

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

RODRIGO MANTOVANI BERNARDES

CONCRETOS DE PÓS REATIVOS COM ADIÇÕES DE ÓXIDO DE GRAFENO (GO)

POÇOS DE CALDAS / MG

2023

RODRIGO MANTOVANI BERNARDES

CONCRETOS DE PÓS REATIVOS COM ADIÇÕES DE ÓXIDO DE GRAFENO (GO)

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, pela Universidade Federal de Alfenas - *campus* Poços de Caldas / MG. Área de concentração: Materiais e Compósitos Cerâmicos.

Orientador: Prof. Dr^a. Sylma Carvalho Maestrelli
Coorientadora: Dr^a. Ana Paula Margarido

POÇOS DE CALDAS / MG

2023

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Bernardes, Rodrigo Mantovani.

Concretos de pós reativos com adições de óxido de grafeno (GO) / Rodrigo Mantovani Bernardes. - Poços de Caldas, MG, 2023.

137 f.: il. –

Orientador(a): Sylma Carvalho Maestrelli.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

Bibliografia.

1. Concreto de pós reativos. 2. Resistência. 3. Óxido de grafeno. 4. Microestrutura. I. Maestrelli, Sylma Carvalho, orient. II. Título

RODRIGO MANTOVANI BERNARDES

CONCRETOS DE PÓS REATIVOS COM ADIÇÕES DE ÓXIDO DE GRAFENO (GO)

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 13 de dezembro de 2023.

Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli
Presidente da Banca Examinadora
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Carolina Del Roveri
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. José Gabriel Maluf Soler
Instituição: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais



Documento assinado eletronicamente por **Sylma Carvalho Maestrelli, Professor do Magistério Superior**, em 13/12/2023, às 18:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1152970** e o código CRC **1E4261B4**.

AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O concreto está cada vez mais presente na construção civil devido à sua versatilidade; alterações na quantidade de seus materiais constituintes - aglomerante (cimento), agregados (areia e brita) e água - resultam em um composto com características específicas (durabilidade, fragilidade etc.) e propriedades distintas (resistência mecânica, permeabilidade etc.). A presença de aditivos, por sua vez, pode modificar as propriedades do concreto, facilitando sua aplicação e melhorando sua trabalhabilidade. A resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a moldabilidade são alguns dos fatores determinantes na utilização do concreto. Alguns resistem a esforços compressivos em mais de 100 MPa, sendo denominados concretos especiais. Nessa categoria, encontra-se o concreto de pós reativos (CPR), o qual não possui materiais de granulometria grossa, sendo geralmente constituído por cimento, areia, pó de quartzo, sílica ativa, aditivo superplastificante e água. Pesquisas envolvendo outros concretos também têm sido desenvolvidas, como é o caso do concreto convencional com adições de óxido de grafeno (GO), um nanomaterial derivado da sintetização do grafite com oxidantes e ácidos fortes. Resultados da adição de GO em concreto revela um aumento de 48% na resistência à flexão e de 57% na compressão, tal como mencionado na revisão bibliográfica. Partindo-se dessa premissa, essa pesquisa investigou a influência do GO nas propriedades do CPR. Após caracterização física e microestrutural dos materiais, corpos de prova de CPR sem e com a adição de GO (teores de 0,025% e 0,05% em peso) foram produzidos e ensaiados. Os resultados mostraram que com a adição de 0,025% de GO, houve um aumento na resistência à compressão (1,52%) e na resistência à flexão (11,80%); já a adição de 0,05% de GO também promoveu um aumento na resistência à compressão (19,14%) e na flexão (7,93%). Por meio da Análise de Variância e do Teste de Tukey verificou-se que somente o CPR com a adição de 0,05% de GO obteve um aumento estatisticamente significativo de resistência à compressão, na idade de 28 dias. O mesmo não ocorreu para os resultados de resistência à flexão, com nenhuma das adições. Isso se deve à natureza do concreto, que, quando submetido às forças de tração, apresenta maior separação dos agregados, efeito não contido mesmo com a presença do GO. Assim sendo, com a análise estatística dos resultados, comprovou-se a influência positiva do GO, que proporcionou um maior refinamento na microestrutura do concreto, afirmativa essa corroborada pelos ensaios de microscopia eletrônica de varredura. Ainda, foi evidenciado o efeito benéfico da presença de GO no que tange à diminuição da porosidade e permeabilidade do CPR.

Palavras-chave: concreto de pós reativos; resistência; óxido de grafeno; microestrutura.

ABSTRACT

Concrete is increasingly present in civil construction due to its versatility; changes in the quantity of its constituent materials - binder (cement), aggregates (sand and gravel), and water - result in a compound with specific characteristics (durability, weakness etc.) and distinct properties (mechanical strength, permeability etc.). The presence of additives, in turn, can modify the properties of concrete, facilitating its application and improving its workability. Compressive strength, modulus of elasticity, and moldability are some of the determining factors in the use of concrete. Some resist compressive stresses of more than one hundred MPa, being called special concretes. In this category is reactive powder concrete (RPC), which does not have coarse-grained materials, usually consisting of cement, sand, quartz powder, active silica, superplasticizer additive, and water. Research involving other concretes has also been developed, such as conventional concrete with additions of graphene oxide (GO), a nanomaterial derived from the synthesis of graphite with oxidants and strong acids. Results of the addition of GO in concrete reveal an increase of 48% in flexural strength and 57% in compression, as mentioned in the literature review. Based on this premise, this research investigated the influence of GO on the properties of RPC. After physical and microstructural characterization of the materials, RPC test specimens without and with the addition of GO (contents of 0.025% and 0.05% by weight) were produced and evaluated. The results showed that with the addition of 0.025% GO, there was an increase in compressive strength (1.52%) and flexural strength (11.80%); the addition of 0.05% GO also promoted an increase in compressive strength (19.14%) and flexion (7.93%). Through Analysis of Variance and Tukey's Test, it was found that only the RPC with the addition of 0.05% GO obtained a statistically significant increase in compressive strength, at the age of 28 days. The same did not occur for the flexural strength results, with none of the additions. This is due to the nature of concrete, which, when subjected to tensile forces, presents greater separation of aggregates, an effect not contained even with the presence of GO. Thus, with the statistical analysis of the results, the positive influence of GO was proven, which provided a greater refinement in the microstructure of the concrete, a statement corroborated by scanning electron microscopy tests. Also, the beneficial effect of the presence of GO was evidenced in terms of reducing the porosity and permeability of the RPC.

