de poros de maiores diâmetros após exposição a altas temperaturas, ao mesmo tempo em que favorece a formação de poros com diâmetros menores.

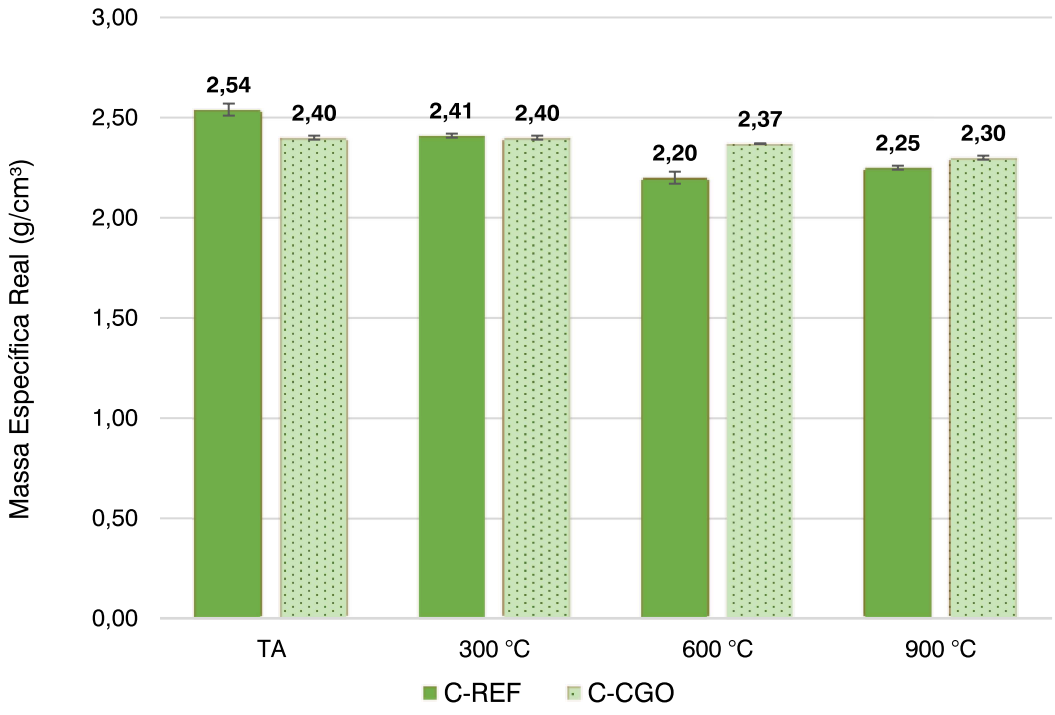
Em consonância com os resultados obtidos nesta pesquisa, Chen *et al*., (2022) observaram que compósitos de cimento contendo 0,04% de GO apresentaram uma redução de cerca de 8,5% na porosidade total e 36,7% no tamanho do diâmetro dos poros em relação aos compósitos sem adição do material após serem submetidos a elevadas temperaturas. Da mesma forma, Ren *et al.*, (2024) verificaram que GO pode atuar dificultando a formação de poros maiores e mais prejudiciais e favorecendo a proporção de poros de menor dimensão mesmo após exposição a elevadas

temperaturas, o que indica que o GO atua no refinamento da estrutura dos poros do material.

Portanto, devido aos melhores resultados residuais de índice de vazios e absorção de água dos concretos com CGO após exposição a elevadas temperaturas em comparação aos resultados dos concretos C-REF, presume-se que o CGO atue de forma semelhante ao GO formando cristais mais densos de produtos de hidratação, preenchendo os poros do material criando uma barreira, resultando em uma menor permeabilidade do concreto, que se mantém mesmo sob altas temperaturas.

Os resultados das massas específica (ρr) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO em TA e após exposição a elevadas temperaturas são apresentados na Figura 36. Nota-se que não houve alteração significativa na massa específica real de ambos os traços com o aumento da temperatura. No entanto, segundo Ren *et al*., (2024), ao ser submetida a altas temperaturas, a água aprisionada no interior do concreto evapora e é liberada formando poros que culminam em uma sútil redução na massa específica real.

Figura 36 - Resultados do ensaio de massas específica real (ρ_r) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Considerando as temperaturas de 600ºC e 900ºC, é possível notar que o traço C-CGO apresentou uma menor variação em sua massa específica após exposição a altas temperaturas – 1,5% em média, em comparação com 4% do C-REF. Em temperatura ambiente, o concreto C-REF apresentou um valor de massa específica ligeiramente superior ao concreto C-CGO. Tal resultado está relacionado ao fato deste parâmetro relacionar a massa e o volume do CP, sem considerar os poros permeáveis.

Li *et al.,* (2015) observaram que os grupos funcionais oxigenados presentes nos óxidos de grafeno reagem preferencialmente com C_3S, C_2S e C_3A, gerando locais de crescimento para produtos adicionais de hidratação do cimento proporcionando um aumento na massa específica do material. Esse fenômeno pode ser explicado pelo papel do CGO em atuar na reorganização dos poros do concreto e refinamento dos cristais de C-S-H, o que resulta em um material mais uniforme e denso (Chen *et al.*, 2022). De forma análoga, estudos como de Long *et al.*, (2018) observaram que adição GO em compósitos de cimento torna a matriz mais densa devido ao efeito de preenchimento do material e ao fato dos grupos funcionais na superfície do GO formarem fortes ligações covalentes entre o GO e o gel C-S-H o que melhora ainda mais a ligação interfacial.

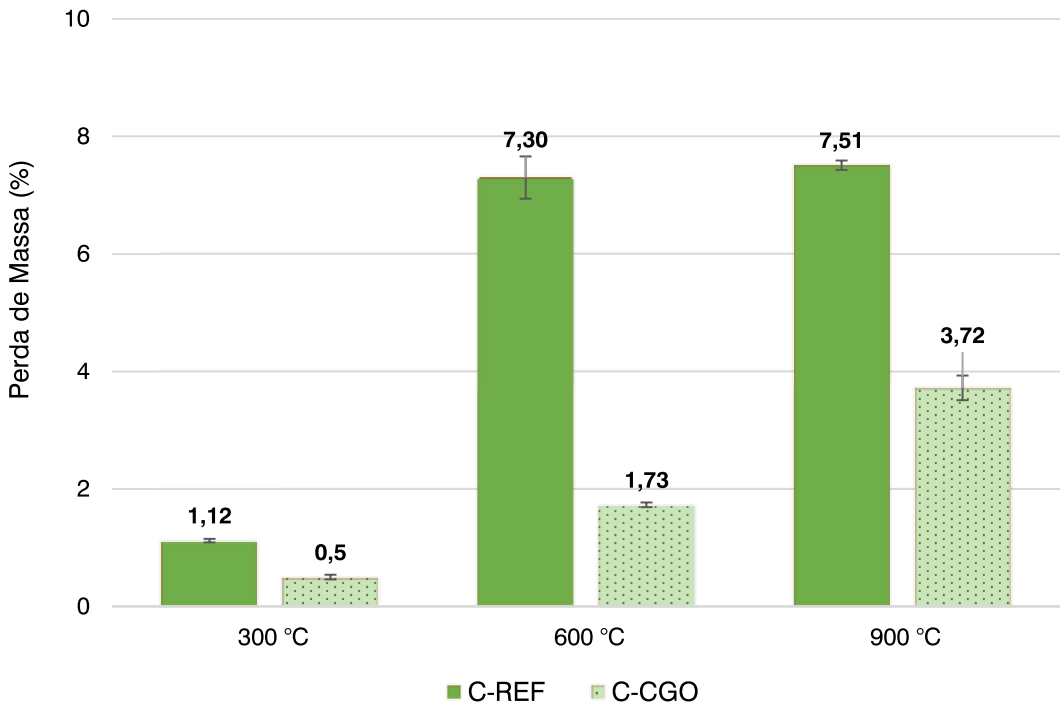
Após exposição as temperaturas de 600ºC e 900ºC, a massa específica das amostras C-CGO foi ligeiramente superior às amostras de C-REF. Os resultados dos dois traços após exposição a 300ºC foram os únicos sem diferença significativa. O sútil aumento na massa específica pode indicar que o CGO ao regular a formação de produtos de hidratação do cimento é capaz de formar uma estrutura ligeiramente mais densa e compacta que não sofre tantos danos após a exposição ao calor.

4.2 PERDA DE MASSA

A Figura 37 apresenta os resultados de perda de massa em porcentagem dos corpos de prova de C-REF e C-CGO após serem expostos as temperaturas estabelecidas nesta pesquisa em relação à TA. É possível notar que após exposição a 300ºC a perda de massa é mínima, tal fato pode ocorrer devido a possibilidade de hidratação adicional de grãos de cimento não hidratados (Han *et al.*, 2022) (Huang *et al.*, 2024). Após exposição a 600ºC e 900ºC, a perda de massa é mais acentuada. Nessas temperaturas, a perda de massa está relacionada ao aumento da porosidade

do concreto devido à evaporação de água livre contida no interior do compósito, que sai do material e devido à decomposição do C-S-H e $CaCO_3$ (Chen, Li e Du, 2023) (Ren *et al.*, 2024) (Rao *et al.*, 2024).

Figura 37 - Resultados da perda de massa dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, após 300ºC, 600ºC e 900ºC.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nota-se que, para todas as temperaturas, a perda de massa do C-CGO foi inferior à do C-REF. As diferenças entre os traços foram estatisticamente significativas. Tal fato ocorre provavelmente devido ao fato de o CGO atuar refinando os poros resultando em uma melhor retenção de água e promovendo uma decomposição mais lenta dos produtos hidratados em comparação ao concreto de referência, conforme observado por Rao *et al.*, (2024) para concretos com adição de GO submetidos à elevadas temperaturas.

Adicionalmente, CADs quando submetidos a temperaturas superiores a 300ºC tornam-se mais propensos a sofrer ruptura explosiva (*spalling*) devido às pressões internas no material ocasionada pela evaporação da água livre no interior do material quando aquecido, ocorrendo perda de sua camada superficial (Gil *et al.*, 2018) (Carvalho *et al.*, 2024). Portanto, acredita-se que para as temperaturas de 600°C e

900°C, o CGO atuou no interior do compósito reorganizando os poros e gerando microvesículas que possibilitaram a evaporação de água interna, e reduzido consideravelmente a perda de camada superficial ocasionada pelo efeito *spalling* (Li *et al.*, 2015) (Mohammed *et al.*, 2017) (Chen, Li e Du, 2023) (Huang *et al.*, 2024). Cabe ressaltar, que nesta pesquisa foi adotada uma taxa de aquecimento mais lenta (1ºC/min) que permitiu com que o calor fosse propagado de maneira mais uniforme pelo CP, reduzindo as tensões internas não ocasionando o *spalling* em ambos os traços estudados.

4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A Figura 38 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão axial conduzido nos corpos de prova C-REF e C-CGO, em TA e 300°C, 600°C e 900°C. Considerando as resistências médias à compressão é possível observar que não houve diferença significativa entre os traços para TA e as temperaturas adotadas. No entanto, em ambas as temperaturas os resultados do traço C-CGO foram superiores ao traço C-REF.

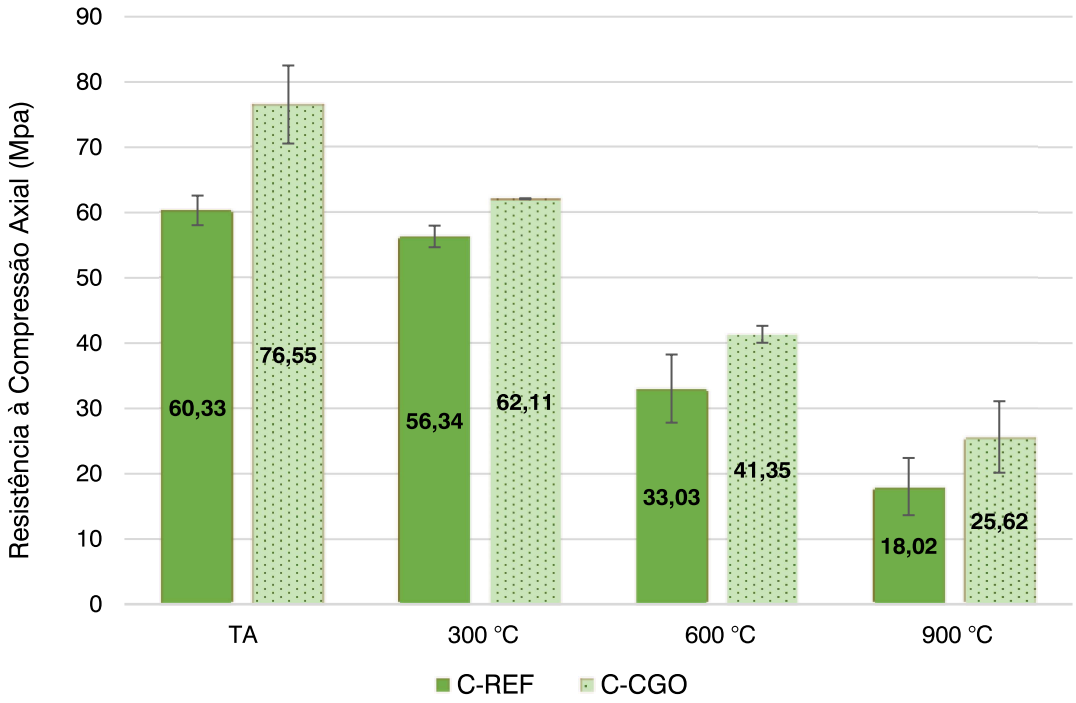
Em temperatura ambiente, foi possível observar que o traço C-CGO apresentou o maior resultado, cerca de 27% superior ao traço C-REF. O melhor desempenho pode ser atribuído à capacidade do CGO de formar produtos de hidratação com estruturas cristalinas mais densas e compactas, melhorando a microestrutura do material.

Reddy e Prassad (2023) obtiveram resultados semelhantes ao adicionar o GO em concreto classe C60, alcançado valores de resistência à compressão cerca de 21,4% superior com adição de 0,20% do nanomaterial. Os autores também atribuem essa melhoria a atuação do GO em oferecer locais de nucleação, que favorecem o processo de hidratação do cimento, produzindo mais cristais de C-S-H mais densos. No entanto, na dosagem mais próxima à adotada nesta pesquisa (0,05%), os autores obtiveram resultados de resistência apenas 8,4% superiores ao concreto referência. Já Ren *et al*., (2024) adicionaram GO na mesma dosagem (0,02%) obtendo resultados de resistência à compressão aproximadamente 15% superior em relação ao resultado do material sem adição de nanomaterial. Chu *et al*., (2020) e Yeke e Yu (2021) avaliaram a adição do GO em concretos de ultra alto desempenho, alcançando resistências à

compressão superiores em aproximadamente 8,3% e 10% respectivamente em relação ao concreto referência em TA.

Esses resultados indicam que o CGO apresenta um desempenho superior ao GO em termos de ganho de resistência à compressão em temperatura ambiente. Essa melhoria pode ser atribuída à predominância do grupo oxigenado carbonila no CGO, que possivelmente reage de forma mais rápida com os componentes do cimento. Esse processo favorece o desenvolvimento de locais de crescimento para os produtos de hidratação, resultando na formação mais eficaz de cristais de C-S-H mais densos e resistentes.

Figura 38 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Na temperatura de 300°C, o traço CGO também manteve uma resistência à compressão superior ao C-REF, cerca de 10,5%. Nessa temperatura, pode-se inferir que o CGO influenciou na densificação e compactação da microestrutura dificultando a propagação de fissuras, agindo no aprimoramento na estrutura assim como ocorre com o GO (Rao *et al.*, 2024) (Guo *et al.*, 2024) (Han *et al.*, 2022).

Em 600°C, a resistência a compressão diminui significativamente em relação a TA. Nesta temperatura ocorre à decomposição do gel C-S-H (Han *et al.*, 2022), resultando em fissuras perceptíveis nos CPs que afetam sua capacidade em resistir a esforços de compressão (essas fissuras serão apresentadas na seção 4.10 de Análise Visual). Nessa temperatura, o C-CGO alcançou uma resistência à compressão cerca de 25% superior em comparação ao traço C-REF.