Keyword: reactive powder concrete; resistance; graphene oxide; microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Modelo estrutural do GO	40
Figura 2 –	Estrutura de cristal de grafite mostrando a sequência e unidade de empilhamento ABAB e a célula unitária	41
Figura 3 –	Diagrama dos testes de caracterização e ensaios dos materiais realizados....	49
Figura 4 –	Microscopia óptica da areia com iluminação de LED incidente retida nas peneiras de 30, 50, 100 e 200 mesh, apresentando um material bem graduado, com grãos de formato subarredondado com alto grau de esfericidade	67
Figura 5 –	Microscopia óptica da sílica ativa com iluminação de LED incidente, apresentando grãos com formato arredondado com alto grau de esfericidade	70
Figura 6 –	Ensaio de resistência à compressão em prensa elétrica hidráulica	76
Figura 7 –	Retífica do corpo de prova.....	76
Figura 8 –	Ensaio de resistência à flexão a 3 pontos em prensa EMIC	79
Figura 9 –	MEV da amostra do CPR: (a) sem GO, (b) com a adição de 0,025% de GO e (c) com a adição de 0,05% de GO sem detector de elétrons retroespalhados	81
Figura 10 –	MEV da amostra do CPR sem GO, sem detector de elétrons retroespalhados: (a) ampliação de 5000x e (b) ampliação de 3000x	82
Figura 11 –	MEV da amostra do CPR com 0,025% de GO, ampliação 5000 x, com e sem detector de elétrons retroespalhados.....	83
Figura 12 –	MEV da amostra do CPR com 0,05% de GO, ampliação 5000 x, com e sem detector de elétrons retroespalhados	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Absorção de água, índice de vazios e massa específica da amostra seca, saturada e real do CPR.....	73
Tabela 2 –	Parâmetros de seleção para componentes para o CPR.....	104
Tabela 3 –	Características químicas da sílica ativa	104
Tabela 4 –	Características químicas do CP V ARI.....	105
Tabela 5 –	Características físicas do CP V ARI	105
Tabela 6 –	Composição dos CPR formulados por Richard e Cheyrezy (proporção)	106
Tabela 7 –	Composição dos CPR formulados por Yang, Wei, Yu, Huang e Li (proporção).....	106
Tabela 8 –	Composição do CPR formulado por Staquet e Espion	107
Tabela 9 –	Composição do CPR formulado por Song e Liu (kg/m ³)	107
Tabela 10 –	Composição do CPR formulado por Vanderlei e Giongo e do CPR utilizado por Oliveira (proporção)	107
Tabela 11 –	Composição dos CPR formulados por Cwirzen, Penttala e Vornanen (proporção).....	108
Tabela 12 –	Composição do concreto com GO formulado por Wu, Zhang, Liu, Zheng e Lambert.....	110
Tabela 13 –	Composição do concreto autoadensável de alta resistência com GO formulado por Somasri e Kumar	110
Tabela 14 –	Composição do concreto de ultra alto desempenho com GO formulado por Chu, Zhang, Wang, Feng, Wang e Wang	111
Tabela 15 –	Composição do concreto de ultra alto desempenho com GO formulado por Yeke e Yu (proporção)	111
Tabela 16 –	Composição da pasta de cimento formulada por Pan, He, Qiu, Korayem, Li, Zhu, Collins, Li, Duan e Wang (proporção)	112
Tabela 17 –	Composição da pasta de cimento formulada por Fan	112
Tabela 18 –	Resistência à compressão média formulada por Romero, Cuaya-Simbro e Morales-Maldonado	112
Tabela 19 –	Resumo de alguns métodos de obtenção de GO a partir da grafita	113
Tabela 20 –	Formulação do concreto pesquisado por FAN	115
Tabela 21 –	Propriedades do compósito grafeno-cimento hidratado	115

Tabela 22 – Proporções de mistura para as amostras	116
Tabela 23 – Características físicas e químicas do cimento CP V ARI realizados no laboratório da Holcim Brasil S/A	117
Tabela 24 – Caracterização do pó de quartzo segundo a beneficiadora, realizado a partir de ensaio de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) no pó moído via seca em moinho de bolas e retido entre peneiras 500 e 600 Mesh.....	118
Tabela 25 – Caracterização da sílica ativa segundo a empresa processadora	119
Tabela 26 – Caracterização do aditivo superplastificante Glenium 51 [®] segundo a indústria produtora	119
Tabela 27 – Caracterização do óxido de grafeno segundo a desenvolvedora do produto .	119
Tabela 28 – Série de peneiras normal e intermediária.....	120
Tabela 29 – Tolerância de tempo para rompimento por compressão dos corpos de prova	120
Tabela 30 – Fator de correção para corpos de prova com relação altura/diâmetro menor que 1,94.....	121
Tabela 31 – Classificação do concreto pelo coeficiente de variação.....	121
Tabela 32 – Classificação da qualidade do concreto pela absorção de água.....	121
Tabela 33 – Distribuição granulométrica da areia	122
Tabela 34 – Valores da massa unitária da areia conforme a variação do teor de umidade	122
Tabela 35 – Valores do inchamento da areia conforme a variação do teor de umidade ...	123
Tabela 36 – Valores da massa unitária do pó de quartzo conforme a variação do teor de umidade.....	123
Tabela 37 – Valores do inchamento do pó de quartzo conforme a variação do teor de umidade.....	124
Tabela 38 – Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova que utilizaram a formulação de Cwirzen, Penttala e Vornanen	125
Tabela 39 – Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova que utilizaram a formulação de Vanderlei e Giongo	126
Tabela 40 – Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova que utilizaram a formulação de Reis utilizada por Oliveira	127
Tabela 41 – Retração hidráulica do CPR aos 7, 14 e 28 dias com teores de 0%, 0,025% e 0,05% de GO.....	128

Tabela 42 – Resultados do ensaio de resistência à compressão com 7 dias de idade.....	129
Tabela 43 – Resultados do ensaio de resistência à compressão com 14 dias de idade.....	130
Tabela 44 – Resultados do ensaio de resistência à compressão com 28 dias de idade.....	131
Tabela 45 – Resultados do ensaio de resistência à flexão com 7 dias de idade.....	131
Tabela 46 – Resultados do ensaio de resistência à flexão com 14 dias de idade.....	132
Tabela 47 – Resultados do ensaio de resistência à flexão com 28 dias de idade.....	132
Tabela 48 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão do CPR considerando a formulação	133
Tabela 49 – Teste de Tukey dos resultados de resistência à compressão do CPR considerando a formulação	133
Tabela 50 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão do CPR considerando os dias de cura.....	134
Tabela 51 – Teste de Tukey dos resultados de resistência à compressão do CPR considerando os dias de cura	134
Tabela 52 – ANOVA dos resultados de resistência à flexão do CPR considerando a formulação	135
Tabela 53 – Teste de Tukey dos resultados de resistência à flexão do CPR considerando a formulação	135
Tabela 54 – ANOVA dos resultados de resistência à flexão do CPR considerando os dias de cura.....	136
Tabela 55 – Teste de Tukey dos resultados de resistência à flexão do CPR considerando os dias de cura.....	136
Tabela 56 – ANOVA dos resultados de retração hidráulica do CPR considerando a formulação	137
Tabela 57 – ANOVA dos resultados de retração hidráulica do CPR considerando os dias de cura.....	137

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de distribuição granulométrica da areia	64
Gráfico 2 – Curva de inchamento da areia	65
Gráfico 3 – Curva de inchamento do pó de quartzo	68
Gráfico 4 – Resistência média à compressão para escolha da formulação onde será adicionado o GO	71
Gráfico 5 – Retração hidráulica do CPR com 0%, 0,025% e 0,05% de GO	75
Gráfico 6 – Resistência média à compressão dos CPR sem adição de GO, com adição de 0,025% e 0,05% de GO nas idades de 7, 14 e 28 dias	77
Gráfico 7 – Resultados de resistência média aparada à compressão dos CPR sem adição de GO, com adição de 0,025% e 0,05% de GO nas idades de 7, 14 e 28 dias	78
Gráfico 8 – Resultados de resistência média à flexão	79

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A.E.C.	Antes da Era Comum
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
$C_{11}H_4O_5$	Furo[3,2-c]chromene-2,3,4-trione
C_2S	Belita
C_3A	Tri-cálcio aluminato
C_3S	Alita
C4AF	Cálcio alumino-ferrita
$Ca_3Al_2O_6$	Aluminato tricálcico
CAD	Concreto(s) de Alto Desempenho
CAR	Concreto de Alta Resistência
CC	Concreto Convencional
CCB	Centro Cerâmico do Brasil
CEM I - 42.5 R	Cimento Portland I com resistência à compressão de 42,5 MPa
CEM I	Cimento branco Portland I
CEM I 42.5 N BV/SR/LA	CEM I - 42.5 N de baixa temperatura
CEM I 42.5 N	CEM I - 42.5 R resistente ao sulfato
CEM II - 52,5 R	Cimento Portland II com resistência à compressão de 52,5 MPa
CEM II	Cimento branco Portland II
CEM III/A	Cimento de alto forno III/A
COC	Éter
COOH	Carboxila
CPI	Cimento Portland comum
CP V ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CPB 40	Cimento Portland branco estrutural
CPR	Concreto(s) de pós reativos
cps	Contagem por segundo
C-S-H	Hidratos do silicato de cálcio
DRX	Difração de raios X
DVD	<i>Digital Versatile Disc</i>
E.C.	Era Comum