Yan *et al.*, (2022) observaram em compósito cimentícios com 0,05% de GO uma resistência à compressão residual de aproximadamente 14,3% superior à resistência do compósito referência nesta mesma temperatura. Já Han *et al.*, (2022) verificaram em seus estudos uma resistência à compressão 12,5% superior em pastas de cimento reforçadas com GO após aquecimento à 500ºC quando comparadas ao material de referência. Rao *et al.,* (2024) em seus estudos notaram que o GO é capaz de retardar a decomposição térmica dos produtos hidratados dos compósitos em elevadas temperaturas, devido à sua capacidade de refinar a estrutura dos poros.

Na temperatura de 900°C, o traço C-CGO obteve resultados de resistência à compressão aproximadamente 42% superior ao traço C-REF. De forma semelhante, Han *et al*., (2022) notaram uma perda de resistência à compressão menos acentuada de compósitos com adição de GO. Ao trabalhar com concreto classe C55, a 750 °C, a diferença foi de 8,1% em comparação a amostra sem adição do nanomaterial e a 1.000ºC, 4,23%. Os resultados de resistência à compressão residual após aquecimento dos CADs com adição de CGO demonstra a maior eficácia deste material em relação ao GO sob altas temperaturas.

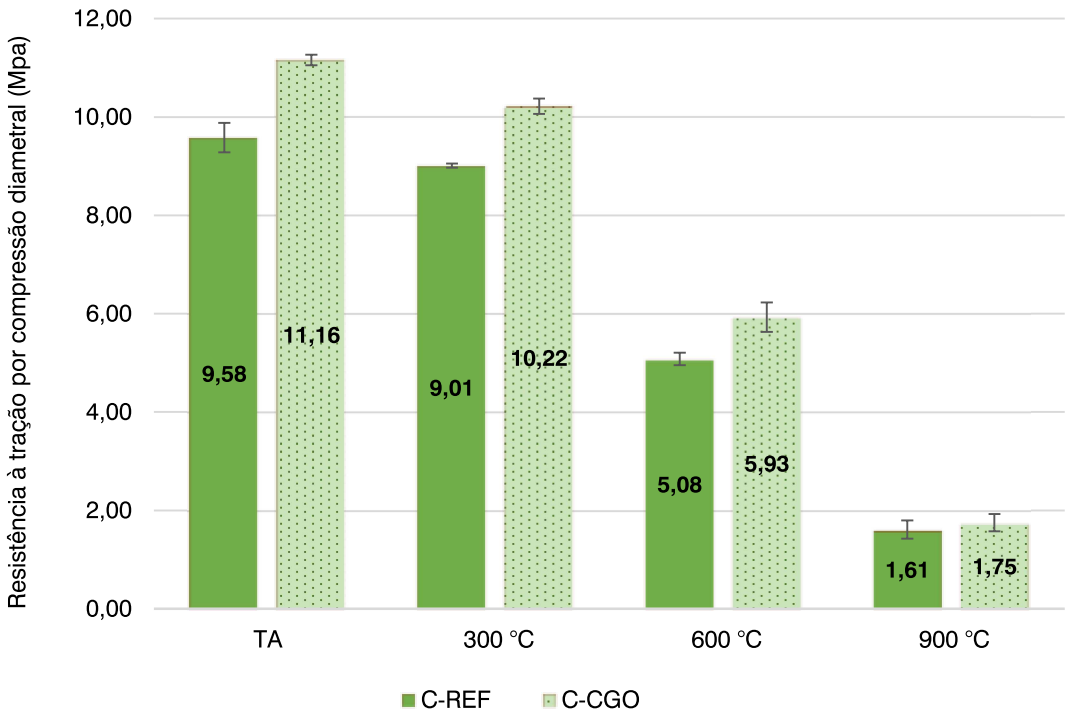
4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Figura 39 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova C-REF e C-CGO, em TA e 300°C, 600°C e 900°C. Como esperado, a resistência à tração também reduziu com o aumento da temperatura. Isso ocorre principalmente devido ao processo de transformações físicas e químicas no material com o aquecimento (Tabela 1), que leva à redução da resistência mecânica e a evaporação da água contida no interior do compósito que favorece o surgimento de fissuras (Chen *et al.*, 2022) (Rao *et al.*, 2024).

Em temperatura ambiente, o traço contendo 0,02% de CGO teve uma melhora significativa na resistência à tração quando comparado ao traço C-REF, com um incremento de aproximadamente 17%. Estudos de Chu *et al.*, (2020) observaram uma melhora de 15,6% na resistência à tração de concretos de ultra alto desempenho com adição de 0,025% de GO. Esse fenômeno pode estar relacionado a ligação química na interface CGO/matriz e a produção de novos produtos C-S-H, de forma análoga ao que ocorre com o GO (Yeke e Yu, 2021).

Yan *et al.*, (2020) realizaram estudos com adição de 0,02% GO em argamassa de cimento, mesma dosagem adotada nesta pesquisa, e observaram que a adição do nanomaterial resulta em um material com matriz mais densa e uma zona de transição interfacial (ITZ) mais resistente em comparação à argamassa de cimento de referência.

Figura 39 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nas temperaturas de 300°C, 600ºC e 900ºC as análises estatísticas indicam que não houve diferença significativa entre as resistências à tração dos traços analisados, possivelmente devido ao fato de ambos os traços quando submetidos a temperaturas nesta faixa sofrerem alterações parecidas (Yao e Lu, 2021). Observa-se também o

mesmo comportamento de limitação da perda da resistência à tração no traço com adição de CGO em comparação ao C-REF (13,4% para 300°C, 16,7% para 600°C e 8,7% para 900°C) conforme visto no resultado de resistência à compressão, possivelmente devido as mesmas causas.

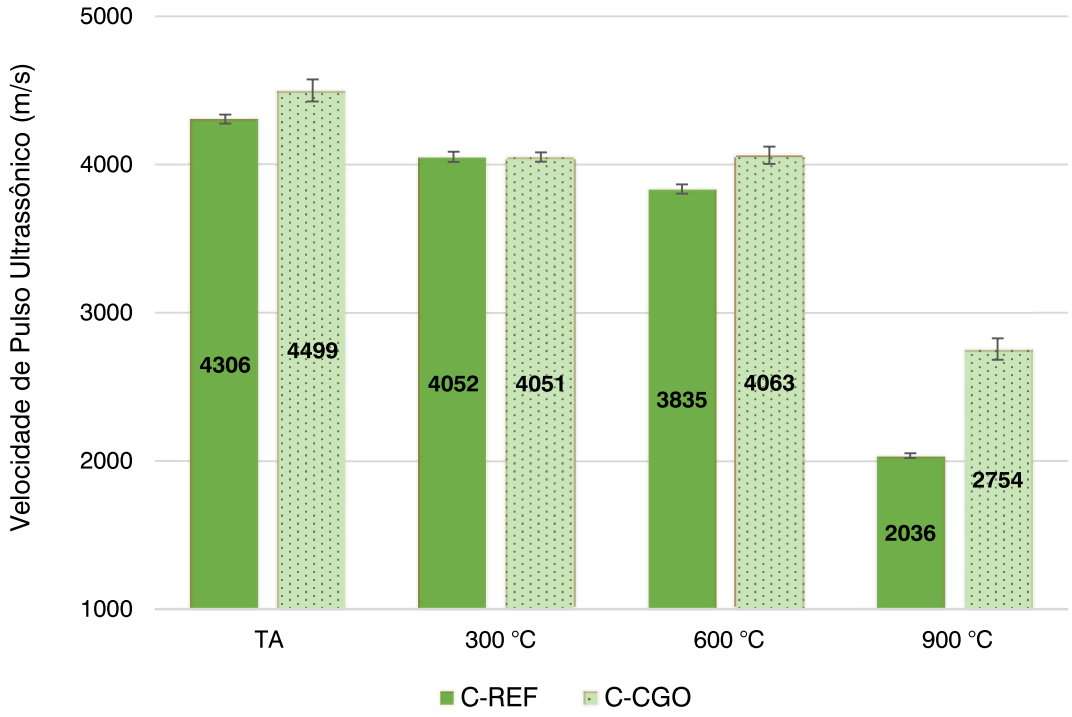
4.5 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO (VPU)

A Figura 40 apresenta os resultados dos ensaios de VPU realizados nos corpos de prova de C-CGO e C-REF, em TA e após serem submetidos a altas temperaturas. As análises estatísticas indicam que houve diferenças significativas nos resultados do VPU entre os traços de concretos produzidos, com exceção da temperatura de 300°C.

Nos CPs expostos a elevadas temperaturas observa-se que houve uma diminuição progressiva nos VPUs das amostras de C-REF e de 0,02% CGO com o aumento da temperatura, devido ao aumento na porosidade do material e fissurações provenientes do processo de degradação do concreto ocasionado pelo aquecimento (Motta *et al.*, 2024). Corroborando com o exposto por Mendes *et al*., (2020), a densidade é a principal grandeza que governa a VPU, de modo que uma matriz com mais poros e interfaces leva a uma menor VPU.

Observa-se que em todas as situações, o concreto de C-CGO obteve resultados similares ou superiores em comparação ao concreto de C-REF. O acréscimo no resultado da VPU nos concretos com CGO se deve ao efeito de nucleação deste nanomaterial para os produtos de hidratação do cimento, favorecendo o crescimento de estruturas de C-S-H mais densas (Djenaoucine *et al.*, 2024).

Figura 40 - Resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nesta pesquisa em TA o VPU do traço C-CGO foi aproximadamente 4,5% superior ao C-REF. Esse resultado indica novamente que o CGO é capaz de atuar reduzindo os macroporos e as microfissurações da matriz devido ao seu potencial efeito de nanopreenchimento ao formar novos produtos de hidratação mais densos mesmo após submetidos a elevadas temperaturas. Reddy e Prasad (2023) também observaram um aumento de 3,7% nos resultados de VPU em concreto de alta resistência com adição de 0,05% GO, atribuindo este aumento ao efeito de preenchimento do nanomaterial, que resulta em uma densificação da microestrutura da matriz do concreto. Apesar dos resultados semelhantes entre as pesquisas, atribui-se ao CGO melhor desempenho devido à menor dosagem adicionada para promover o mesmo incremento de VPU.

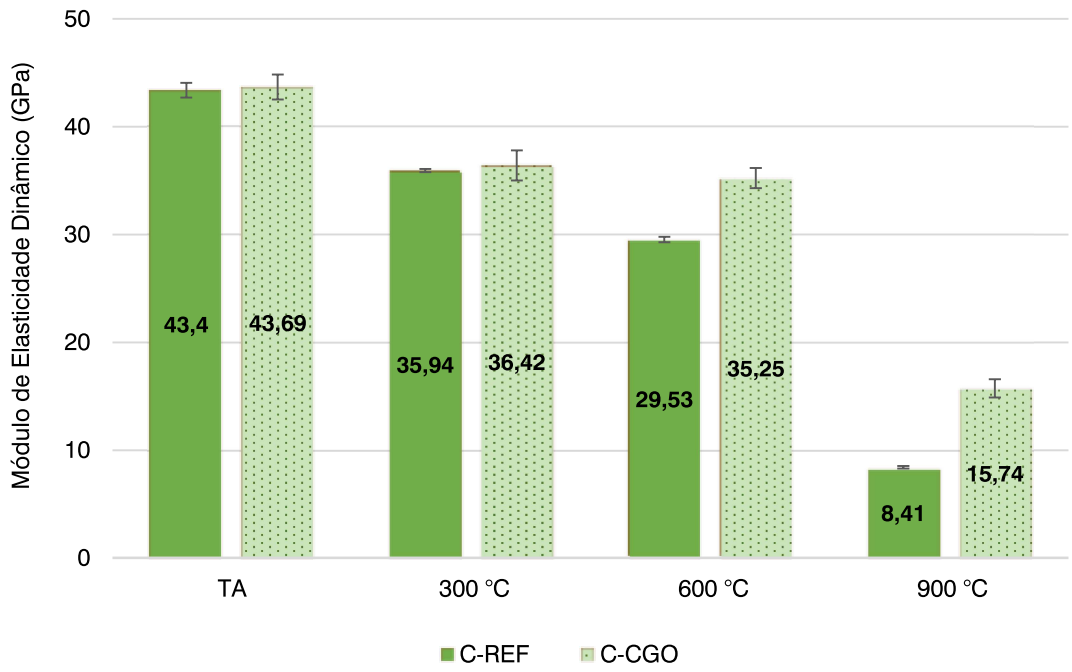
Na temperatura de 300°C, não houve diferenças significativas entre os resultados dos traços C-REF e C-CGO. Já em 600ºC e 900ºC, houve uma diferença significativa entre os traços analisados. Os resultados dos traços C-CGO foram cerca

de 6% e 35% superiores ao resultado do traço C-REF, respectivamente. Tais resultados reforçam que CGO é capaz de atuar reduzindo a formação de macroporos e os danos quando os concretos são expostos a elevadas temperaturas.

4.6 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi definido a partir dos resultados obtidos no ensaio de VPU nos corpos de prova C-REF e C-CGO, em TA e nas temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C. Os valores do módulo de elasticidade dinâmico são apresentados na Figura 41. Os resultados deste ensaio apresentaram uma tendência semelhante à observada no ensaio de VPU, uma vez que ambos os métodos se relacionam de forma linear.

Figura 41 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico (E_d) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

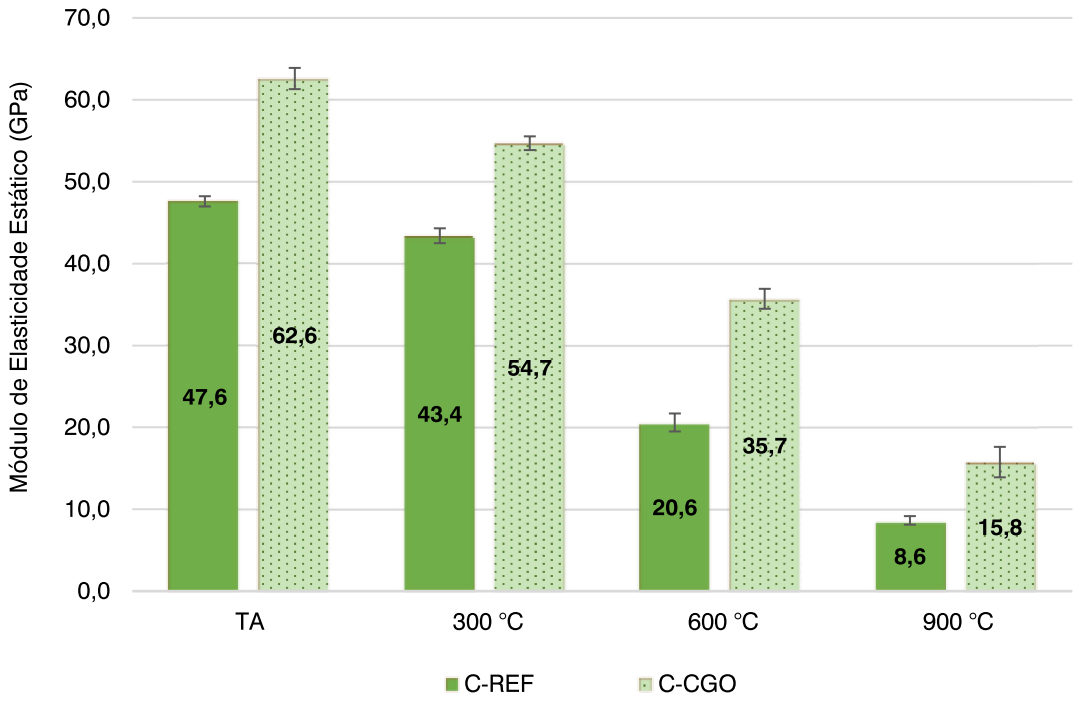
Ren *et al.,* (2024) analisaram o efeito da incorporação de 0,02% de GO em concretos submetidos a elevadas temperaturas, concluindo de forma análoga ao obtido neste estudo com CGO, que o GO atua melhorando o módulo de elasticidade dinâmico

de concretos após exposição a altas temperaturas. Segundo dados apresentados pelos autores, o resultado do módulo de elasticidade da amostra com 0,02% de GO após exposição a 600ºC foi aproximadamente 10% superior em relação a amostra referência. Já o resultado obtido nesta pesquisa com adição de 0,02% de CGO após exposição na mesma temperatura (600ºC) foi cerca de 20% superior em relação a amostra C-REF, demonstrando o melhor desempenho do CGO em comparação ao GO quando adicionado a concretos submetidos a elevadas temperaturas.

A Figura 42, por sua vez, apresenta os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático (E_{ci}). Observa-se que os resultados do módulo de elasticidade estático seguiram o mesmo padrão de crescimento dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico.