EB	Normas de Especificação
EDS	Energia dispersiva
ESD	Dissipação eletrostática
F Fisher-Snedecor	Distribuição contínua de probabilidade de Fisher-Snedeco
F	Variabilidade entre as médias do grupo
GC	Partículas de grafeno de grau C
GM	Partículas de grafeno de grau M
GO	Óxido de grafeno
GOC	Partícula de óxido de grafeno de grau C
GOM	Partícula de óxido de grafeno de grau M
ICP-OES	<i>Inductively coupled plasma optical emission spectrometry</i>
IFSULMINAS	Instituto Federal do Sul de Minas Gerais
IQSC USP	Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
MCS	Material cimentício suplementar
Mesh	Número de abertura por polegada
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MO	Microscopia óptica
MPa	Megapascal
mpTiO ₂	Dióxido de titânio mesoporoso
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
OG	Óxido de grafite
OH	Hidroxila
OPC	Cimento Portland comum
PCE	Éter policarboxilato
ppm	Partes por milhão
PSC	Perovskita
RGO	Óxido de grafeno reduzido
RPC	<i>Reactive Powder Concrete</i>
UNIFAL	Universidade Federal de Alfenas
UHPC	Concreto de Ultra Alto Desempenho
α	Nível de significância para análise estatística
ρ	Probabilidade de significância na análise estatística

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVOS GERAIS	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	JUSTIFICATIVA	20
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
4.1	CONCRETOS DE PÓS REATIVOS	21
4.1.1	Materiais constituintes dos concretos de pós reativos.....	29
4.1.1.1	Areia fina	29
4.1.1.2	Pó de quartzo	29
4.1.1.3	Sílica ativa	30
4.1.1.4	Cimento	30
4.1.1.5	Fibras de aço.....	31
4.1.1.6	Aditivo superplastificante.....	31
4.1.2	Propriedades e ensaios em concretos de pós reativos.....	31
4.1.3	Formulação para concreto de pós reativos	32
4.1.4	Formulação para concreto com adição de óxido de grafeno	34
4.1.5	Processo de mistura do CPR	36
4.2	ÓXIDO DE GRAFENO (GO).....	36
4.2.1	Obtenções	37
4.2.2	Características e propriedades.....	40
4.2.3	Aplicações.....	42
4.2.4	Impacto ambiental com o uso do GO no concreto.....	43
4.3	CONCRETOS E O GO: ESTADO DA ARTE	44
5	MATERIAIS E MÉTODOS	47
5.1	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	49
5.1.1	Caracterização do agregado miúdo	49
5.1.1.1	Granulometria.....	50
5.1.1.2	Massa específica	50
5.1.1.3	Absorção de água e densidade.....	51
5.1.1.4	Umidade, inchamento, massa unitária e índice de vazios	52

5.1.1.5	Determinação de finura por lavagem	54
5.1.1.6	Umidade e teor de sólidos	55
5.1.1.7	Perda ao fogo	56
5.1.1.8	Microscopia óptica (MO)	56
5.1.2	Caracterização do concreto	57
5.1.2.1	Absorção de água, índice de vazios e massa específica da amostra seca, saturada e real	57
5.1.2.2	Determinação da retração hidráulica	59
5.1.2.3	Resistência mecânica (compressão e flexão a 3 pontos)	59
5.1.2.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	61
5.2	TÉCNICAS ESTATÍSTICAS PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	61
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
6.1	TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS.....	63
6.1.1	Testes de caracterização da areia.....	63
6.1.1.1	Granulometria.....	63
6.1.1.2	Massa específica e absorção de água.....	65
6.1.1.3	Umidade, inchamento e índice de vazios	65
6.1.1.4	Microscopia óptica	66
6.1.2	Testes de caracterização do pó de quartzo.....	67
6.1.2.1	Determinação de finura por lavagem	67
6.1.2.2	Massa específica e absorção de água.....	68
6.1.2.3	Umidade, inchamento e índice de vazios	68
6.1.3	Testes de caracterização da sílica ativa	69
6.1.3.1	Determinação de finura por lavagem	69
6.1.3.2	Umidade e teor de sólidos	69
6.1.3.3	Perda ao fogo	69
6.1.3.4	Microscopia óptica	69
6.2	ESCOLHA DA FORMULAÇÃO DO CPR PARA TESTES COM ADIÇÃO DE GO	70
6.3	TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DO CPR COM ADIÇÃO DE GO	72
6.3.1	Absorção de água, índice de vazios e massa específica da amostra seca, saturada e real.....	72

6.3.2	Determinação da retração hidráulica.....	74
6.3.3	Resistência mecânica (compressão e flexão a 3 pontos).....	75
6.3.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	81
6.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS TESTES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CPR	84
6.4.1	Análise de variáveis dos resultados de resistência à compressão.....	84
6.4.2	Análise de variáveis dos resultados de resistência à flexão.....	86
6.4.3	Análise de variância de testes de caracterização física do CPR com GO	87
7	CONCLUSÕES.....	88
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	90
	ANEXOS	104
	APÊNDICES	122

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um compósito utilizado na construção civil com finalidade estrutural; esse material é composto por “[...] cimento (a matriz), areia e brita (os particulados)” (Callister; Rethwisch, 2016, n.p.) e aditivos específicos para cada trabalhabilidade que se deseja alcançar com ele.

O concreto moderno surgiu no início do século XIX com a descoberta do cimento Portland. O processo consistia na queima do calcário e da argila finamente moídos, misturados a altas temperaturas até que o gás carbônico fosse retirado. Após a obtenção do material, esse era moído e, quando hidratado, formava uma "pedra artificial", sendo então patenteado em 1824 por Joseph Aspdin, de Leeds, no Reino Unido, e posteriormente refinado por seu filho William, que o transformou em um material muito próximo ao cimento usado hoje (Kaefer, 1998).

O processo histórico desvelou o concreto como promissor para a construção, isso porque esse material possui propriedades muito particulares, sendo as principais: boa resistência mecânica, especialmente à compressão, e facilidade de modelagem quando fresco. Essas vantagens são tão relevantes, que seu uso foi estimado, crescentemente, para cerca de 2 bilhões de toneladas por ano até 2050 (Crow, 2008).

No ímpeto de melhorar as propriedades do concreto, foram realizadas várias pesquisas, sendo que, a partir de uma delas, surge o conceito de concreto de pós reativos (CPR), demonstrado pela primeira vez por P. Richard e M. Cheyrezy, no início da década de 1990, ambos pesquisadores do laboratório Bouygues na França. Os resultados obtidos estimularam a realização da construção da primeira estrutura de concreto em pós reativos do mundo, a ponte de Sherbrooke, no Canadá, edificada em julho de 1997 (Gongale *et al.*, 2022).

O CPR, motivação desse estudo, tem como diferencial as suas propriedades e, por consequência, suas aplicações. Enquanto o concreto convencional com reforço de armadura ou por protensão tem sua utilização em estruturas que atinjam até 100 MPa de resistência a compressão, o CPR consegue atingir entre 200 MPa e 800 MPa (ABNT NBR 8953, 2015; Vanderlei, 2004).

As vantagens da aplicação do CPR na construção abrangem o uso em áreas onde necessita-se de economia de peso, baixa porosidade, impermeabilidade, substituição do aço nos membros que sofrem compressão, limite na retração do concreto causada pela perda de umidade quando ocorre a secagem, maior resistência à corrosão e melhor desempenho sísmico (Gongale *et al.*, 2022).

O CPR é basicamente formado por areia de quartzo, cimento comum, pó de quartzo e sílica ativa, além de fibras de aço de pequenas dimensões, superplastificante e água, sendo que os sólidos devem ter tamanhos menores que 2 mm e baixa relação água/cimento, em torno de 0,15 (Vanderlei, 2004). Sabe-se, por meio da ABNT NBR 11768-1 (2019) - Aditivos Químicos Para Concreto de Cimento Portland - Parte 1: Requisitos - que a utilização de aditivos específicos pode promover um aumento na resistência mecânica e na trabalhabilidade do material. Ainda, pesquisas como as de Fan (2014) e Babak *et al.* (2014), por exemplo, demonstram que a adição de óxido de grafeno (GO) no concreto convencional promove o aumento da sua resistência à compressão.

O GO é um nanomaterial derivado da redução do óxido de grafite adquirido como resultado de um processo de síntese do grafite. Essa redução pode ser realizada por vários métodos, tais como: a microesfoliação mecânica, deposição química em fase vapor e microesfoliação química. Ele é basicamente constituído por grupos hidroxila e epóxi ligados às lâminas de grafeno, que o dotam de um caráter anfifílico, sendo suas bordas predominantemente hidrofílicas e seu plano basal predominantemente hidrofóbico, dispersando-se em água (Shah *et al.*, 2015).

As pesquisas sobre GO vêm crescendo devido ao potencial de aplicabilidade, tais como: em revestimentos condutores transparentes, em eletrônicos, em células solares, em fotocatalisadores, em baterias de lítio, em membranas adsorventes e na medicina (Dideikin; Vul, 2018). Além dessas aplicações, pela pesquisa de Babak *et al.* (2014) verificou-se que a adição de GO no concreto resultou em um mecanismo que causa uma ligação mais forte entre os flocos de GO e a matriz de cimento; esse efeito é denominado nucleação dos flocos de óxido de grafeno, possibilitando um aumento da resistência na ligação, nucleação do silicato de cálcio e melhoria da difusividade térmica das pastas cimentícias, que resulta em maior resistência do compósito (Babak *et al.*, 2014; Sedaghat *et al.*, 2014).

A premissa para o desenvolvimento desse trabalho foi baseada nas referências obtidas na literatura, como explicitado acima. Foi investigado diferentes formulações para a otimização de uma delas, utilizando-a como padrão para o estudo do efeito da adição de GO nas características físicas, mecânicas e microestruturais de concretos de pós reativos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Essa pesquisa investigou o efeito da adição de óxido de grafeno (GO) em concretos de pós reativos por meio da avaliação de suas características e propriedades físicas, mecânicas e microestruturais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Levantar informações (revisão bibliográfica) sobre concretos de pós reativos e sobre a aplicação de óxido de grafeno na construção civil;
- b) caracterizar os materiais utilizados nas formulações dos CPR;
- c) avaliar e comparar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de uma formulação padrão de concreto de pós reativos sem a adição de GO, com a mesma formulação contendo teores de 0,025% e 0,05% em peso de GO adicionado à massa, utilizando métodos estatísticos;
- d) comparar e discutir os resultados obtidos experimentalmente com artigos científicos e afins na área.

3 JUSTIFICATIVA

Devido a demanda do mercado da construção civil, novos materiais precisam ser desenvolvidos. Isso se dá por vários fatores, sendo alguns deles: necessidade de maior capacidade de carga, redução da permeabilidade, maior durabilidade, entre outros. Dentre os materiais, um dos que mais se destaca é o concreto. Estima-se que a quantidade utilizada desse material é cerca de 1,05 trilhão de toneladas por ano para a produção de casas, prédios, encanamentos (aduelas e tubos), barragens, estradas de concreto etc. (John, 2003).

O grande uso do concreto na construção e a solicitação cada vez maior da sua capacidade de carga, juntamente com as limitações do concreto convencional armado que, segundo a ABNT NBR 8953/2015 (Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência), suportam tensões de até 100 MPa, estimulou o desenvolvimento de novas técnicas de reforço para o composto em questão. Por essa razão, surgiram várias pesquisas envolvendo o concreto, as quais chegaram ao RPC (*Reactive Powder Concrete*), o concreto de pós reativos (CPR).

O CPR é um compósito composto de pós (areia fina, cimento, pó de quartzo e sílica ativa), além de água (Mallmann, 2013). Seu desenvolvimento se deu com a finalidade de uso em edifícios, pontes, plataformas marítimas e aplicações especiais; voltado para situações de arquitetura arrojada com o emprego de peças esbeltas (Silva, 1995).

Destaca-se como uma das maiores vantagens do uso do CPR, sob a perspectiva de Nilson, Darwin e Dolan (2005), a de que os materiais para a fabricação CPR tem custo menor do que o da armadura para concreto. Ao mesmo tempo, seu uso em lajes e vigas mais esbeltas consegue diminuir o peso permanente das peças estruturais, resultando em menor exigência das fundações e das estruturas de suporte. Seguindo nesse mesmo pensamento, mas para concretos convencionais (CC), dado a necessidade de que esses sejam cada vez mais resistentes, com menor peso próprio e a possibilidade de confecção de peças arrojadas, um dos possíveis meios para atingir esse fim, e que motivou esse estudo, é adicionando GO ao concreto. Segundo pesquisas, esse nanomaterial demonstrou ser promissor quando utilizado em taxas específicas, influenciando em algumas propriedades do concreto.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CONCRETOS DE PÓS REATIVOS

O concreto, em sua definição, é um material plástico, possível de ser moldado de maneira a adquirir a forma desejada antes que desenvolva um processo de enrijecimento, alcançando dureza suficiente para resistir sozinho aos esforços que o solicitam (Kaefer, 1998).

Para Bastos (2023), o concreto é um material composto, constituído por cimento, água, agregado miúdo (majoritariamente areia) e agregado graúdo (pedra ou a brita). Podendo, também, conter adições, como exemplo: cinza volante, pozolanas, sílica ativa, entre outros, e aditivos químicos, com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades físicas.

Primeiramente, é importante delimitar a diferença entre concreto, argamassa e pasta de cimento, visto que para os desconhecidos confundem-se a respeito das terminologias corretas. (ABESC, 2007). Todos eles têm como base o cimento, composto químico, porém seco, finamente moído, que possui em sua composição as matérias-primas: calcário, sílica, alumina e óxido de ferro (Neville, 2016) que, ao ser misturado com água, reage lentamente formando um novo composto, dessa vez sólido, intitulado como pasta de cimento (ABESC, 2007). Ao serem adicionados os agregados miúdos, em específico areia, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado conforme a ABNT NBR 17054 (2022) (Agregados - determinação da composição granulométrica), recebe o nome de argamassa. Com a adição, também, de agregados graúdos, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, tem-se o concreto (ABNT NBR 7211, 2022).

O surgimento do cimento de alta qualidade, próximo do conhecido atualmente, ocorreu em 1756 pelo engenheiro John Smeaton, que foi contratado para construir um novo farol nas rochas de Eddystone, no Canal da Mancha. Smeaton averiguou que os blocos de pedra eram o único material prático para construção; contudo, o problema era como uni-los para criar uma estrutura monolítica sólida que pudesse resistir ao constante encharcamento de água do mar e, ainda, os únicos cimentos disponíveis em 1756 eram fracos e de pega lenta. Com isso, ele empreendeu em pesquisas com o método de tentativa e erro, combinando todos os materiais conhecidos e usados para produzir argamassa em várias partes da Inglaterra e do continente. Finalmente, ele fez uma grande descoberta ao combinar *blue lias* de Aberthaw, formado por depósitos de calcário e xisto, um calcário de Gales do Sul e uma pozolana italiana de

Civitavecchia (Steiger, 1995). O cimento criado por John Smeaton, na realidade, foi um aperfeiçoamento do que já se conhecia desde a antiguidade, um composto com base no calcário.

O aparecimento do composto em questão remonta-nos aos anos de 5.600 A.E.C., na Iugoslávia, nas margens do rio Danúbio, onde pescadores da Idade da Pedra produziam pisos com 25 cm, utilizando, como matéria-prima, o giz (gesso, água e calcário). Entretanto, o uso em maior quantidade ocorreu por volta de 3.000 a 2.500 A.E.C., no Egito, onde se empregava argamassas de gipsita e de cal na construção das pirâmides; em específico, foi relatado que um material de cimentação produzido a partir de concreto de cal ou gesso queimado foi usado na Grande Pirâmide de Gizé (Kaefer, 1998; Steiger, 1995).

Outras evidências arqueológicas mostraram que mais povos faziam o uso de concretos; um exemplo seria na província de Gansu, na China, por volta de 3.000 A.E.C., onde esse material era um composto de cimento (pó fino portador de propriedades de aglomeração) misturado com areia, cerâmica quebrada, ossos e água (Steiger, 1995). Em 600 A.E.C., os gregos descobriram uma pozolana natural na Ilha de Santorini que, ao ser misturada com cal, desenvolvia propriedades hidráulicas; com isso, iniciou-se a produção de cimento que iria endurecer quando entrasse em contato com água ou com ar. Isso foi possível devido à reação entre a cal e a sílica-alumina da pozolana. Os gregos utilizavam essa composição como proteção de paredes de tijolos não queimados (Steiger, 1995).