Os resultados dos traços C-REF e C-CGO decresceram com o aumento da temperatura, como esperado. Conforme resultados do módulo de elasticidade dinâmico e da resistência à tração e à compressão, em todas as temperaturas os maiores resultados de módulo de elasticidade estático foram obtidos nas amostras com adição de CGO. O aumento no módulo de elasticidade estático do concreto com CGO se relaciona aos efeitos do CGO de nucleação, formação de C-S-H, aprimoramento da zona interfacial de transição e fechamento dos poros conforme descritos nas seções anteriores.

Figura 42 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático (E_{ci}) dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

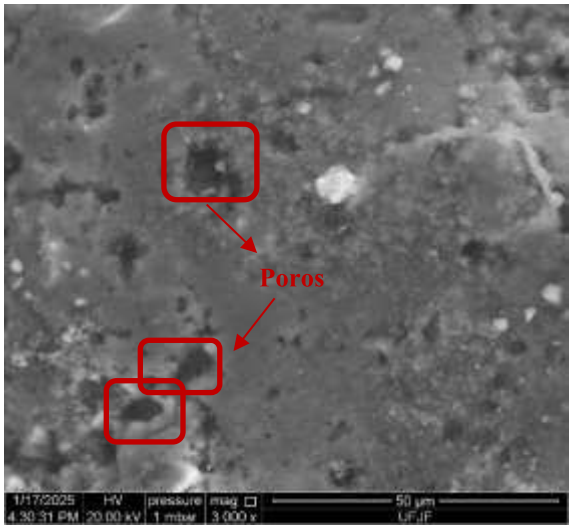
Portanto, estes resultados evidenciam que o CGO atuou aumentando o módulo de elasticidade estático, conferindo ao material uma menor capacidade de deformação. Reddy e Prasad (2023) ao incorporar 0,05% de GO em concreto de alta resistência C60, observaram que a adição do material foi capaz de aumentar o módulo de elasticidade estático em 6,13% quando comparado ao concreto referência, obtendo resultados de 37,5 GPa. Apesar da semelhança na tendência do resultado obtido pelos autores e do resultado apresentado na Figura 42 em TA, é possível observar um melhor desempenho com a adição de 0,02% de CGO, atingindo valores de módulo de elasticidade estático cerca de 31,5% superior em relação ao C-REF.

4.7 ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

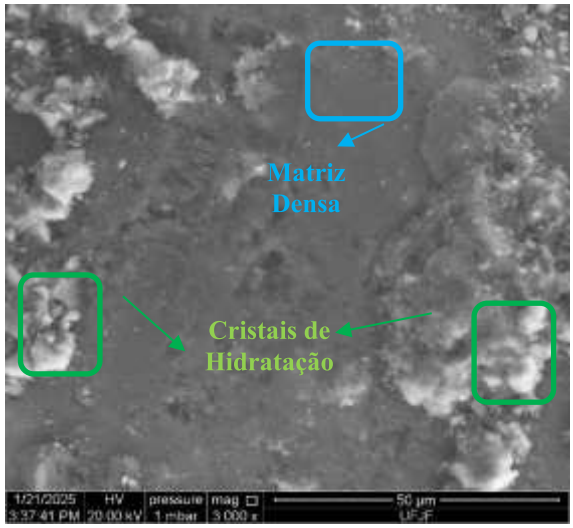
A Figura 43 apresenta as imagens do concreto C-REF e C-CGO em temperatura ambiente em diferentes ampliações. É possível observar na amostra C-REF, a presença de grandes poros e microfissuras, enquanto na amostra C-CGO nota-se que houve uma melhora significativa na microestrutura do concreto, com a formação de

produtos de hidratação maiores e mais densos, representando, portanto, que o CGO atuou fornecendo novos locais de nucleação para hidratação do cimento. Reddy e Prasad (2023) observaram comportamento semelhante na microestrutura de CADs com adição de 0,05%, 0,1% e 0,2% de GO, demonstrando desta forma que o CGO possa atuar de maneira semelhante ao GO quando adicionado em CADs em TA.

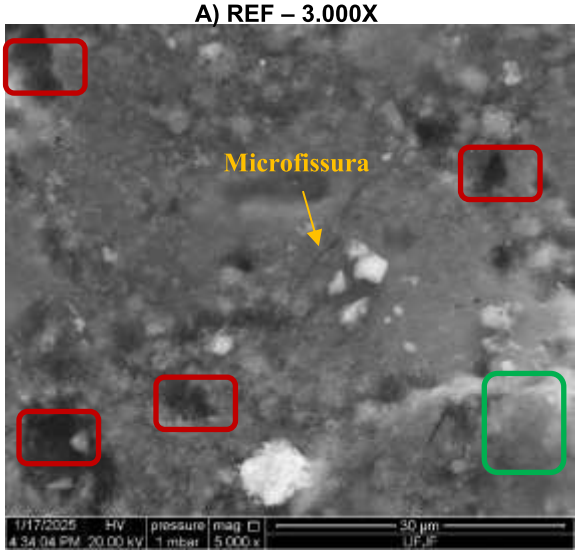
Figura 43 - MEV em TA, magnificação de 3.000x; 5.000x e 10.000x dos traços C-REF e C-CGO.



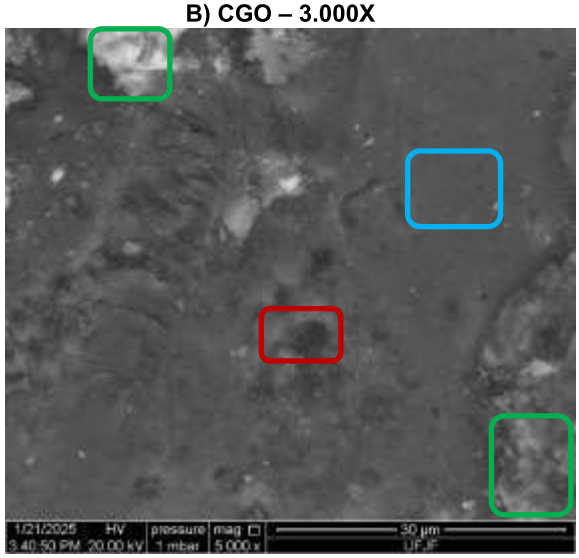
A) REF – 3.000X



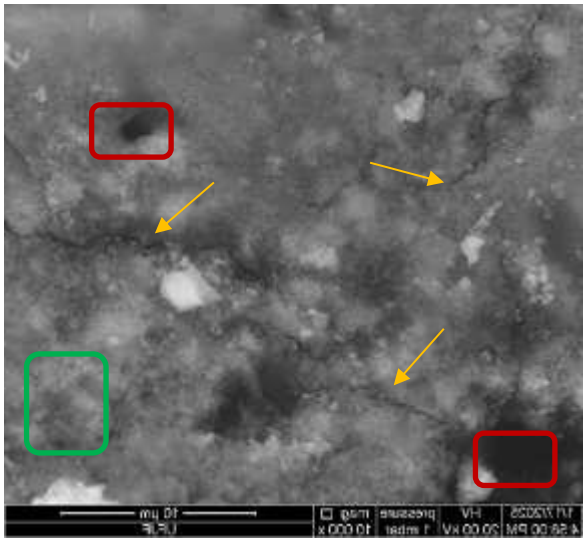
B) CGO – 3.000X



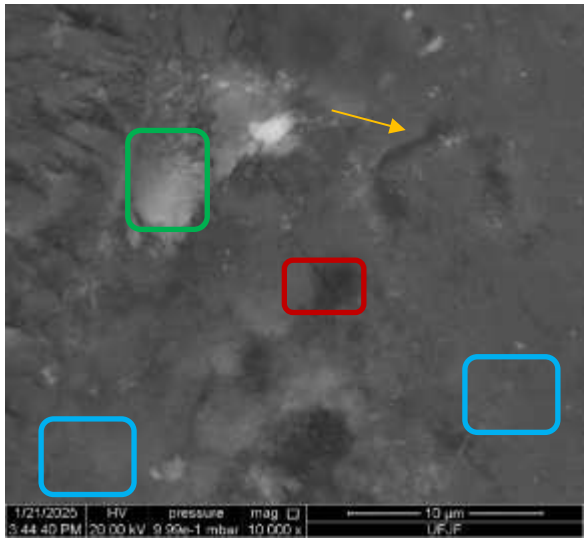
C) REF – 5.000X



D) CGO – 5.000X



E) REF –10.000X



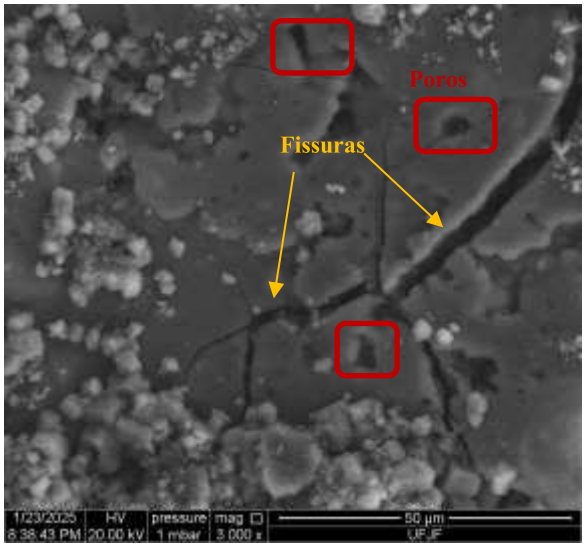
F) CGO – 10.000X

Fonte: Autora (2025).

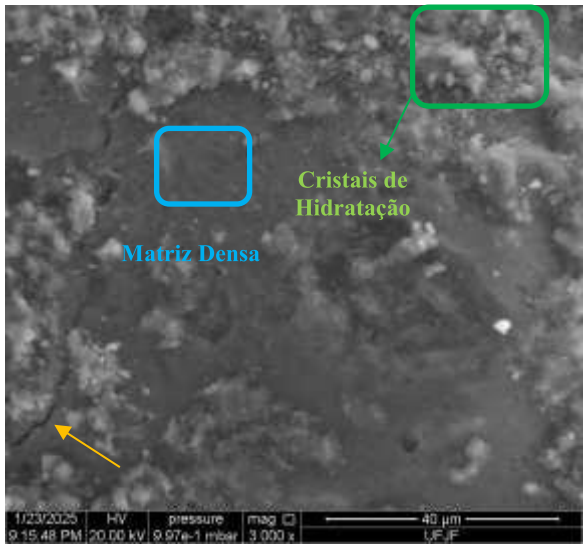
A Figura 44 apresenta as imagens do concreto C-REF e C-CGO após exposição a 300ºC. No traço C-REF é possível observar que a maior temperatura atuou na degradação do concreto ocasionando um aumento no número de poros e de fissuras internas, além da presença de partículas soltas e desordenadas. Como detalhado anteriormente, os concretos, quando expostos a aumento de temperatura, sofrem um processo de microfissuração, desidratação e decomposição de seus elementos, o que altera sua estrutura (Battagin e Silveira, 2018).

No traço com adição de 0,02% de CGO, verifica-se, de forma semelhante ao observado em TA, uma matriz mais densa com menos poros e fissuras e poucas partículas soltas e desordenadas na amostra quando comparada a amostra C-REF. Chen *et al.,* (2022) ao analisar a microestrutura de pasta de cimento com adição de GO após exposição a temperatura de 300ºC notou da mesma forma uma densificação na matriz e redução dos poros após o ataque térmico.

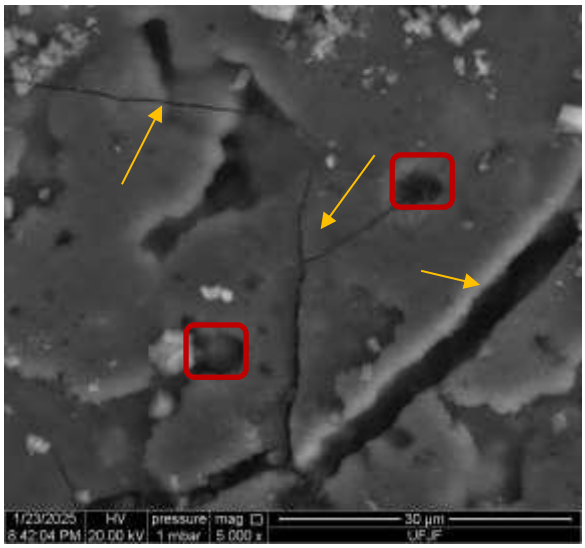
Figura 44 - MEV em 300ºC, magnificação de 3.000x; 5.000x e 10.000x dos traços C-REF e C-CGO.



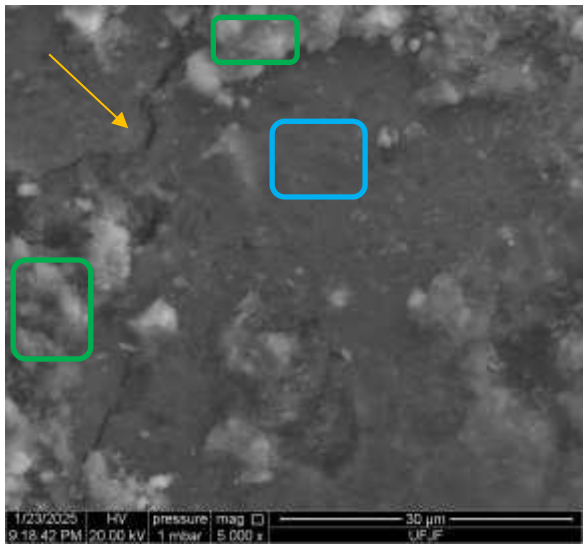
A) REF – 3.000X



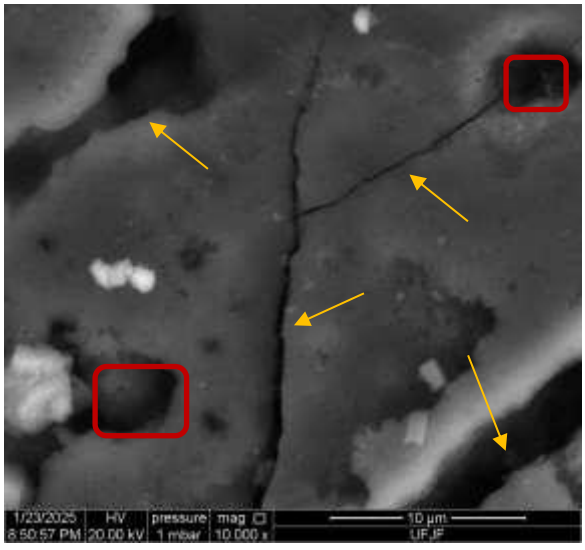
B) CGO – 3.000X



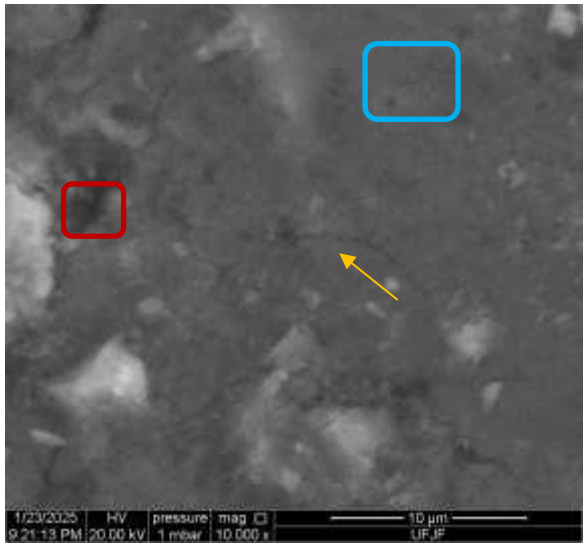
C) REF – 5.000X



D) CGO – 5.000X



E) REF – 10.000X



F) CGO – 10.000X

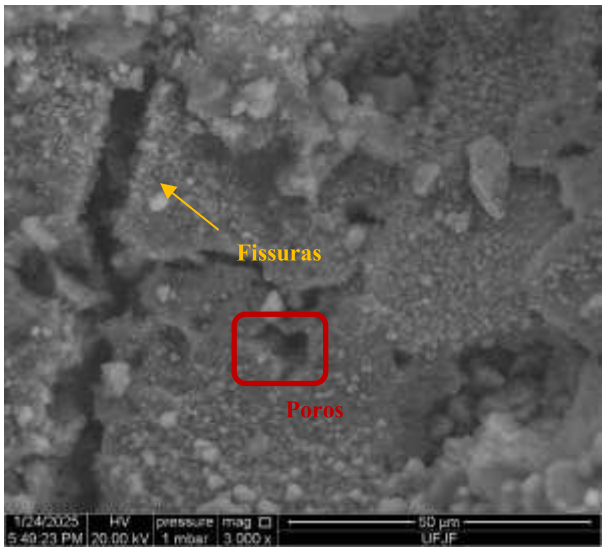
Fonte: Autora (2025).

A Figura 45 e a Figura 46 apresenta as imagens do concreto C-REF e C-CGO após exposição a 600ºC e 900ºC respectivamente. Ao analisar as imagens é possível notar na microestrutura dos traços C-REF e C-CGO em ambas temperaturas comportamento semelhante ao observado em 300ºC, porém com um notável alargamento nas microfissuras, principalmente no traço C-REF. Também se observa nas figuras uma visível degradação em ambos os traços de CAD. Após exposição a elevadas de temperatura ocorre uma expansão térmica desigual dos agregados e da pasta, o que provoca aumento significativo das fissuras, esfarelamento e desagregação do material (Battagin e Silveira, 2018) (Yu *et al.*, 2024). Yu *et al.,* (2024) observaram em imagens MEV a expansão nas fissuras internas de CADs quando submetidos a temperaturas acima de 600 ºC, devido à perda de aderência entre o agregado e a matriz, resultando no aumento da fragilidade do material.

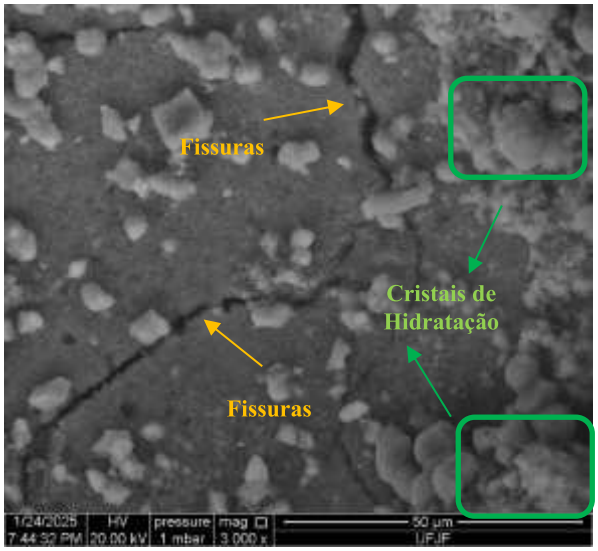
Nas amostras C-CGO é possível notar uma microestrutura mais densa, com fissuras menos espessas, menos poros e presença de cristas de hidratação mais densos, capazes de suportar melhor os danos térmicos causados pela exposição a elevadas temperaturas (Huang, *et al.*, 2024). Segundo Alateah (2023), a adição de GO em compósitos cimentícios é capaz de proporcionar uma densificação na matriz e redução na porosidade do que dificulta o desenvolvimento das microfissuras. Conforme o autor, ao ser adicionado a compósitos cimentícios, a estabilidade térmica do GO possibilita a preservação da integridade da microestrutura da matriz de cimento após o processo de aquecimento e reduz os danos causados pela exposição a altas temperaturas. Portanto, acredita-se que o CGO atue de forma semelhante quando adicionado a concretos expostos a elevadas temperaturas.

As imagens MEV do traço C-CGO à 900ºC apresenta a presença de partículas (marcação lilás) distribuídas em toda matriz do material, tais partículas podem ser resultado da decomposição de elementos do CAD após combinação com elementos do CGO, considerando que este nanomaterial adicionado a CAD em situações de elevadas temperaturas não foi antes estudado. Portanto, torna-se necessário a realização de novos estudos e ensaios para concluir ao certo quais elementos se formam na microestrutura do CAD com incorporação de CGO em temperaturas superiores a 900ºC.

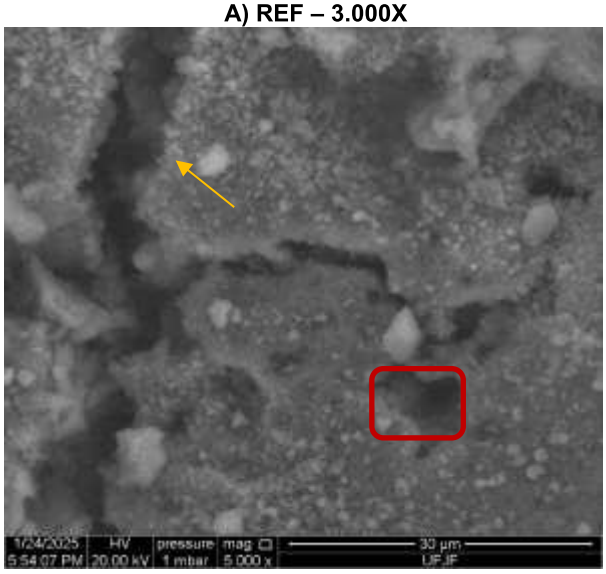
Figura 45 - MEV em 600ºC, magnificação de 3.000x; 5.000x e 10.000x dos traços C-REF e C-CGO.



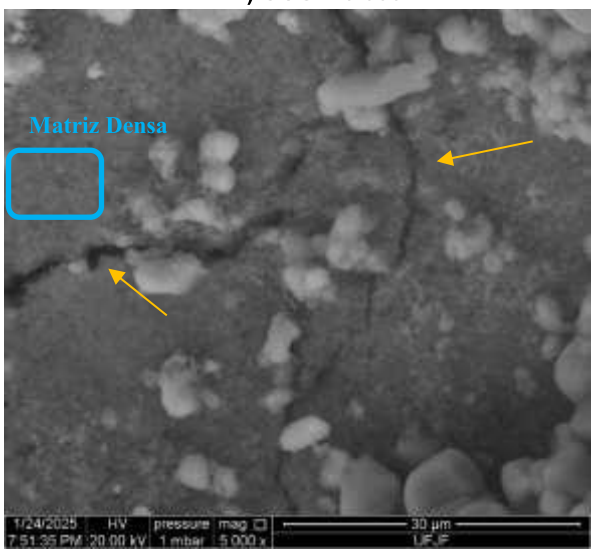
A) REF – 3.000X



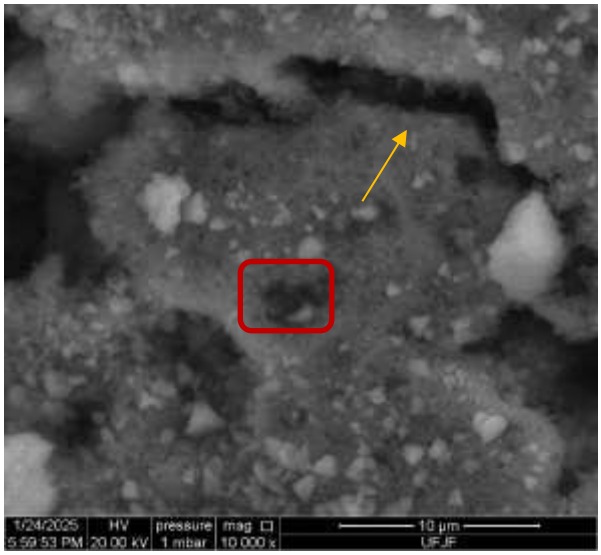
B) CGO – 3.000X



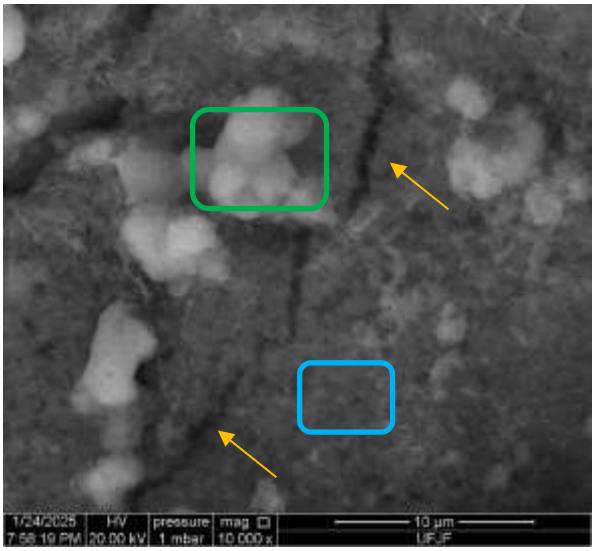
C) REF – 5.000X



D) CGO – 5.000X



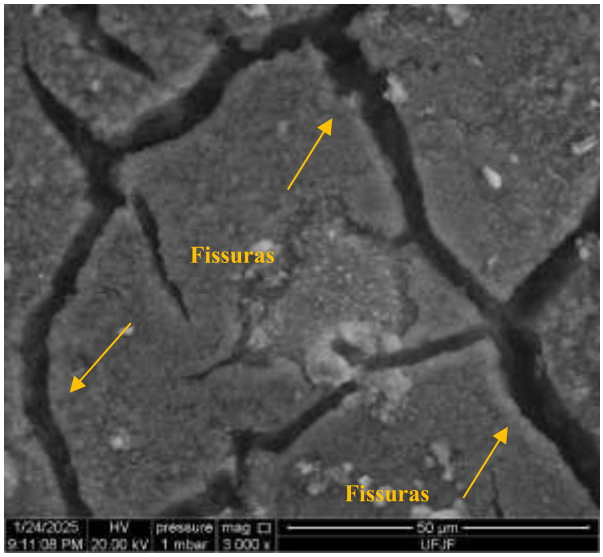
E) REF – 10.000X



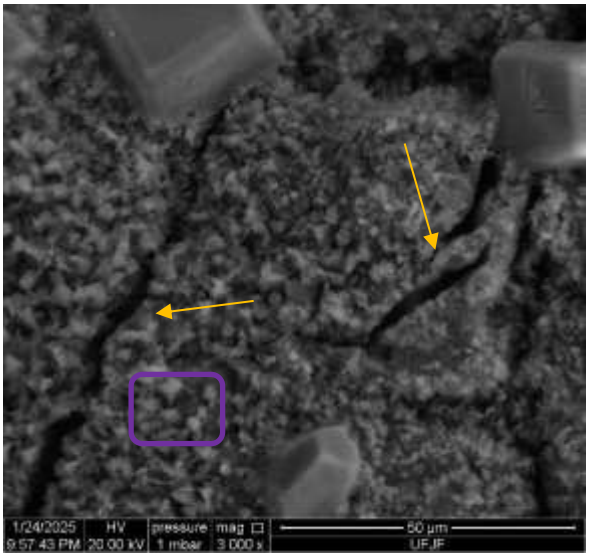
F) CGO – 10.000X

Fonte: Autora (2025).

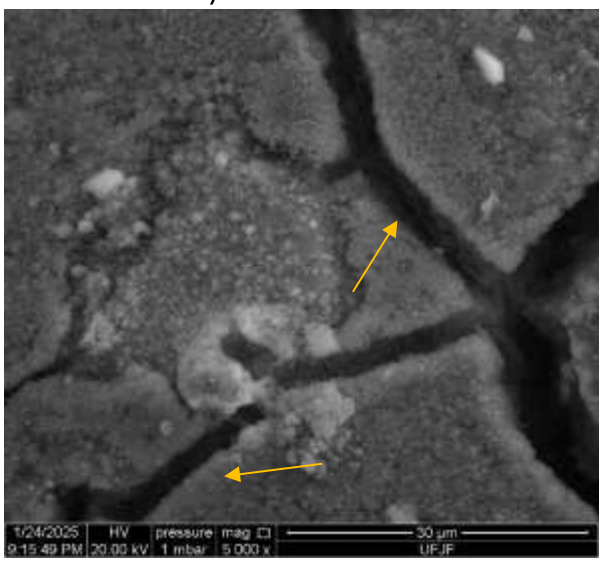
Figura 46 - MEV em 900ºC, magnificação de 3.000x; 5.000x e 10.000x dos traços C-REF e C-CGO.



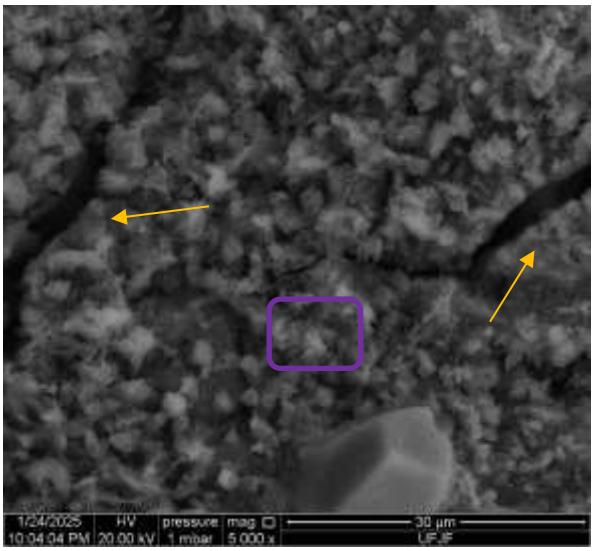
A) REF – 3.000X



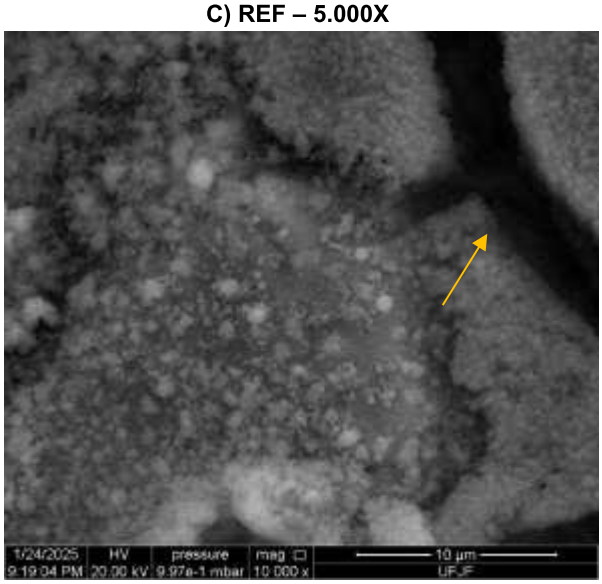
B) CGO – 3.000X



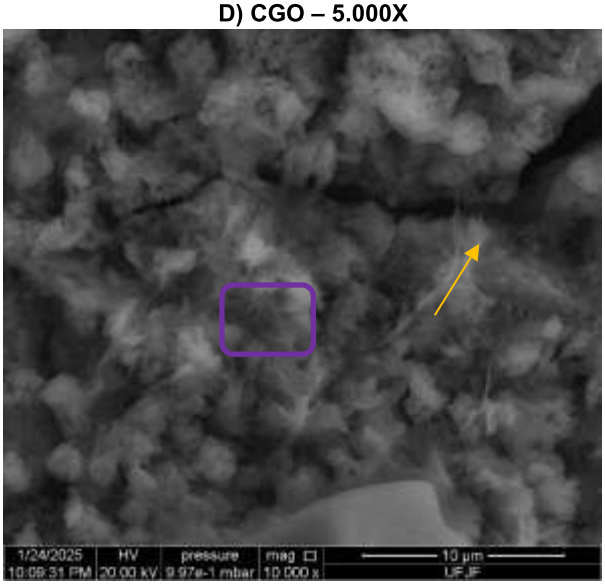
C) REF – 5.000X



D) CGO – 5.000X



E) REF – 10.000X



F) CGO – 10.000X

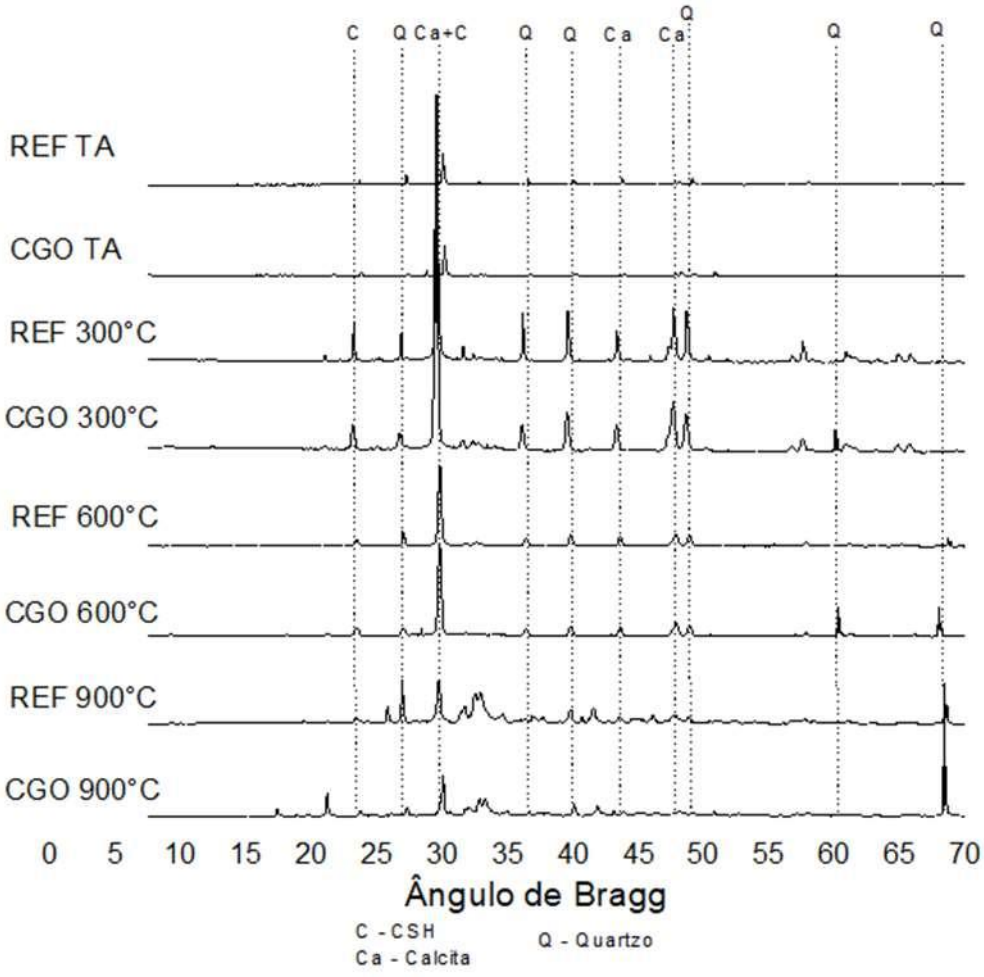
Fonte: Autora (2025).