Posteriormente, nos anos de 300 A.E.C., foi utilizado um concreto na construção dos muros de uma cidade romana situada a 64 km da capital. Já nos anos de 75 E.C., um concreto feito com cimento pozolânico e hidráulico foi usado na construção do teatro de Pompéia e em termas romanas, esse cimento era um composto de cal e cinzas vulcânicas contendo sílica e alumina, encontrados em Pozzuoli, Itália. Outras construções romanas também foram realizadas devido à capacidade hidráulica do cimento pozolânico, que permitiu a construção de fundações lançadas sob a água. Uma dessas construções foi na cidade portuária de Ostia, região onde predominam solos arenosos de origem vulcânica. Houve a utilização desse concreto, também, nas abóbodas, visto que, pela própria natureza desse material, era fácil ser moldado até que desenvolvesse resistência suficiente para se manter aprumada (Kaefer, 1998).

Todos esses acontecimentos desconexos narrados anteriormente demonstram a evoluções do cimento; ainda há vários momentos não menos importantes, que traçam outros pontos de uso do concreto, como em edificações de estruturas armadas, mas que seriam assuntos que fugiriam da fundamentação do avanço unicamente do cimento.

Com isso, pode-se retomar esse movimento cronológico a partir das pesquisas desenvolvidas e apresentadas em 1756 por John Smeaton, como já citado anteriormente.

Em 1824, o empresário Joseph Aspdin, na Inglaterra, inventou o cimento Portland com a queima do calcário e argila finamente moídos e misturados a altas temperaturas até que o gás carbônico fosse retirado. O nome Portland faz menção às jazidas de excelente pedra para construção existentes na ilha de Portland, Inglaterra (Kaefer, 1998).

O amplo uso do concreto fez com que, na metade do século XIX, a Alemanha se tornasse o principal centro de testes para cimento, aperfeiçoando a qualidade do material, em especial ao avançar nos projetos de fornos que aumentaram a uniformidade do clínquer (fase básica de fabricação do cimento Portland, quando se adiciona sulfato de cálcio, calcário e/ou escória siderúrgica), ainda na aplicação de análises químicas sistemáticas de toda a matéria-prima em 1871. Com isso, houve a criação de fornos capazes de suportar temperaturas mais altas, ou seja, resultou em um clínquer mais duro.

Do mesmo modo, estudos também foram realizados na França, onde, em 1887, o químico Henri Louis Le Châtelier estabeleceu proporções de óxido utilizadas para se calcular, apropriadamente, a quantidade de calcário para produzir cimento Portland, nomeando os componentes: alita (silicato tricálcico), belita (silicato dicálcico) e celita (aluminoferrato tetracálcico). Por meio de suas pesquisas, ele concluiu que o endurecimento é causado pela formação de produtos cristalinos ao reagir cimento com água (Kaefer, 1998).

Até o final do século XIX, o concreto utilizado era relativamente espesso, conseqüentemente, difícil de ser moldado. Como solução desse problema, passaram a ser utilizados concretos mais plásticos, ou seja, com mais adição de água. Para estabelecer a dosagem ideal da relação água/cimento, em 1912 e 1918, nos Estados Unidos, foram realizados estudos que tiveram como resultado a resistência final necessária para o concreto (Kaefer, 1998).

O concreto passou por evoluções; não muito diferente de hoje, o concreto atua sob vários ambientes, inclusive os extremamente agressivos. Para se adaptar aos novos desafios, o homem criou uma infinidade de tipos de concreto, utilizando uma enorme gama de cimentos, agregados, adições, formas de aplicação e aditivos (Kaefer, 1998).

Os aditivos têm, segundo e pela ABNT NBR 11768-1 (Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1), a seguinte definição:

Produto adicionado durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não maior de 5% da massa de material cimentício contida no concreto, com o objetivo de modificar propriedades do concreto no estado fresco e/ou no estado endurecido, exceto pigmentos inorgânicos para o preparo de concreto colorido (ABNT NBR 11768-1, 2019, p. 3).

Os aditivos, por sua vez, não são tão atuais quanto se imagina, uma vez que os romanos adicionavam clara de ovo, sangue, banha ou leite aos concretos para melhorar a trabalhabilidade das misturas (Coutinho, 1997 *apud* Moraes Jr., 2014); contudo, os aditivos utilizados contemporaneamente não são tão primitivos, uma vez que se trata de químicos desenvolvidos por meio de pesquisas laboratoriais, cuja característica de ambiente controlado atribui ao produto qualidades intrínsecas.

Esses aditivos são classificados conforme sua ação no concreto, como visto na ABNT NBR 11768-1/2019 (Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1):

- a) aditivo controlador de hidratação: utilizado para controlar a velocidade de hidratação do cimento e, assim, ajustar o tempo de pega do concreto;
- b) aditivo acelerador de pega: reduz o tempo de pega do concreto, permitindo que a resistência inicial seja alcançada mais rapidamente;
- c) aditivo acelerador de resistência: aumenta a taxa de desenvolvimento das resistências iniciais do concreto, com ou sem modificação do início de pega, possibilitando a desforma mais cedo;
- d) aditivo acelerador de pega para concreto projetado: aditivo que altera imediatamente a reologia do concreto projetado, promovendo a aderência ao substrato e a aceleração da hidratação do cimento, aumentando sua resistência inicial;
- e) aditivo compensador de retração: reage ao cimento e água produzindo etringita ou hidróxido de cálcio, ou outros, levando ao aumento de volume, que induz o concreto a expandir e compensar as forças de retração;
- f) aditivo redutor de retração: tem a função de reduzir a retração autógena, atuando na diminuição da tensão superficial da água presente no concreto, minimizando as fissuras;
- g) aditivo incorporador de ar: incorpora ar durante o amassamento do concreto de forma controlada, sendo as microbolhas de ar separadas e distribuídas uniformemente;
- h) aditivo incorporador de ar para concreto leve: incorpora ar durante o amassamento do concreto, uma quantidade de microbolhas que produza um concreto com densidade abaixo de 2000 kg/m³;
- i) aditivo redutor de corrosão: potencializa a diminuição da corrosão da armadura do concreto, pois inibe a entrada de íons de cloretos no interior da peça concretada;

- j) aditivo modificador de viscosidade retentor de água: retém a água dentro do concreto, diminuindo o efeito de exsudação;
- k) aditivo modificador de viscosidade anti segregante: reduz a segregação de concretos fluidos ou autoadensáveis e, também, permite desenvolver concretos submersos;
- l) aditivo redutor de água: sem modificar a consistência do concreto permite reduzir a quantidade de água para amassamento, ou sem alterar a quantidade de água, modifica a consistência do concreto, aumento o abatimento e a fluidez;
- m) aditivo redutor de absorção capilar: diminui a absorção capilar por efeito físico, resistindo a absorção de água sob pressão;
- n) aditivo redutor de permeabilidade: diminui a permeabilidade capilar, por efeito de cristalização, onde os compostos que bloqueiam os poros são suficientemente estáveis para resistir à água sob pressão;
- o) aditivo para concreto vibroprensado: lubrifica a mistura reduzindo o desgaste do equipamento de vibroprensagem pelo contato com o concreto, bem como melhora o acabamento das superfícies das peças concretadas.

Dentro desse grupo de incorporadores para modificar as propriedades do concreto, tem-se um dos princípios básicos para a formulação do concreto de alto desempenho (CAD), material esse que tem como finalidade o aumento da resistência à compressão para obter um produto tão resistente e durável quanto uma rocha, mas que, em simultâneo, seja fácil de moldar em qualquer forma e dimensão (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

Dentre os CAD, tem-se o CPR (concreto de pós reativos). O princípio singular desse composto é a ausência de agregado graúdo, ou seja, sua composição consiste em partículas de tamanho médio de 0,2 mm, tendo nisso o porquê de se intitular esse material como concreto de pós reativos, sendo, do ponto de vista granulométrico, uma argamassa e não um concreto, ao qual podem ser adicionadas fibras e aditivo (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

O concreto de pós reativos suprime a utilização dos agregados graúdos, pois, sem eles, há a otimização das microestruturas ao empacotamento das partículas, de modo a atingir uma densidade mais alta. Ainda, a falta de agregados graúdos minimiza os defeitos internos do concreto, ou seja, microfissuras e espaços porosos. Desse modo, a resultante dessa mudança no concreto é a obtenção de maiores resistências à compressão, como, também, se torna responsável pela baixa permeabilidade e, conseqüentemente, alta durabilidade. A composição para o CPR segue os parâmetros indicados na Tabela 2 ([Anexo A](#)).