As imagens MEV apresentadas nesta seção não permite identificar o CGO na microestrutura do CAD, tal fato pode estar relacionado à pequena dosagem de CGO adicionada, bem como ao baixo contraste entre CGO e hidratos de cimentos (Zhao *et al.*, 2020). Desta forma, é fundamental utilizar outras técnicas para investigar de maneira mais detalhada a interação entre o GO e a matriz de cimento. Ainda assim, as imagens MEV foram suficientes para confirmar o comportamento físico e mecânico observado nas seções anteriores.

4.8 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A Figura 47 apresenta os resultados do ensaio de difração de raios-x (DRX) nas amostras C-REF e C-CGO em TA e após exposição a temperaturas de 300ºC, 600ºC e 900ºC.

Figura 47 - DRX das amostras C-REF e C-CGO em TA e após exposição a 300ºC, 600ºC e 900ºC.



Fonte: Autora (2025).

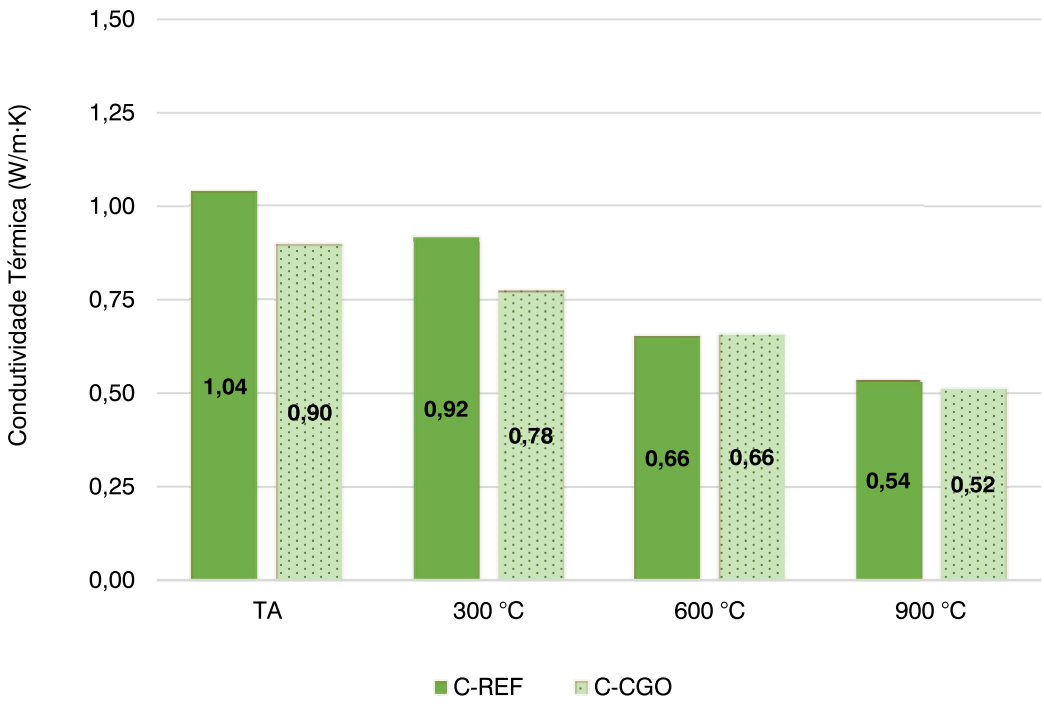
A difração de raios X, cujos resultados são apresentados na Figura 47, revelou a presença de fases cristalinas de quartzo, C-S-H e calcita. Essas fases são características do concreto devido à composição química de seus constituintes (Silva *et al.*, 2020), como o quartzo, proveniente da areia silicosa de rio (Carvalho *et al.*, 2023). Ao comparar os concretos de referência com aqueles contendo adição de CGO, não foram identificadas novas fases cristalinas resultantes da interação desse material. Esse comportamento também foi notado em relação aos concretos com adição de GO (Ren *et al.*, 2024).

A análise do comportamento das curvas em função da temperatura evidencia o processo de desintegração da calcita, que, a partir de 400°C, começa a se tornar amorfa. De maneira semelhante, o C-S-H se amorfiza progressivamente e já não é detectado nos difratogramas a partir de 600°C (Xin *et al.*, 2017). A desintegração dessas fases contribui para a redução da resistência mecânica do concreto em altas temperaturas, pois a presença de fases cristalinas estruturadas desempenha um papel fundamental na manutenção das propriedades mecânicas do compósito (Tantawy, 2017).

4.9 ENSAIO CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Os resultados dos ensaios de condutividade térmica nas amostras de C-CGO e C-REF, em TA e nas temperaturas estudados são apresentados na Figura 48. A condutividade térmica das amostras de referência e contendo CGO diminuiu à medida que se aumentou progressivamente a temperatura. Tal fato pode ser justificado devido à evaporação da água e aos poros e microfissuras formados com a degradação do material sob altas temperaturas, reduzindo a condutividade efetiva do compósito, dado que a pasta de cimento tem uma condutividade média de 0,5 W/(m·K) , a água tem uma condutividade próxima a 0,6 W/(m·K) e o ar, 0.025 W/(m·K) (Kim *et al.*, 2003).

Figura 48 - Resultados do ensaio de condutividade térmica dos corpos de prova de C-REF e C-CGO, em TA, 300ºC, 600ºC e 900ºC



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Em relação as amostras com 0,02% de CGO, verifica-se que houve uma redução nos resultados de condutividade térmica em TA (13,5%) e a 300ºC (15%) com exceção de 600ºC e 900ºC que não obteve diferença significativa. Supõe-se que a redução no resultado de condutividade térmica possa estar relacionada também a reorganização dos poros e criação de micro canais no interior do compósito que pode atuar como um meio isolante para transferência do calor pela amostra (Mohammed *et al.*, 2017) (Huang *et al.*, 2024) (Rao *et al.*, 2024).

Os autores Liu *et al.,* (2024) encontraram resultados semelhantes, com a diminuição de 19,79% da condutividade térmica com aumento da temperatura em compósitos de cimento com adição com nanoplaquetas de grafeno. Segundo os autores, essa redução se deve aos efeitos de nucleação e preenchimento de poros do nanomaterial, que diminuem os tamanhos da estrutura de poros do material cimentício, dificultando a condução de calor. Mendes *et al.,* (2019) explicam essa tendência por meio do fenômeno da propagação dos fônons (“pacotes” de energia térmica análogos

aos fótons de luz, que transportam o calor dentro de sólidos). Mesmo em compósitos com porosidade total equivalente ou similar, na matriz com poros menores, há um maior número de interfaces, o que dificulta a propagação dos fônons e aumenta sua refração e reflexão, resultando numa condutividade efetiva menor do material como um todo (Mendes *et al.*, 2019).

De forma semelhante ao realizado nesta pesquisa com CGO, Rao *et al.,* (2024) estudaram a resposta térmica do concreto com adição de GO exposto a elevadas temperaturas e situações de incêndio, obtendo resultados que corroboram com os resultados encontrados neste estudo de diminuição de condutividade térmica mesmo após exposição a elevadas temperaturas. Segundo os autores, o GO atua auxiliando na retenção de água e produtos hidratados mesmo após exposição a elevadas temperaturas que favorece um menor aumento de temperatura do concreto com GO quando comparado ao concreto de referência.

A menor condutividade térmica dos traços C-CGO possivelmente foi capaz de promover uma taxa de transferência de calor mais gradual dentro das matrizes de CGO, o que também contribui para evitar as macrofissuras decorrentes da expansão térmica e fuga acelerada da água. Portanto, a menor condutividade provavelmente contribuiu para o melhor desempenho mecânico das matrizes com adição de CGO.

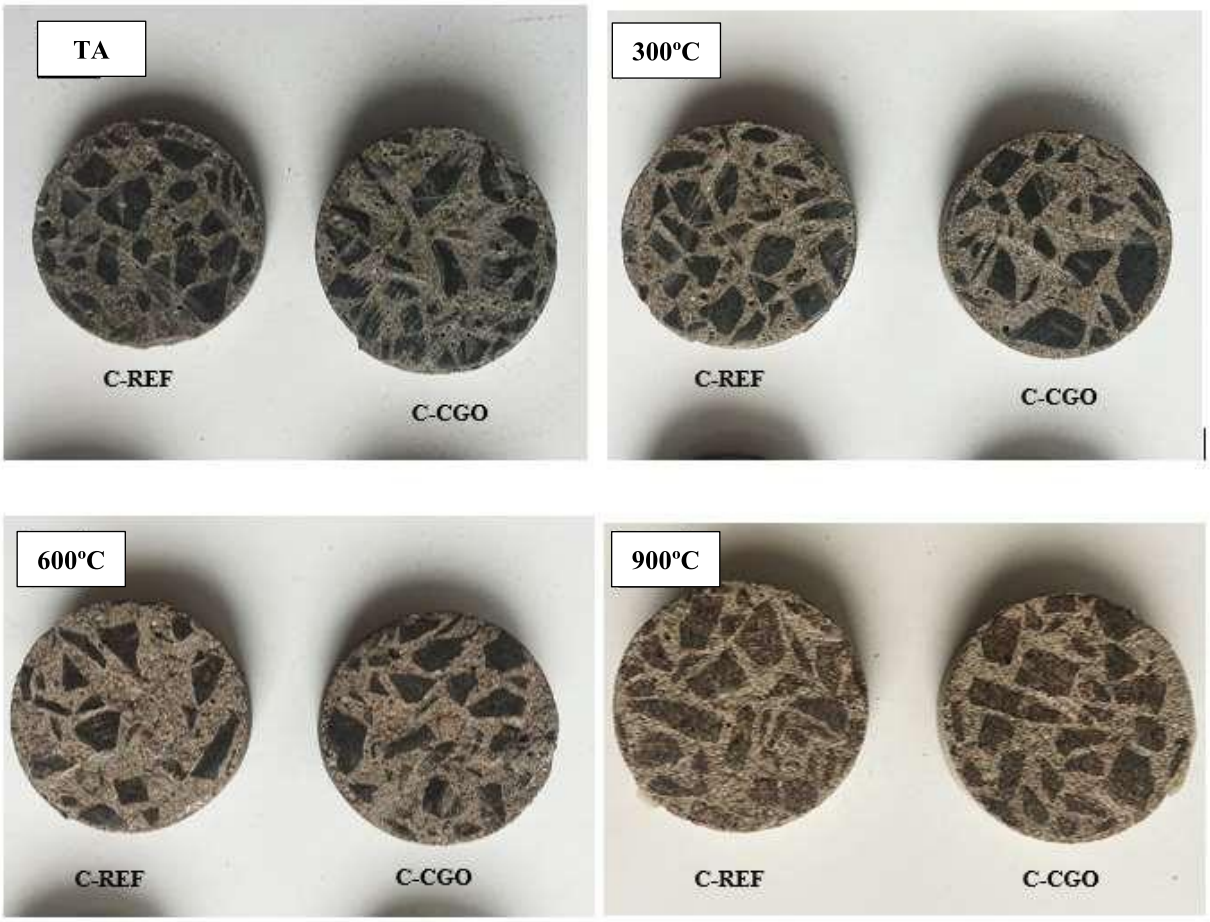
Cheng *et al.,* (2025) ao realizarem estudos sobre a adição de GO em materiais cimentícios, observaram uma redução de 1-5 °C na temperatura interna do ambiente, sugerindo o desempenho térmico do material com a adição de GO. Portanto, de forma semelhante, sugere-se que o CGO ao ser adicionado em concretos para estruturas na construção, é capaz de proporcionar também ao material um melhor desempenho térmico, com redução nas temperaturas dos ambientes, favorecendo o conforto térmico para os ocupantes.

4.10 ÁNALISE VISUAL

A Figura 49 apresenta imagens das amostras de C-REF e C-CGO em TA e após exposição a diferentes temperaturas adotadas nesta pesquisa. Em temperatura ambiente e 300ºC visualmente não foi possível observar uma diferença significativa entre os traços analisados. Quando comparada as temperaturas de 300ºC e TA observou-se que os corpos de prova de ambos os traços continuaram a apresentar uma

coloração acinzentada e sem microfissuras aparentes. Conforme exposto por Yan *et al.,* (2022) concretos quando expostos a temperaturas próximo a 200 °C, não sofrem alterações significativas em sua coloração.

Figura 49 - Amostras C-REF e C-CGO em TA e após a exposição as temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C.



Fonte: Autora (2025).

Na temperatura de 600ºC foi possível observar que os concretos C-REF e C-CGO apresentaram uma coloração acinzentada sutilmente mais clara e algumas microfissuras. Já na temperatura de 900ºC verificou-se que ambos os corpos de prova aparentaram coloração mais clara com um tom rosado, muitas microfissuras e sinais de esfarelamento, como era de se esperar. Segundo Yan *et al.,* (2022) quando concretos são submetidos a temperaturas superiores a 800°C, a coloração torna-se cinza-esbranquiçada devido à decomposição de $CaCO_3$ e o material torna-se mais quebradiço.

5 CONCLUSÃO

A presenta pesquisa teve como objetivo investigar o efeito da incorporação de um novo tipo de óxido de grafeno rico em grupos carbonila (CGO), nas propriedades termomecânicas e microestrutural do CAD após exposição a elevadas temperaturas. Para este fim, foram ensaiados dois traços de CAD: convencional (C-REF) e com CGO na concentração de 0,02% (C-CGO) em relação à massa de cimento. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e à tração, velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU), módulos de elasticidade estático e dinâmico, perda de massa, massa específica, índice de vazios, absorção de água, microscopia eletrônica de varredura (MEV), DRX e condutividade térmica nos CPs em TA e após exposição a altas temperaturas (300, 600 e 900ºC). Os principais resultados obtidos foram os seguintes:

- Os resultados de índice de vazios e absorção de água não apresentaram diferenças significativas entre os traços C-REF e C-CGO em TA e 300ºC apesar de ter ocorrido uma sútil redução nestes índices no traço C-REF. Após exposição as temperaturas de 600°C e 900ºC, os traços de C-CGO promoveram até 78% de melhoria para índice de vazios e absorção, indicando, portanto, que o CGO atua refinando os poros e reduzindo os danos térmicos na matriz após elevadas temperaturas.