Apesar dos pontos positivos, a primeira geração do concreto em pó reativo teve como ponto fraco a resistência à tração relativamente baixa, de cerca de 8 MPa em alguns casos. Assim, o CPR só pôde ser utilizado em elementos estruturais de concreto quando armado ou protendido, substituindo parcialmente a armadura transversal (Sanjuán; Andrade, 2021).

O concreto de pós reativos foi desenvolvido em 1993, na França e no Canadá, pela construtora Bouygues, em conjunto com as empresas Lafarge e Rhodia, pelo do empresário Pierre Richard, com publicação científica realizada em 1995 por Marcel Cheyrezy e Nicolas Rouxe. A pesquisa tinha como intuito inicial suprimir algumas exigências específicas de estruturas de concreto pré-fabricado submetidos a ambientes agressivo. Após, devido ao bom desempenho, o CPR foi estudado e projetado para atender requisições militares (Biz, 2001; Sanjuán; Andrade, 2021).

Devido ao êxito nas pesquisas, em 1997, foi realizada a primeira construção estrutural com o CPR, com resistência à compressão de 200 MPa: a passarela de Sherbrooke em Quebec, no Canadá (Blais; Couture, 1999 *apud* Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

A pesquisa de Marcel Cheyrezy e Nicolas Rouxe apresentou um concreto que conseguia atingir resistência à compressão de até 800 MPa, com aplicação de cura térmica e cura com pressão. Era composto, basicamente, por areia de quartzo, cimento, pó de quartzo, sílica ativa, fibras de aço de pequenas dimensões, superplastificantes de alta eficiência e uma relação água/aglomerante muito reduzida, entre 0,15 e 0,20. Essa mistura obteve uma massa mais homogênea, tendo a compacidade otimizada devido à granulometria dos materiais finos, melhorando as propriedades mecânicas da interface, relação pasta com agregado, e avançando na propriedade de ductilidade em função da adição das fibras de aço. Toda essa formulação está embasada em uma questão relacionada à microestrutura do concreto, melhoria na zona de transição, ou seja, diminuição da espessura granulométrica e menor porosidade na interface (Biz, 2001; Soto, 2014).

A partir da década de 2000, houve avanços no empacotamento de partículas, na aplicação de nanotecnologia e no aprimoramento da matriz, por meio do reforço atingido pela adição de fibras de aço de ultra alta resistência, nanofibras e nanotubos de carbono.

Na década de 2010, pesquisas mostraram o comportamento da matriz em nanoescala e aprofundaram a ciência no reforço com carbono também nessa escala (Naaman; Wille, 2012 *apud* Viana, 2019).

Por meio desse desenvolvimento, ocorreu ampla diversificação do uso em diversos países, desde a América do Norte até a Austrália, envolvendo superestruturas, pré-fabricados, pontes, entre outros (Russel; Graybeal, 2013 *apud* Viana, 2019).

Desse modo, foi possível fundamentar as características do CPR, descritos por Aïtcin (2008 *apud* Tutikian; Isaia; Helene, 2011):

- a) aumento da homogeneidade do material suprimindo as partículas grossas;
- b) limitação da areia para prevenir que entrem em contato entre si na pasta enrijecida;
- c) melhoria nas propriedades mecânicas da pasta de cimento e supressão da zona de transição nas interfaces pasta/agregados;
- d) aumento da compactidade pela otimização das dimensões dos grãos dos pós da mistura e pela compressão exercida durante o endurecimento;
- e) limitação do teor de areia para que os grãos não se tanjam e formem esqueleto rígido, pois, ao ocorrer a retração, a matriz fica livre para se movimentar sem as restrições do agregado.

Com o despontar das construções de pontes com grandes vãos e arranha-céus, houve um aumento expressivo no uso de Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) devido sua excelente segurança, facilidade de manutenção e durabilidade. Ademais, descobertas recentes na ciência dos nanomateriais têm sido usadas para melhorar a resistência à compressão do concreto e, concomitantemente, reduzir o tamanho das peças estruturais e o peso próprio, resultando em diminuição de custos e embelezamento arquitetônico estrutural. Além disso, os resultados apontam para uma construção de estruturas de concreto com melhor vida útil para além de 100 anos, com requisitos mínimos de manutenção (Deng; Yi., 2023).

Outra aplicação que abrange conceito construtivo inovador são unidades habitacionais produzidas com placas de CPR pré-fabricadas, as quais são compostas por estruturas metálicas e recebem revestimento interno e externo em formato de painéis de CPR com apenas 1 centímetro de espessura, tendo excelente resistência mecânica e durabilidade. Nesse sentido, o CPR apresenta a vantagem de possibilitar a execução de peças mais esbeltas e, até mesmo, dispensar o uso de armadura (Tutikian *et al.*, 2019 *apud* Silva *et al.*, 2020).

Outro exemplo de uso promissor do CPR foi para a construção da Mars Hill Bridge em Iowa, EUA, realizada pela Lafarge Corporation. Considerada um avanço na ciência e engenharia de materiais, ganhou o prêmio *The Tenth Bridge Competition Award* pela *American PCI Association*, sendo apelidada como “a ponte do futuro” (Song; Liu, 2016).

Por meio desses exemplos, fica evidente que o baixa permeabilidade, a massa tem forma de uma matriz esponjosa densa que, gradualmente, se espalha e se funde, aderindo ao GO, fortalecendo o cimento e reduzindo sua permeabilidade. Para atingir esse aspecto, os pesquisadores utilizaram as seguintes proporções na mistura, demonstradas na Tabela 22 ([Anexo E](#)).

Pelas análises realizadas, foi observado um mecanismo que causa uma ligação mais forte entre os flocos de GO e a matriz de cimento; esse efeito é denominado nucleação dos flocos de óxido de grafeno. Devido a isso, é que se tem a alta resistência na ligação e a nucleação do C-S-H pelos flocos de GO.

A nucleação acelera ainda mais a hidratação do cimento. A adição de sílica coloidal resulta na aceleração das fases de silicato, alita (C_3S) e belita (C_2S), na dissolução e na rápida formação da fase C-S-H na matriz de cimento.

Os resultados do ensaio de corpos de prova mostram que as amostras contendo 1,5% em peso de flocos de GO exibiram um aumento de aproximadamente 48% na resistência à tração em comparação com as amostras sem GO (Babak *et al.*, 2014).

Para concretos de alta resistência, o uso de óxido de grafeno também se demonstrou promissor como evidenciado pelos pesquisadores Romero, Cuaya-Simbro, Morales-Maldonado (2016). A resistência à compressão uso do CPR se torna possível em âmbitos variados da construção, visto que esse material pode estar presente do pequeno ao grande projeto, naqueles que solicitam menores esforços, sendo produzidas peças estruturais de menores dimensões, até os que necessitam suportar grandes esforços, o que acomete em uma diminuição de armaduras de aço no concreto armado.

Para que se tornem factíveis as demandas do mercado da construção, é imprescindível o avanço da pesquisa, dado que, para se obter concreto de pós reativos cada vez mais resistentes, pela própria natureza do composto, somente é possível com a adição de pós reativos que reajam com os materiais já utilizáveis e/ou a incorporação de aditivos. Alguns estudos já realizados são: o comportamento do CPR com fibras metálicas e adição de sílica em percentuais diferentes. (Chan; Chu, 2004 *apud* Tai; Pan; Kung, 2011); o CPR com substituição de 60% do cimento por cinza volante em três diferentes tipos de cura: úmida normal, em autoclave e a vapor. (Yigiter *et al.*, 2012 *apud* Christ, 2014). Também, o CPR produzido com a mistura de 40% de cimento, 25% de escoria ultrafina, 25% de cinza volante, 10% de sílica ativa e 4% de microfibras metálicas, atingindo a resistência à compressão de 200 MPa (Yunsheng *et al.*, 2008 *apud* Christ, 2014).