- Os resultados de perda de massa apresentaram diferenças significativas entre os traços C-REF e C-CGO nas temperaturas de 300°C, 600°C e 900ºC. O traço C-CGO após exposição térmica sofreu uma menor redução de perda de massa, em média 2%, enquanto o traço C-REF sofreu cerca de 5,5% de perda de massa.

- A resistência à compressão da amostra C-CGO foi superior em 27% em comparação a resistência do traço C-REF em TA e em média 26%, após exposição térmica. Isso se deve à capacidade do CGO de atuar como ponto de nucleação para produtos de hidratação, favorecendo o crescimento de estruturas de C-S-H mais densas e resistentes, além de atuar refinando a estrutura dos poros do CAD, retardando a decomposição térmica dos produtos de hidratação. Os resultados de

resistência à tração e módulo de elasticidade estático seguiram a mesma tendência.

- Nos resultados de VPU, o concreto C-CGO obteve resultados similares ou superiores aos do concreto C-REF em TA e em todas as temperaturas, também devido ao efeito de nanopreenchimento do CGO, reduzindo os macroporos e as microfissurações da matriz mesmo após exposição a elevadas temperaturas. O módulo de elasticidade dinâmico, função da VPU, seguiu o mesmo comportamento. .

- O CGO apresentou resultados mais satisfatórios quando comparado ao GO, ao ser adicionado em concretos submetidos à elevadas temperaturas demonstrando seu potencial superior em termos de eficiência e desempenho. A predominância do grupo carbonila foi capaz de potencializar as reações de hidratação do cimento reduzindo os danos térmicos causados pelo aquecimento destacando-se como uma das principais inovações.

- As imagens da MEV confirmaram os resultados quantitativos, mostrando que os CADs com adição de CGO apresentaram uma matriz mais densa, com formação de mais cristais de hidratação e menos poros e fissuração quando comparado ao traço C-REF mesmo após estresse térmico.

- A condutividade térmica dos traços C-CGO foi 13,5% inferior à dos C-REF em TA e com o aumento da temperatura. Acredita-se que essa redução possa estar relacionada também ao refinamento dos poros promovido pelo CGO, e possivelmente pode ter promovido um efeito de retardo na taxa de aquecimento interna, atenuando a degradação do C-CGO sob altas temperaturas.

Por se tratar de um estudo inovador, esta pesquisa apresentou algumas restrições devido à baixa escala de produção de CGO. Esse fato impediu a avaliação de diferentes dosagens de CGO. Portanto, recomenda-se que futuras pesquisas investiguem as propriedades dos CADs com CGO após exposição à temperaturas elevadas, considerando diferentes dosagens e realizem uma avaliação do

comportamento desses materiais quando submetidos a aquecimentos rápidos e prolongados, aumentando a taxa de aquecimento no forno mufla.

Dada a importância do controle térmico e da durabilidade em estruturas de concreto, sugere-se que seja realizado novos estudos sobre técnicas de resfriamento bem como à aplicação de ensaios de permeabilidade no CAD com CGO. Tais investigações permitirão aprofundar o entendimento dos efeitos dessas variáveis nas propriedades físico-mecânicas do CAD com CGO, contribuindo para o aprimoramento de seu desempenho em condições reais de serviço.

Além disso, sugere-se para novas pesquisas a realização de ensaios de Raman e EDS para proporcionar uma compreensão mais aprofundada sobre o comportamento do CGO na matriz de CAD após exposição a altas temperaturas. Essas abordagens podem fornecer informações valiosas sobre o desempenho e a durabilidade dos CADs modificados com CGO em condições extremas.

Devido à inovação da presente pesquisa e à escassez de informações consolidadas na literatura, sugere-se a realização de estudos futuros que investiguem a viabilidade econômica do uso de CAD com CGO. Tais investigações se tornarão fundamentais para compreender não apenas os custos envolvidos, como também os benefícios de longo prazo relacionados à durabilidade, à redução de manutenções e ao desempenho superior desses materiais.

Apesar das limitações e lacunas ainda existentes, o presente estudo confirmou o benefício da adição do óxido de grafeno rico em grupo carbonila, o CGO, em concretos de alto desempenho especialmente quando estes forem submetidos à elevadas temperaturas.

REFERÊNCIAS

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações.** Rio de Janeiro. 2005.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. [S.l.]. 2009.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 7222: Concreto e argamassas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. [S.l.]. 2011.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro. 2015.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. [S.l.]. 2018.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. [S.l.]. 2018.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** [S.l.]. 2019.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. [S.l.]. 2021.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica.** [S.l.]. 2021.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação**. [S.l.]. 2022.

ADÉLA JIřÍčKOVÁ, O. J.; SOFER, Z.; SEDMIDUBSKý, D. Synthesis and Applications of Graphene Oxide. **Materials**, January 2022.

AKARSH, P. K. et al. Graphene oxide as nano-material in developing sustainable concrete – A brief review. **Materials Today: Proceedings**, 60, 2022.

AKHNOUKH, A. K. Accelerated bridge construction projects using high performance concrete. **Case Studies in Construction Materials**, 12, June 2020.

ALATAWNA, A. et al. The effect of compatibility and dimensionality of carbon nanofillers on cement composites. **Construction and Building Materials**, 232, 2020.

ALATEAH, A. H. Graphene concrete: Recent advances in production methods, performance properties, environmental impact and economic viability. **Case Studies in Construction Materials**, 19, 2023.

ALDRED, J. Burj Khalifa – a new high for high-performance concrete. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, 163, 2010.

ALI, A. E.; FARIED, A. S.; OSMAN, K. M. Effect of elevated temperature on properties of concrete containing different types of nano-materials. **Construction and Building Materials**, 438, August 2024.

ANWAR, A.; LIU, X.; ZHANG, L. Enhanced acid resistance of ternary blended concrete composites transformed with graphene oxide for sewer structures. **Journal of Building Engineering**, 86, June 2024.

ARCOS. Conhece o Viaduto de Millau na França? Aprenda a história da sua construção. **Arcos Engenharia de Solos**, Março 2018. Disponivel em: <https://arcos.eng.br/conhece-o-viaduto-de-millau-na-franca-aprenda-a-historia-da-sua-construcao/>.

AWADEEN, M. et al. Mechanical properties, attenuation coefficient, and microstructure of ultra high-performance heavyweight concrete for radiation shielding applications. **Journal of Building Engineering**, 82, April 2024.

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

BA, Y.; PYO, S. Ultra high performance concrete (UHPC) sleeper: Structural design and performance. **Engineering Structures**, 210, May 2020.

BATTAGIN, A. F.; SILVEIRA, A. L. Z. D. P. Estudo da microestrutura do concreto em situação de incêndio: um termômetro da temperatura alcançada. **Ibracon: Concreto & Construções**, 2018. 44-48. Disponivel em: <http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/revista89.pdf>.

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. **Diamond and Related Materials**, 143, 2024.

CARVALHO, A. R. D. et al. Influência do efeito fíler do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, Oct-Dec 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, November 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**, 3 November 2023. 133078. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133078.

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.

CBMMG. **INSTRUÇÃO TÉCNICA N. 06: SEGURANÇA ESTRUTURAL DAS EDIFICAÇÕES**. Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Minas Gerais. [S.l.]. 2022. (https://www.bombeiros.mg.gov.br/normastecnicas).

CBMMG, C. D. B. M. D. M. G. **Dados Abertos**. Corpo de Bombeiros de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2025.

CHAHAR, A. S.; PAL, P. A review on various aspects of high performance concrete. **Innovative Infrastructure Solutions**, 8, May 2023.

CHEN, Y. et al. High-temperature properties of cement paste with graphene oxide agglomerates. **Construction and Building Materials**, 320, February 2022.

CHEN, Y. et al. Static and dynamic mechanical thermoanalyses of cement paste with highly dispersed graphene oxide. **Journal of Building Engineering**, 64, 2023.

CHEN, Y.; LI, X.; DU, H. A review of high temperature properties of cement based composites: Effects of nano materials. **Materials Today Communications**, June 2023.

CHENG, Z. et al. Influence of the graphene oxide on heat conduction characteristics of cement-based honeycomb scaffolds. **Case Studies in Construction Materials**, 22, 2025.

CHRIST, R.; TUTIKIAN, B.; PACHECO, F. Estudo comparativo entreconcretos de alto desempenhoe compósitos cimentíciosavançados. **Ibracon - Revista Concreto & Construções**, n. 79, 2015. Disponivel em: <http://ibracon.org.br/site_revista/concreto_construcoes/ebook/edicao79/files/assets/basic-html/page74.html>.

CHU, H. et al. Effect of Graphene Oxide on Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete Prepared from Recycled Sand. **Nanomaterials**, 2020.

CSN CIMENTOS. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos**. Cimento Nacional. Barroso MG. 2024.

DAI, J. et al. Research on influencing factors and time-varying model of thermal conductivity of concrete at early age. **Construction and Building Materials**, 315, 2022.

DEEMER, E. M. et al. Consequence of oxidation method on graphene oxide produced with different size graphite precursors. **Materials Science and Engineering: B**, 224, October 2017. 150-157.

DEVI, S. C.; KHAN, R. A. Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete. **Journal of Building Engineering**, 27, January 2020.

DJENAOUCINE, L. et al. Effect of graphene oxide on the hydration process and macro-mechanical properties of cement. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidri**, April 2024.

FENG, M. et al. Degradation mechanism and evaluation of the carbonation resistance of concrete after high-temperature exposure. **Structures**, 58, December 2023.

FERNANDES, B. et al. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, 2017.

FONSEKA, I. et al. Influence of Graphene oxide on abrasion resistance and strength of concrete. **Construction and Building Materials**, 404, November 2023.

FONSEKA, I. et al. Influence of graphene oxide properties, superplasticiser type, and dispersion technique on mechanical performance of graphene oxide-added concrete. **Construction and Building Materials**, 428, May 2024.

G1, G. G1 Rio de Janeiro Notícias. **Jornal Eletrônico G1**, 2018. Disponivel em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2018/09/04/o-que-se-sabe-sobre-o-incendio-no-museu-nacional-no-rio.ghtml>. Acesso em: 2025.

G1, G. G1 Mundo notícias. **Jornal Eletrônico G1**, 2024. Disponivel em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2024/09/04/predio-que-pegou-fogo-em-londres-era-uma-armadilha-mortal-devido-a-decadas-de-falhas-diz-relatorio-final-de-tragedia.ghtml>. Acesso em: 2025.

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 - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Juiz de Fora. 2021.

GHORBANZADEH, M. The harmony between architectural forms and structural: Case Study: Burj Khalifa Dubai. **Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège**, January 2017.

GHOSH, S. et al. Thermoelectric figure of merit enhancement in cement composites with graphene and transition metal oxides. **Materials Today Energy**, 18, 2020.

GIL, A. et al. Estudos experimentais sobre o fenômeno de desplacamento em estruturas de concreto submetidas a elevadas temperaturas. **Ibracon: Concreto e Construções**, n. 89, 2018. Disponivel em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/revista89.pdf>.

GONG, K. et al. Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 27, 2015. 1-6.

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**, 422, April 2024.

HAN, S. et al. Graphene-oxide-reinforced cement composites mechanical and microstructural characteristics at elevated temperatures. **Nanotechnology Reviews**, 11, December 2022.

HEIKAL, M. et al. Behavior of composite cement pastes containing silica nano-particles at elevated temperature. **Construction and Building Materials**, 70, 2014. 339-350.

HORTA, R. A. D. S. et al. Avaliação do comportamento reológico de pastas de cimento com adição de óxido de grafeno. **Revista Matéria**, 26, 2021.

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

HOU, Y. et al. High-quality preparation of graphene oxide via the Hummers' method: Understanding the roles of the intercalator, oxidant, and graphite particle size. **Ceramics International**, 46, February 2020. 2392-2402.

HRABOVÁ, K.; TEPLý, B.; HÁJEK, P. Concrete, Sustainability and Limit States. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 290, June 2019.

HUANG, K. et al. Study on the properties of graphene oxide reinforced cement-based materials at high temperature. **Construction and Building Materials**, 421, March 2024.

HWANGBO, D. et al. Effect of nanomaterials (carbon nanotubes, nano-silica, graphene oxide) on bond behavior between concrete and reinforcing bars. **Case Studies in Construction Materials**, 18, 2023.

INDUKURI, C. S. R.; NERELLA, R. Enhanced transport properties of graphene oxide based cement composite material. **Journal of Building Engineering**, 37, May 2021.

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

INDUKURI, C. S. R.; NERELLA, R.; MADDURU, S. R. C. Workability, microstructure, strength properties and durability properties of graphene oxide reinforced cement paste. **Australian Journal of Civil Engineering**, 18, 2020.

ISB, I. S. B. Histórico Geral – 2012 a 2023. **Instituto Sprinkler Brasil (ISB)**. Disponivel em: <https://sprinklerbrasil.org.br/>. Acesso em: 2024.

JA, T. S.; MATHEW, M.; GEORGE, S. C. Experimental investigations on the impact of graphene-based oxides in concrete. **Materiais hoje: procedimentos**, August 2023.

JA, T. S.; MATHEW, M.; GEORGE, S. C. Experimental investigations on the impact of graphene-based oxides in concrete. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

JING, G. et al. Introducing reduced graphene oxide to enhance the thermal properties of cement composites. **Cement and Concrete Composites**, 109, 2020.

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

KIM, J. H. et al. Building with graphene oxide: effect of graphite nature and oxidation methods on the graphene assembly. **Royal Society of Chemistrry Advances**, 11, January 2021. 3645-3654.

KIM, K.-H. et al. An experimental study on thermal conductivity of concrete. **Cement and Concrete Research,** 33, 2003. 363–371.

KORAYEM, A. H. et al. Graphene oxide for surface treatment of concrete: A novel method to protect concrete. **Construction and Building Materials**, 243, May 2020.

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

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

KUMAR, P. R.; HARIKRISHNA, D. Strength and microstructural characterization of silica fume blended concrete with increased curing period. **Materials Today: Proceedings**, May 2024.

L. A. FALCÃO BAUER. **Materiais de construção**. 6. ed. [S.l.]: LTC, v. 1, 2019. 568 p.

LEE, X. J. et al. Review on graphene and its derivatives: Synthesis methods and potential industrial implementation. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 98, May 2019. 163-180.

LI, L. et al. A study of some relevant properties of concrete incorporating waste ceramic powder as a cement replacement agent. **Journal of Building Engineering**, 87, June 2024.

LI, P. et al. Understanding the role of graphene oxide nanoribbons–functionalized carbon nanotubes–graphene oxide (GNFG) complex in enhancing the fire resistance of cementitious composites. **Construction and Building Materials**, 348, September 2022.

LI, X. et al. Co-effects of graphene oxide sheets and single wall carbon nanotubes on mechanical properties of cement. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, 85, 2015. 39-43.

LI, X. et al. Improvement of mechanical properties by incorporating graphene oxide into cement mortar. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, 25, 2017. 1313-1322.

LI, Z. et al. Carbon-based functional nanomaterials: Preparation, properties and applications. **Composites Science and Technology**, 179, 2019. 10-40.

LIMA, A. H. D. **Síntese e Caracterização de Óxido de Grafeno e Aplicações em Eletrônica Orgânica.** Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2017.

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

LIU, C. et al. Research progress on individual effect of graphene oxide in cement-based materials and its synergistic effect with other nanomaterials. **Nanotechnology Reviews**, 10, September 2021.

LIU, C. et al. The effect of graphene oxide on the mechanical properties, impermeability and corrosion resistance of cement mortar containing mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, 288, 2021.

LIU, H. et al. Hybrid micromechanical modelling and experiments on temperature-dependent thermal conductivity of graphene reinforced porous cement composites. **Journal of Building Engineering**, 86, 2024.

LIU, J. et al. Study on dispersion, mechanical and microstructure properties of cement paste incorporating graphene sheets. **Construction and Building Materials**, 199, February 2019. 1-11.

LIU, S. et al. Research on the residual compressive properties of concrete with preload after sustained high temperatures. **Structures**, 65, 2024.

LIU, Y.; ZHONG, X.; MOHAMMADIAN, H. R. Role carbon nanomaterials in reinforcement of concrete and cement; A new perspective in civil engineering. **Alexandria Engineering Journal**, June, 72, 2023.

LONG, W.-J. et al. Micro-mechanical properties and multi-scaled pore structure of graphene oxide cement paste: Synergistic application of nanoindentation, X-ray computed tomography, and SEM-EDS analysis. **Construction and Building Materials**, 179, 2018. 661-674.