Segundo Dowood e Ramli (2011 *apud* Christ, 2014), o CPR, quando não adicionadas as fibras, resulta em um material com elevada dureza, porém frágil; com a adição de microfibras, o concreto se torna mais dúctil. Como efeito desse emprego, há o aumento da resistência mecânica do concreto, redução da retração, ganho em resistência ao impacto e ao fogo. A proporção de fibras geralmente utilizada é de 5%, em massa, podendo variar conforme o tipo de fibra que esteja sendo utilizada (Debs; Naaman, 1995 *apud* Christ, 2014).

Apesar dos estudos já realizados, o CPR continua sendo amplamente pesquisado, seja por centros universitários, seja por empresas que querem melhorar e ampliar seus produtos (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

4.1.1 Materiais constituintes dos concretos de pós reativos

Como citado anteriormente, o CPR é composto geralmente por: areia fina, pó de quartzo, sílica ativa, cimento, fibras de aço de pequenas dimensões e aditivo superplastificante. No que diz respeito à água, a relação água/cimento é bastante reduzida, geralmente variando entre 0,15 e 0,20 (Vanderlei, 2004).

4.1.1.1 Areia fina

Recomenda-se que a areia utilizada em concretos de alta resistência sejam areias de quartzo; além de abundantes na natureza, possuem elevada dureza e resistência, como, ainda, permitem uma excelente interface pasta/agregado, pois age eliminando os vazios da mistura, proporcionando uma menor permeabilidade do concreto e uma maior homogeneização dos materiais (Barbosa; Carvalho, 2020; Beneton *et al.*, 2014).

O tamanho dos grãos é muito significativo: para o CPR é requerido o diâmetro máximo de 700 μm e o mínimo de 150 μm . Ainda, visando melhor empacotamento de partículas, os grãos arredondados são os mais adequados (Repette, 2005 *apud* Beneton *et al.*, 2014).

A areia pode ser obtida pelo peneiramento do pó resultante da pedra britada, sendo os grãos altamente angulares, como também é possível obter naturalmente, com grãos esféricos. Ambas as opções podem ser utilizadas para produzir o CPR, porém a demanda de água é ligeiramente menor para areia natural (Beneton *et al.*, 2014).

4.1.1.2 Pó de quartzo

O pó de quartzo trata-se de um material inorgânico e inerte, tendo como composição básica o dióxido de silício (SiO_2) (Christ, 2019). Em frações finas no CPR, age preenchendo os espaços vazios entre os grãos de areia, garantindo uma boa compactação da mistura. Ao ser utilizado como adição em conjunto com a sílica ativa, eleva o teor de grãos finos e a coesão do concreto (Tutikian; Isaia; Helene, 2011 *apud* Barbosa; Carvalho, 2020).

O diâmetro médio da partícula do pó de quartzo usado para CPR é de 10 μm , sendo que na aplicação de cura térmica, tem-se a reatividade com partículas de tamanhos entre 5 μm e 25 μm (Vanderlei, 2014).

4.1.1.3 Sílica ativa

A sílica ativa é proveniente do processo de produção do silício metálico, conhecido como ferro silício (Christ, 2019), cuja composição típica é mostrada na Tabela 3 (Anexo A).

A adição da sílica ativa nos CPR produz hidratos (C-S-H) secundários pela reação pozolânica com a cal, resultante da hidratação primária (Vanderlei, 2004). Além da sua atuação pozolânica, a sílica ativa auxilia no maior preenchimento dos espaços vazios da mistura, levando a um maior fator de empacotamento de partículas, reduzindo a retração do cimento, dado que ajuda a evitar a perda de umidade e garante um nível de trabalhabilidade para a massa (Machi; Doná; Bertequini, 2019).

4.1.1.4 Cimento

Os cimentos mais indicados para a produção de CPR são: cimento Portland comum (CP I) ou o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI); contudo, o CP I não é mais produzido no Brasil (Bonneau *et al.*, 1996 *apud* Barbosa; Carvalho, 2020).

O fator para que o CP V ARI seja o mais utilizado é o de possuir menor teor de adições e ser facilmente encontrado para compra (Christ, 2019).

Algumas pesquisas sobre concreto de pós reativos adotaram outros cimentos, tais como: CS (CPB 40) (Rohden; Kirchheim; Molin, 2020), *blast furnace slag cement* (cimento de escória de alto forno com 35% a 64% de clínquer e 36% a 65% de escória de alto forno - CEM III/A) (Grzeszczyk; Janus, 2021), cimento Portland ou cimento produzido com diferentes proporções de clínquer e adições pozolânicas (CEM I e CEM II, respectivamente) (Mayhoub *et al.*, 2021), entre outros.

A escolha do cimento que irá compor o CPR deve estar relacionada com as propriedades reológicas e o desempenho mecânico, por exemplo: o uso do cimento com alto teor de sílica seria uma excelente escolha se não apresentasse a desvantagem de ter um processo muito lento de pega, impedindo o uso para algumas aplicações, induzindo, assim, o uso de cimentos convencionais, que tenha pega rápida, alto desempenho e baixo conteúdo de aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) (Vanderlei, 2004). A composição química e física do cimento mais

aconselhado, ou seja, do CP V ARI estão indicadas nas Tabela(s) 4 e 5 (Anexo A), respectivamente.

4.1.1.5 Fibras de aço

A densa microestrutura do CPR o torna suscetível à fragmentação e rachaduras quando exposto a alta temperatura e tensão. No entanto, a incorporação de fibras de aço aumenta a resistência à tração e à pressão interna causada pelo vapor em altas temperaturas, protegendo o CPR da fragmentação, visto que as fibras ajudam na dissipação de energia no CPR (Abid *et al.*, 2017; Singh, 2017).

Conforme a ABNT NBR 15530/2019 (Fibras de aço para concreto - Requisitos e métodos de ensaio), as fibras para serem utilizadas no concreto devem ter tolerância de comprimento de $\pm 5\%$ para valores superiores a 30 mm e de $\pm 1,5\%$ para valores iguais ou inferiores a 30 mm. Quanto ao diâmetro, a tolerância deve ser de cerca de $\pm 0,015$ mm para 0,30 mm.

4.1.1.6 Aditivo superplastificante

O superplastificante é um aditivo químico que altera a trabalhabilidade (viscosidade) do concreto fresco, capaz de reduzir a quantidade de água entre 20% e 30% (Vanderlei, 2004; Torres *et al.*, 2021; Matos *et al.*, 2021). Entre os superplastificantes, destaca-se a mistura éter policarboxilato (PCE), conhecido por fornecer melhor trabalhabilidade em comparação com os superplastificantes à base de naftaleno e melamina.

Os superplastificantes desempenham um papel importante na manutenção da fluidez da mistura: por exemplo, a repulsão estérica (principal mecanismo de dispersão do PCE) que tende a durar mais do que a repulsão eletrostática (mecanismo de dispersão do plastificante) (Matos *et al.* 2021).

4.1.2 Propriedades e ensaios em concretos de pós reativos

O desenvolvimento de pesquisas em torno do concreto de pós reativos demonstrou propriedades técnicas muito particulares desse material, sendo elas: altas resistências à compressão e à tração (direta, rachadura e flexão), capacidade de carga-deflexão e tenacidade à flexão (Sarika; John, 2015).

De forma mais específica, pode-se observar as propriedades do CPR por meio dos seguintes processos: a durabilidade superior do CPR alcançada pela redução da relação água-aglutinante em menos de 0,2; também, pela exclusão de partículas grossas, otimizando o empacotamento de partículas com a adição de sílica ativa e regimes de cura.

Quanto à microestrutura densa do CPR, que o torna mais vulnerável à fragmentação e rachaduras em alta temperatura, pela adição de fibras de aço tem-se a melhora da resistência à tração e flexão, tenacidade e durabilidade. Ele também resiste à pressão interna do vapor de água quando em alta temperatura, preserva o CPR de fragmentar-se (Abid *et al.*, 2017).

4.1.3 Formulação para concreto de pós reativos

O desenvolvimento de concretos de pós reativos (CPR) somente pôde ser alcançado por meio da aplicação de alguns princípios à formulação, dentre eles estão: a eliminação de agregados graúdos, otimização granular, aplicação de compressão durante a concretagem, tratamento térmico após endurecimento e incorporação de microfibras metálicas (Richard; Cheyrezy, 1995; Vanderlei; Giongo, 2006).