LONG, W.-J. et al. Performance enhancement and environmental impact of cement composites containing graphene oxide with recycled fine aggregates. **Journal of Cleaner Production**, 194, 2018. 193-202.

LU, D. et al. Nano-engineering the interfacial transition zone between recycled concrete aggregates and fresh paste with graphene oxide. **Construction and Building Materials**, 384, 2023.

LUO, T. et al. Effect of adding solid waste silica fume as a cement paste replacement on the properties of fresh and hardened concrete. **Case Studies in Construction Materials**, 16, June 2022.

LV, S. et al. Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. **Construction and Building Materials**, 49, December 2013. 121-127.

LV, S. et al. Effect of GO nanosheets on shapes of cement hydration crystals and their formation process. **Construction and Building Materials**, 64, August 2014. 231-239.

MAO, K. et al. Mechanical properties of graphene oxide modified ultra-high-performance concrete containing coarse aggregate. **Journal of Building Engineering**, 86, June 2024.

MARTINS, L. M. **Investigação do comportamento de matrizes cimentícias quando expostas a altas temperaturas**. Universidade Federal de Ouro Preto. [S.l.]. 2024.

MEFTAH, H.; ARABI, N. Effects of elevated temperatures' exposure on the properties of concrete incorporating recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, 411, January 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4ª. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

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

MENDES, J. C. **Viabilidade técnica do uso de Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio como aditivo incorporador de ar para matrizes cimentícias**. Universidade Federal de Ouro Preto. [S.l.]. 2016.

MENDES, J. C. et al. Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS-based air entraining agent. **Construction and Building Materials**, 145, 2017. 648-661.

MENDES, J. C. et al. On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, 104, 2019.

MENDES, J. C. et al. Correlation between ultrasonic pulse velocity and thermal conductivity of cement-based composites. **Journal of Nondestructive Evaluation**, 39, 2020.

MENG, T. et al. Deterioration mechanism of concrete under long-term elevated temperature in a metallurgic environment: A case study of the Baosteel company. **Case Studies in Construction Materials**, 14, 2021.

MOHAMMAD KHALED AL-BASHITI, M. Z. N. What can we learn from over 1000 tests on fire-induced spalling of concrete? A statistical investigation of critical factors and unexplored research space. **Construction and Building Materials**, 403, November 2023.

MOHAMMADI, A.; RAMEZANIANPOUR, A. M. Investigating the environmental and economic impacts of using supplementary cementitious materials (SCMs) using the life cycle approach. **Journal of Building Engineering**, 79, November 2023.

MOHAMMED, A. et al. Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties. **Construction and Building Materials**, 84, June 2015. 341-347.

MOHAMMED, A. et al. Effects of graphene oxide in enhancing the performance of concrete exposed to high-temperature. **Australian Journal of Civil Engineering**, 15, 2017. 61-71.

MOTTA, E. F. B. **Comparação da adição de nanotubos de carbono funcionalizados e não funcionalizados.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2023.

MOTTA, E. F. B. et al. Thermomechanical behavior of concretes with addition of non-functionalized and functionalized carbon nanotubes. **Journal of Building Engineering**, 96, 2024.

MUHEDIN, D. A.; IBRAHIM, R. K. Effect of waste glass powder as partial replacement of cement & sand in concrete. **Case Studies in Construction Materials**, 19, December 2023.

NADEEM, A.; MEMON, S. A.; LO, T. Y. The performance of Fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, 62, 2014. 67-76.

NALON, G. H. et al. Residual mechanical properties of mortars containing carbon nanomaterials exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, 275, March 2021.

NAMBIAR, R. A.; HARIDHARAN, M. Mechanical and durability study of high performance concrete with addition of natural fiber (jute). **Materials Today: Proceedings**, 46, 2021. 4941-4947.

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, January 2022.

NATÂNY PINHO ROSA, M. M. C. G. D. S. P. A. C. R. T. M. **Influência da incorporação de óxido de grafeno rico em carbolina nas propriedades mecânicas do concreto**. ENTAC. [S.l.]: [s.n.]. 2024.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto - 5ª Edição**. 5. ed. [S.l.]: Bookman, 2015. 912 p. ISBN ISBN 8582603665, 9788582603666.

NGUYEN, T.-D.; PHAM, D.-T.; VU, M.-N. Thermo-mechanically-induced thermal conductivity change and its effect on the behaviour of concrete. **Construction and Building Materials**, 198, 2019. 98-105.

NOBRE, A. Tudo sobre condutividade térmica dos metais (fórmula e tabela), 2025. Disponivel em: <https://acosnobre.com.br/>. Acesso em: 2025.

OLIVEIRA, C. O. E. et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Revista Matéria**, 2018.

ONAIZI, A. M. et al. Effect of nanomaterials inclusion on sustainability of cement-based concretes: A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, 306, 2021.

PATIL, S.; RAO, H. S.; GHORPADE, V. G. The influence of metakaolin, silica fume, glass fiber, and polypropylene fiber on the strength characteristics of high performance concrete. **Materials Today: Proceedings**, 80, 2023. 577-586.

PAUL, A.; JOHN, E. Study on the optimisation of cement and binder content to develop a sustainable high-performance concrete. **Materials Today: Proceedings**, December 2023.

PRASUNA, B.; RAVELLA, D. P. Durability assessment of high-performance concretes containing graphene oxide. **Materials Today: Proceedings**, 60, 2022. 526-533.

RABBANI, A.; JAMSHIDI, S.; SALEHI, S. An automated simple algorithm for realistic pore network extraction from micro-tomography images. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 123, 2014. 164-171.

RAO, P. T. et al. Role of graphene oxide infusion in concrete to elevate strength and fire performance in construction concrete. **Diamond and Related Materials**, 147, 2024.

RAO, P. T. et al. Role of graphene oxide infusion in concrete to elevate strength and fire performance in construction concrete. **Diamond and Related Materials**, 147, 2024.

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**, 63, n. A, 2023.

REMUS, R. et al. Fundamental effects of using power ultrasound to accelerate C3S hydration. **Cement and Concrete Research**, 180, June 2024.

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 concrete at high temperature. **Journal of Building Engineering**, 85, May 2024.

REN, B. et al. Impact mechanical properties and pore structure of graphene oxide concrete at high temperature. **Journal of Building Engineering**, 15 May 2024. 108593. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108593.

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.

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.

RILEM, R. I. D. L. E. E. D. M. **RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties**. Systèmes de Construction et Ouvrages. Viena. 2000.

ROCHA, V. V. et al. Theoretical review on the potential of graphene. **Revista Matéria**, 26, 2021.

SCHIAVON, J. Z. et al. Análise das propriedades mecânicas e microestruturais de concretos de alto desempenho contendo nanossílica e sílica ativa. **Revista Matéria**, 26, 2021.

SCHLOSSER, F. et al. Millau viaduct geotechnical studies and foundations. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 5, June 2013.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, 114, 2018. 2-26.

SHAMSAEI, E. et al. Graphene-based nanosheets for stronger and more durable concrete: A review. **Construction and Building Materials**, 183, 2018. 642-660.

SHARAKY, I. A. et al. The influence of silica fume, nano silica and mixing method on the strength and durability of concrete. **SN Applied Sciences**, 1, May 2019.

SHIRGIRE, A. et al. Experimental study on high performance concrete using rice husk ash. **Materials Today: Proceedings**, November 2023.

SIKA. **Ficha Técnica de Produto - Sika MasterPolyheed 130**. Sika. Osasco. 2021.

SIKA. **Ficha do Produto - Sika ViscoCrete® GL 51**. Sika. Osasco. 2024.

SILVA, L. A. et al. XRD investigation of cement pastes incorporating concrete floor polishing waste. **Cerâmica**, 2020. https://doi.org/10.1590/0366-69132020663802956.

SILVA, V. P. E. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio:** conforme ABNT NBR 15200:2012. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2016. Disponivel em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://storage.blucher.com.br/book/pdf_preview/9788521211280-amostra.pdf>.

SMITH, D. S. et al. Thermal conductivity of porous materials, 28, 2013. 2260–2272. https://doi.org/10.1557/jmr.2013.179.

SO, H.-S. Spalling Prevention of High Performance Concrete at High Temperatures. In: OZMEN, S. Y. A. H. B. **High Performance Concrete Technology and Applications**. [S.l.]: InTech, 2016.

STANKOVICH, S. et al. Graphene-based composite materials. **Nature**, 442, July 2006. 282–286.

SUPRITHA, R. M. et al. Comparative study between high performance concretes and advanced cementitious composites. **Materials Today: Proceedings**, September 2023.

TANTAWY, M. A. Effect of High Temperatures on the Microstructure of Cement Paste. **Journal of Materials Science and Chemical Engineering**, November 2017. 33-48. 10.4236/msce.2017.511004.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: _____ **Concreto:** Ciência e Tecnologia. [S.l.]: Ibracon, 2011.

VILLAR-COCIÑA, E. et al. A Comparative Study on the Pozzolanic Activity Between Bamboo Leaves Ash and Silica Fume: Kinetic Parameters. **Waste and Biomass Valorization**, 11, April 2020.

VISEDO, G.; PECCHIO, M.; BATTAGIN, A. F. Bases para o lançamento do Mapeamento Tecnológico do Cimento – Brasil 2050. **Ibracon: Concreto e Construções**, n. 95, Jul – Set 2019. 26-31. Disponivel em: <www.ibracon.org.br>.

WALUNJKAR, P. M.; BAJAD, M. N. Review on effect of graphene oxide reinforcement on properties of cement concrete. **Materials Today: Proceedings**, September 2023.

WANG, Y.-S.; ZHOU, H.; WU, J.-Y. Hybrid fire collapse simulation of reinforced concrete structures under localized fires. **Engineering Structures**, 292, October 2023.

XIN, H. et al. Temperature Effects on Tensile and Compressive Mechanical Behaviors of C-S-H Structure via Atomic Simulation. **Journal of Nanomaterials**, 29 November 2017. https://doi.org/10.1155/2017/8476258.

YAN, J. et al. High Temperature Exposure Assessment of Graphene Oxide Reinforced Cement. **Front. Mater**, 9, March 2022.

YAN, X. et al. Study of optimizing graphene oxide dispersion and properties of the resulting cement mortars. **Construction and Building Materials**, 257, 2020.

YANG, Y. et al. Effect of temperature on interface debonding behavior of graphene/graphene-oxide on cement-based composites. **Surfaces and Interfaces**, 47, April 2024.

YAO, Y.; LU, H. Mechanical properties and failure mechanism of carbon nanotube concrete at high temperatures. **Construction and Building Materials**, 297, August 2021.

YEKE, L.; YU, Z. Effect of graphene oxide on mechanical properties of UHPC and analysis of micro-control mechanism. **Materials Research Express**, 8, 2021.

YU, L.; BAI, S.; GUAN, X. Effect of graphene oxide on microstructure and micromechanical property of ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, 138, April 2023.

YU, Z. et al. Research on uniaxial mechanical performance of high-performance concrete after high temperature rapid cooling and damage mechanism analysis. **Journal of Building Engineering**, 86, 2024.

YU, Z. et al. Study on the fracture mechanical properties of high performance concrete (HPC) with rapid cooling after high temperature. **Construction and Building Materials**, 422, April 2024.

ZENG, H. et al. Recent progress on graphene oxide for next-generation concrete: Characterizations, applications and challenges. **Journal of Building Engineering**, 69, June 2023.

ZENG, H. et al. Recent progress on graphene oxide for next-generation concrete: Characterizations, applications and challenges. **Journal of Building Engineering**, 69, June 2023.

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

ZHANG, Y. et al. An improved micromechanical model for the thermal conductivity of multi-scale fiber reinforced ultra-high performance concrete under high temperatures. **Materials & Design**, 236, 2023.

ZHAO, L. et al. An intensive review on the role of graphene oxide in cement-based materials. **Construction and Building Materials**, 241, 2020.

ZHENG, Q. et al. Graphene-engineered cementitious composites: Small makes a big impact. **Nanomaterials and Nanotechnology**, 2017.

APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE CADA CORPO DE PROVA

Tabela 8 - Resultados de índice de vazios (%) de cada corpo de prova.

Índice de Vazios (%) - TA	
C-REF	C-CGO
~~1,39~~	1,20
1,14	1,16
1,20	1,19
1,24	1,06
~~1,05~~	~~1,02~~
~~1,32~~	1,16
1,12	~~1,01~~
1,18	1,15
1,14	~~1,34~~
Índice de Vazios (%) – 300ºC	
C-REF	C-CGO
~~1,96~~	1,13
0,98	~~1,19~~
1,30	~~1,01~~
1,43	1,09
1,30	~~1,00~~
1,07	1,07
~~0,75~~	1,05
Índice de Vazios (%) – 600ºC	
C-REF	C-CGO
15,39	3,77
17,65	3,68
16,93	3,63
~~11,59~~	3,95
~~11,84~~	~~3,30~~
~~13,07~~	3,55
Índice de Vazios (%) – 900ºC	
C-REF	C-CGO
17,16	~~10,55~~
~~18,04~~	7,95
16,76	6,74
16,83	6,47
16,98	6,95
~~16,24~~	6,93
16,43	7,61

Tabela 9 - Resultados de massa específica real (g/cm³) de cada corpo de prova.

Massa específica real (g/cm³) - TA	
C-REF	C-CGO
2,52	2,39
2,51	2,41
2,54	2,40
2,57	~~2,42~~
~~2,62~~	2,39
2,55	~~2,37~~
2,58	2,40
~~2,49~~	2,38
2,50	2,41
Massa específica real (g/cm³) – 300ºC	
C-REF	C-CGO
2,40	~~2,36~~
~~2,43~~	2,38
2,41	2,41
2,40	2,41
~~2,39~~	~~2,42~~
2,41	2,40
2,42	2,39
Massa específica real (g/cm³) – 600ºC	
C-REF	C-CGO
2,19	2,37
~~2,08~~	2,37
2,16	2,36
2,24	2,37
~~2,29~~	2,37
~~2,32~~	2,37
2,22	~~2,39~~
Massa específica real (g/cm³) – 900ºC	
C-REF	C-CGO
2,25	~~2,26~~
~~2,21~~	2,30
2,26	2,31
2,25	2,31
2,24	2,30
2,26	2,31
2,26	2,29

Tabela 10 - Resultados de absorção de água (%) de cada corpo de prova.

Absorção de água (%) - TA	
C-REF	C-CGO
~~0,55~~	0,50
0,46	0,48
0,47	0,50
0,48	0,44
~~0,40~~	~~0,43~~
~~0,52~~	0,49
0,43	~~0,42~~
~~0,48~~	0,48
0,45	~~0,56~~
Absorção de água (%) – 300ºC	
C-REF	C-CGO
~~0,82~~	0,48
0,40	~~0,50~~
0,54	~~0,42~~
0,60	0,45
0,54	~~0,41~~
0,44	0,45
~~0,31~~	0,44
Absorção de água (%) – 600ºC	
C-REF	C-CGO
7,03	1,59
~~9,93~~	~~1,77~~
8,16	1,56
7,56	1,53
~~5,06~~	1,67
~~5,11~~	1~~,39~~
~~5,89~~	1,48
Absorção de água (%) – 900ºC	
C-REF	C-CGO
7,63	~~4,67~~
~~8,16~~	3,46
7,41	2,92
7,47	2,80
7,57	3,02
~~7,19~~	3,00
7,28	3,32

Tabela 11 - Resultados de VPU (m/s) de cada corpo de prova.

VPU (m/s) - TA	
C-REF	C-CGO
~~4237~~	4587
4329	4405
~~4425~~	~~4292~~
4329	4405
4310	~~4310~~
~~4237~~	4587
~~4425~~	~~4808~~
4255	4505
~~4425~~	4505
VPU (m/s) – 300ºC	
C-REF	C-CGO
3984	~~4000~~
~~3922~~	~~3984~~
4082	4082
4065	4219
~~4219~~	4237
4065	~~4019~~
4065	4219
VPU (m/s) – 600ºC	
C-REF	C-CGO
3846	4082
~~3984~~	~~4329~~
3774	4149
3846	4065
~~3704~~	~~3906~~
3861	3968
3846	4049
VPU (m/s) – 900ºC	
C-REF	C-CGO
~~2066~~	~~3115~~
~~1984~~	2415
2008	2410
2028	~~2849~~
2049	2740
2049	2674
2045	~~3067~~

Tabela 12 - Resultados de perda de massa (%) de cada corpo de prova.

Perda de massa (%) – 300ºC	
C-REF	C-CGO
~~1,57~~	~~0,67~~
1,09	~~0,56~~
~~0,94~~	~~0,36~~
1,14	0,51
1,16	0,49
1,08	0,49
1,12	0,43
Perda de massa (%) – 600ºC	
C-REF	C-CGO
7,00	1,77
7,61	~~1,64~~
~~8,18~~	1,75
7,86	1,7
7,27	~~1,88~~
7,26	~~1,84~~
6,77	1,68
Perda de massa (%) – 900ºC	
C-REF	C-CGO
~~6,95~~	~~5,29~~
~~7,68~~	4,05
~~7,02~~	3,62
7,43	3,49
7,48	3,63
7,64	3,57
7,48	3,97
~~6,95~~	~~5,29~~

Tabela 13 - Resultados de módulo de elasticidade dinâmico (GPa) de cada corpo de prova.

Ed (GPa) - TA	
C-REF	C-CGO
~~40,69~~	45,17
42,27	42,14
44,70	~~39,84~~
43,42	42,34
43,82	~~40,03~~
~~41,19~~	44,92
~~45,43~~	~~49,87~~
~~40,52~~	43,55
44,07	44,00
Ed (GPa) – 300ºC	
C-REF	C-CGO
~~34,34~~	~~34,05~~
~~33,70~~	~~34,03~~
36,19	36,12
35,76	~~38,57~~
~~38,30~~	~~39,15~~
35,85	34,88
35,96	38,25
Ed (GPa) – 600ºC	
C-REF	C-CGO
29,14	35,51
29,66	~~39,98~~
~~27,73~~	36,54
29,80	35,23
~~28,29~~	~~32,51~~
~~31,07~~	33,64
29,52	35,32
Ed (GPa) – 900ºC	
C-REF	C-CGO
~~8,64~~	~~19,73~~
~~7,83~~	~~12,05~~
8,21	~~12,06~~
8,33	16,86
8,48	15,52
8,53	14,85
8,50	~~19,42~~

Tabela 14 - Resultados de módulo de elasticidade estático (GPa) de cada corpo de prova.

Eci (GPa) - TA	
C-REF	C-CGO
47,01	61,22
47,63	63,77
48,26	62,90
Eci (GPa) – 300ºC	
C-REF	C-CGO
43,05	54,00
42,78	54,39
44,47	55,61
Eci (GPa) – 600ºC	
C-REF	C-CGO
19,58	34,36
20,54	36,64
21,78	36,24
Eci (GPa) – 900ºC	
C-REF	C-CGO
8,04	14,10
8,87	15,41
9,01	17,77

Tabela 15 - Resultados de resistência à compressão (MPa) de cada corpo de prova.

Resistência à compressão (MPa) - TA	
C-REF	C-CGO
58,72	72,32
61,93	80,77
Resistência à compressão (MPa) – 300ºC	
C-REF	C-CGO
55,16	62,06
57,50	62,17
Resistência à compressão (MPa) – 600ºC	
C-REF	C-CGO
36,72	40,44
29,34	42,27
Resistência à compressão (MPa) – 900ºC	
C-REF	C-CGO
21,12	29,49
14,92	21,75

Tabela 16 - Resultados de resistência à tração (MPa) de cada corpo de prova.

Resistência à tração (MPa) - TA	
C-REF	C-CGO
9,79	11,24
9,37	11,09
Resistência à tração (MPa) – 300ºC	
C-REF	C-CGO
8,98	10,11
9,04	10,33
Resistência à tração (MPa) – 600ºC	
C-REF	C-CGO
4,99	5,72
5,17	6,14
Resistência à tração (MPa) – 900ºC	
C-REF	C-CGO
1,74	1,63
1,48	1,88

APÊNDICE B – ANÁLISES ESTATISTÍCAS

Figura 50 – Índice de Vazios - TA

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
ÍNDICE DE VAZIOS - TA	1.23	1	16.0	0.283

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
ÍNDICE DE VAZIOS - TA	REF	9	1.20	0.105	0.0351
	CGO	9	1.14	0.103	0.0343

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
ÍNDICE DE VAZIOS - TA	0.947	0.383

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
ÍNDICE DE VAZIOS - TA	0.0197	1	16	0.890

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – ÍNDICE DE VAZIOS - TA

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	0.0544
	p-value	—	0.283
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 51 - Índice de Vazios – 300ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
ÍNDICE DE VAZIOS - 300°C	1.45	1	6.36	0.271

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
ÍNDICE DE VAZIOS - 300°C	REF	7	1.26	0.3866	0.1461
	CGO	7	1.08	0.0670	0.0253

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
ÍNDICE DE VAZIOS - 300°C	0.879	0.056

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
ÍNDICE DE VAZIOS - 300°C	5.75	1	12	0.034

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	0.179
	p-value	—	0.271
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 52 - Índice de Vazios – 600ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
ÍNDICE DE VAZIOS - 600°C	83.0	1	6.09	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
ÍNDICE DE VAZIOS - 600°C	REF	7	15.30	3.349	1.266
	CGO	7	3.72	0.286	0.108

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
ÍNDICE DE VAZIOS - 600°C	0.909	0.151

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
ÍNDICE DE VAZIOS - 600°C	15.1	1	12	0.002

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	11.6
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 53 - Índice de Vazios – 900ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
ÍNDICE DE VAZIOS - 900°C	265	1	8.04	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
ÍNDICE DE VAZIOS - 900°C	REF	7	16.92	0.585	0.221
	CGO	7	7.60	1.397	0.528

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
ÍNDICE DE VAZIOS - 900°C	0.812	0.007

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
ÍNDICE DE VAZIOS - 900°C	1.93	1	12	0.190

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – ÍNDICE DE VAZIOS - 900°C

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	9.32
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 54 – Massa específica real - TA

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - TA	90.6	1	10.3	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MASSA ESPECÍFICA REAL - TA	REF	9	2.54	0.0424	0.01412
	CGO	9	2.40	0.0164	0.00547

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - TA	0.972	0.827

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - TA	6.37	1	16	0.023

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	0.144
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 55 - Massa específica real – 300ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - 300°C	2.63	1	10.7	0.134

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MASSA ESPECÍFICA REAL - 300°C	REF	7	2.41	0.0134	0.00507
	CGO	7	2.40	0.0194	0.00732

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - 300°C	0.986	0.996

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - 300°C	1.31	1	12	0.275

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – MASSA ESPECÍFICA REAL - 300°C

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	0.0144
	p-value	—	0.131
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 56 - Massa específica real – 600ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - 600°C	26.2	1	6.15	0.002

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MASSA ESPECÍFICA REAL - 600°C	REF	7	2.21	0.08080	0.03054
	CGO	7	2.37	0.00900	0.00340

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - 600°C	0.889	0.078

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - 600°C	9.54	1	12	0.009

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−0.157
	p-value	—	0.002
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 57 – Massa específica real – 900ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - 900°C	27.0	1	12.0	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MASSA ESPECÍFICA REAL - 900°C	REF	7	2.25	0.0180	0.00680
	CGO	7	2.30	0.0180	0.00680

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - 900°C	0.732	< .001

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MASSA ESPECÍFICA REAL - 900°C	3.51e−31	1	12	1.000

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – MASSA ESPECÍFICA REAL - 900°C

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−0.0500
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 58 – Absorção de água – TA.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - TA	0.103	1	16.0	0.752

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
ABSORÇÃO DE ÁGUA - TA	REF	9	0.471	0.0448	0.0149
	CGO	9	0.478	0.0432	0.0144

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - TA	0.959	0.588

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - TA	0.00140	1	16	0.971

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – ABSORÇÃO DE ÁGUA - TA

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−0.00667
	p-value	—	0.752
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 59 – Absorção de água – 300ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 300°C	1.27	1	6.44	0.299

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 300°C	REF	7	0.521	0.1644	0.0621
	CGO	7	0.450	0.0316	0.0120

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 300°C	0.892	0.086

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 300°C	5.77	1	12	0.033

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	0.0714
	p-value	—	0.299
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 60 – Absorção de água 600ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 600°C	64.6	1	6.06	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 600°C	REF	7	6.96	1.770	0.6691
	CGO	7	1.57	0.124	0.0470

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 600°C	0.881	0.060

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 600°C	12.6	1	12	0.004

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	5.39
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 61 – Absorção de água 900ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 900°C	243	1	8.78	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 900°C	REF	7	7.53	0.317	0.120
	CGO	7	3.31	0.641	0.242

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 900°C	0.810	0.007

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
ABSORÇÃO DE ÁGUA - 900°C	1.32	1	12	0.273

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – ABSORÇÃO DE ÁGUA - 900°C

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	4.22
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 62 – Perda de massa – 300ºC.

ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	χ^2	gl	p
PERDA DE MASSA - 300°C	9.82	1	0.002

Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

Comparações múltiplas - PERDA DE MASSA - 300°C

		W	p
REF	CGO	−4.43	0.002

Figura 63 – Perda de massa – 600ºC.

ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	χ^2	gl	p
PERDA DE MASSA - 600°C	9.80	1	0.002

Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

Comparações múltiplas - PERDA DE MASSA - 600°C

		W	p
REF	CGO	−4.43	0.002

Figura 64 – Perda de massa – 900ºC.

ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	χ^2	gl	p
PERDA DE MASSA - 900°C	9.82	1	0.002

Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

Comparações múltiplas - PERDA DE MASSA - 900°C

		W	p
REF	CGO	−4.43	0.002

Figura 65 – Velocidade de pulso ultrassônico – TA.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
VPU - TA	7.10	1	11.7	0.021

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
VPU - TA	REF	9	4330	79.4	26.5
	CGO	9	4489	160.6	53.5

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
VPU - TA	0.928	0.182

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
VPU - TA	2.73	1	16	0.118

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – VPU - TA

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	-159
	p-value	—	0.017
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 66 – Velocidade de pulso ultrassônico – 300ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
VPU - 300°C	0.861	1	11.5	0.372

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
VPU - 300°C	REF	7	4057	91.8	34.7
	CGO	7	4109	113.2	42.8

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
VPU - 300°C	0.930	0.307

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
VPU - 300°C	2.06	1	12	0.177

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – VPU - 300°C

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−51.1
	p-value	—	0.372
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 67 - Velocidade de pulso ultrassônico – 600ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
VPU - 600°C	15.8	1	10.1	0.003

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
VPU - 600°C	REF	7	3837	85.7	32.4
	CGO	7	4078	135.9	51.4

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
VPU - 600°C	0.941	0.426

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
VPU - 600°C	0.783	1	12	0.393

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – VPU - 600°C

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	-241
	p-value	—	0.002
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 68 - Velocidade de pulso ultrassônico – 900ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
VPU - 900°C	45.2	1	6.12	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
VPU - 900°C	CGO	7	2753	282.0	106.6
	REF	7	2033	28.3	10.7

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
VPU - 900°C	0.882	0.062

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
VPU - 900°C	12.0	1	12	0.005

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		CGO	REF
CGO	Diferença média	—	720
	p-value	—	< .001
REF	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 69 – Módulo de elasticidade dinâmico – TA.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - TA	0.293	1	13.0	0.597

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - TA	REF	9	42.9	1.80	0.601
	CGO	9	43.5	3.05	1.016

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - TA	0.948	0.400

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - TA	0.814	1	16	0.380

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - TA

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	-0.639
	p-value	—	0.596
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 70 - Módulo de elasticidade dinâmico – 300ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 300°C	0.498	1	10.4	0.496

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 300°C	REF	7	35.7	1.47	0.555
	CGO	7	36.4	2.21	0.834

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 300°C	0.922	0.239

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 300°C	3.57	1	12	0.083

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 300°C

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	-0.707
	p-value	—	0.494
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 71 - Módulo de elasticidade dinâmico – 600ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 600ºC	39.9	1	8.41	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 600ºC	REF	7	29.3	1.09	0.410
	CGO	7	35.5	2.37	0.895

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 600ºC	0.931	0.312

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 600ºC	1.26	1	12	0.283

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 600ºC

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	-6.22
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 72 - Módulo de elasticidade dinâmico – 900ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 900°C	39.1	1	6.09	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 900°C	REF	7	8.36	0.273	0.103
	CGO	7	15.78	3.128	1.182

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 900°C	0.875	0.049

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - 900°C	13.5	1	12	0.003

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−7.42
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 73 - Módulo de elasticidade estático – TA.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - TA	326	1	2.88	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - TA	REF	3	47.6	0.625	0.361
	CGO	3	62.6	1.296	0.748

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - TA	0.980	0.951

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - TA	1.69	1	4	0.263

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - TA

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−15.0
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 74 - Módulo de elasticidade estático – 300ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 300°C	247	1	3.98	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 300°C	REF	3	43.4	0.908	0.524
	CGO	3	54.7	0.840	0.485

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 300°C	0.788	0.046

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 300°C	0.0528	1	4	0.830

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 300°C

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−11.2
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 75 - Módulo de elasticidade estático – 600ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 600°C	254	1	3.96	< .001

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 600°C	REF	3	20.6	1.10	0.637
	CGO	3	35.7	1.22	0.703

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 600°C	0.919	0.488

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 600°C	0.142	1	4	0.725

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 600°C

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−15.1
	p-value	—	< .001
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 76 - Módulo de elasticidade estático – 900ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 900°C	40.7	1	2.32	0.016

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 900°C	REF	3	8.64	0.524	0.303
	CGO	3	15.76	1.860	1.074

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 900°C	0.964	0.850

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 900°C	3.31	1	4	0.143

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-Hoc de Tukey – MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO - 900°C

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−7.12
	p-value	—	0.003
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 77 – Resistência à compressão axial – TA.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - TA	12.9	1	1.28	0.128

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - TA	REF	2	60.3	2.27	1.61
	CGO	2	76.5	5.98	4.23

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - TA	0.984	0.927

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - TA	1.06e+29	1	2	< .001

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−16.2
	p-value	—	NaN
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 78 - Resistência à compressão axial – 300ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 300°C	24.4	1	1.00	0.126

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 300°C	REF	2	56.3	1.6546	1.1700
	CGO	2	62.1	0.0778	0.0550

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 300°C	0.964	0.805

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 300°C	2.52e+31	1	2	< .001

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−5.79
	p-value	—	NaN
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 79 - Resistência à compressão axial – 600ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 600°C	4.80	1	1.12	0.251

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 600°C	REF	2	33.0	5.22	3.690
	CGO	2	41.4	1.29	0.915

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 600°C	1.000	1.000

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 600°C	4.39e+29	1	2	< .001

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−8.33
	p-value	—	NaN
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 80 - Resistência à compressão axial – 900ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 900ºC	2.35	1	1.91	0.271

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 900ºC	REF	2	18.0	4.38	3.10
	CGO	2	25.6	5.47	3.87

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 900ºC	0.820	0.144

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 900ºC	1.50e+29	1	2	< .001

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−7.60
	p-value	—	NaN
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 81 - Resistência à tração – TA.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - TA	50.5	1	1.25	0.058

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - TA	REF	2	9.58	0.297	0.2100
	CGO	2	11.16	0.106	0.0750

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - TA	0.989	0.952

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - TA	1.17e+28	1	2	< .001

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−1.59
	p-value	—	NaN
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 82 - Resistência à tração – 300ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 300°C	113	1	1.15	0.044

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 300°C	REF	2	9.01	0.0424	0.0300
	CGO	2	10.22	0.1556	0.1100

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 300°C	0.999	0.998

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 300°C	8.11e+27	1	2	< .001

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−1.21
	p-value	—	NaN
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 83 - Resistência à tração – 600ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 600°C	13.8	1	1.36	0.114

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 600°C	REF	2	5.08	0.127	0.0900
	CGO	2	5.93	0.297	0.2100

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 600°C	0.972	0.855

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 600°C	7.48e+31	1	2	< .001

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−0.850
	p-value	—	NaN
CGO	Diferença média		—
	p-value		—

Figura 84 - Resistência à tração – 900ºC.

ANOVA a um fator

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 900°C	0.646	1	2.00	0.506

Descritivas de Grupo

	TRAÇO	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 900°C	REF	2	1.61	0.184	0.130
	CGO	2	1.75	0.177	0.125

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 900°C	0.746	0.035

Nota. Um p-value pequeno sugere a violação do pressuposto da normalidade

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
RESITÊNCIA À TRAÇÃO - 900°C	1.76e+27	1	2	< .001

[3]

Testes Post Hoc

Teste Post-hoc de Games-Howell

		REF	CGO
REF	Diferença média	—	−0.145
	p-value	—	NaN
CGO	Diferença média		—
	p-value		—