Outra condição que faz o CPR ser um diferencial entre os concretos é a sua composição, tendo teores mais elevados de materiais cimentícios suplementares (MCSs) do que os concretos de alto desempenho padrão. Nesse sentido, a sílica ativa é o MCS mais utilizado no CPR, contudo, há MCSs menos utilizados como: cinzas volantes, escória de alto forno, escória de fósforo pulverizado, pó de vidro e pó reciclado de tijolos cerâmicos que aumentam a densidade granular (Long; Wang; Xie, 2002; Yanzhou *et al.*, 2015). Além disso, aumentar as taxas de MCSs implica na melhoria do desempenho da mistura no estado fresco (Ahmad; Zubair; Maslehuddin, 2015), na redução do superplastificante (Yazici *et al.*, 2008; Yazici *et al.*, 2009) e no consumo de cimento (Yiğiter *et al.*, 2012). Outras linhas de pesquisa buscam melhorar o desempenho do CPR incorporando MCSs menos comuns, como as nanopartículas, por exemplo: a nanossílica e dióxido de titânio (Han *et al.*, 2017).

Devido à composição de pós finos do CPR, a demanda por alta energia para ser misturado influencia, diretamente, em suas características. Uma verificação disso foi realizada por Hiremath e Yaragal (2017a) que investigaram o efeito da velocidade de mistura (25, 50, 100, 125 e 150 rpm) e do tempo de mistura (10, 15, 20, 25 e 30 min) nas características de CPR fresco. Os autores observaram que a velocidade da mistura deve estar entre 50 e 100 rpm, sendo que baixas velocidades comprometem o desempenho do CPR; em contrapartida, altas velocidades apresentaram altos teores de ar incorporado. O tempo de mistura de 15 minutos foi

o que demonstrou melhores características de fluidez e resistência em comparação com os demais tempos.

Outro fator que permite um aumento substancial na resistência à compressão do CPR é a aplicação de pressão para compactação da mistura. Por meio de estudo, realizado pelos pesquisadores Ipek *et al.* (2011), sobre a compactação auxiliada por um pistão especialmente desenvolvido para essa finalidade, foi possível verificar que, aplicando sobre o CPR as pressões de 25, 50, 75, 100 e 125 MPa, alcançou-se maior resistência à compressão - cerca de 475 MPa para a compactação de 100 MPa, tendo essa resistência diminuída para pouco mais de 450 MPa aplicando uma compactação de 125 MPa sobre o CPR fresco. Essa diminuição na resistência é explicada devido às microfissuras criadas pela deformação do agregado durante a aplicação da pressão de compactação. Ainda, a quantidade de água necessária para a cura do concreto pode ter saído com a aplicação de 125 MPa de pressão, que diminui os espaços vazios do corpo de prova de concreto onde a água estava acumulada, expulsando-a para fora da amostra.

Além da resistência à compressão, outras propriedades do CPR também são melhoradas com a aplicação de pressão para compactação da mistura. Estudos realizados pelos pesquisadores Ipek, Yilmaz e Uysal (2012) demonstraram que, aplicando compressão em seis níveis diferentes (0, 5, 10, 15, 20, 25 MPa), resultou-se na melhoria da resistência à tração. Para o nível de 5 MPa de pressão para compactação da mistura fresca, houve um aumento na resistência à flexão do CPR de 21,92 MPa para 29,28 MPa, ou seja, aproximadamente 34% de aumento. Para o nível mais alto de tensão para compactação, 25 MPa, o resultado foi um aumento na resistência a flexão de 36,40 MPa, ou seja, elevou a resistência à flexão para mais de 66%.

Dessa maneira, é possível verificar que os métodos de execução da produção do CPR influenciam no seu desempenho mecânico; contudo, o que mais interfere na melhoria de sua resistência mecânica é a formulação. Alguns exemplos de formulação que demonstram esse vínculo entre composição da mistura e resistência são: concretos de pós reativos desenvolvidos pelos pesquisadores Richard e Cheyrezy (1995), conseguindo atingir 175 MPa até 810 MPa de resistência à compressão com as formulações indicadas na Tabela 6 ([Anexo B](#)).

Outros concretos de pós reativos foram os desenvolvidos pelos pesquisadores Yang, Wei, Yu, Huang e Li (2019), atingindo, aproximadamente, 150 MPa até 270 MPa de resistência à compressão, com as formulações dos CPR apresentadas na Tabela 7 ([Anexo B](#)).

Além desses, outro CPR foi o produzido pelos pesquisadores Staquet e Espion (2002) que atingiram aproximadamente 188 MPa e 258 MPa de resistência à compressão, respectivamente, com a formulação indicada na Tabela 8 ([Anexo B](#)).

Outro CPR foi o idealizado pelos pesquisadores Song e Liu (2016), que atingiu 158 MPa de resistência à compressão com uma mistura composta pelos materiais presentes na Tabela 9 (Anexo B).

Mais duas formulações de CPR que foram utilizadas em pesquisas, apresentadas na Tabela 10 (Anexo B), são: a criada pelos pesquisadores Vanderlei e Giongo (2006), que alcançaram 187 MPa de resistência à compressão. A formulação utilizada por Oliveira (2022), desenvolvida pelo Professor Luiz Antônio dos Reis da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais na cidade de Poços de Caldas, baseada no método de empacotamento de partículas, tendo sido realizado o ajuste da relação água/cimento e do teor de aditivo superplastificante para melhor trabalhabilidade da mistura na produção, conseguiu atingir a resistência média à compressão de 113 MPa com a idade de 28 dias.

Outros CPR foram os desenvolvidos pelos pesquisadores Cwirzen, Penttala e Vornanen (2008), tendo, entre eles, alguns que atingiram pouco mais de 200 MPa de resistência à compressão, formulados conforme Tabela 11 (Anexo B).

4.1.4 Formulação para concreto com adição de óxido de grafeno

Os nanomateriais têm sido empregados para a melhoria mecânica e durabilidade dos concretos em geral. Um exemplo disso é a aplicação do óxido de grafeno (GO) que, por ser hidrofílico, é facilmente dispersível em água em comparação com outros nanomateriais à base de carbono, como nanoplaquetas de grafeno ou nanotubos de carbono (Alatawna *et al.*, 2020).

Algumas pesquisas relatam que a adição de GO melhorou a resistência à compressão e à flexão de compósitos à base de cimento; ainda, demonstraram que houve oposição à penetração e erosão de íons de cloreto devido ao uso de alta dosagem de cimento, mas com diminuição da fluidez da massa (Ren, 2018 *apud* Wu *et al.*, 2020). Nesse sentido, é possível citar algumas formulações que revelam esses resultados, sendo elas: o efeito de nanofolhas de óxido de grafeno nas propriedades físicas do concreto de ultra alto desempenho dos pesquisadores Wu *et al.* (2020), que chegaram a um acréscimo na resistência de 25,77% para a compressão e 24,49% para a flexão em relação à amostra de concreto sem GO, conforme Tabela 12 (Anexo C).

Somasri e Kumar (2021) adicionaram óxido de grafeno no concreto autoadensável, conforme Tabela 13 (Anexo C), resultando em uma resistência à compressão aumentada em 17,38% para a adição de 0,1% de GO em relação à amostra sem o óxido de grafeno; também houve um aumento de 23,93% na resistência à flexão.

A incorporação do GO em concreto de ultra alto desempenho, formulado por Chu *et al.* (2020), também demonstrou melhoria na resistência após 28 dias. As informações presentes na Tabela 14 (Anexo C) mostram que a adição de aproximadamente $0,6 \text{ kg/m}^3$ resultou em um aumento de 16,83% na resistência à compressão e 26,62% na resistência à flexão.

Outra formulação de concreto de ultra alto desempenho que demonstrou melhoria ao se adicionar o GO foi a desenvolvida por Yeke e Yu (2021). Verificou-se que ao adicionar 0,04% de GO na mistura, conforme exhibe a Tabela 15 (Anexo C), foi possível atingir uma melhoria na resistência à compressão de aproximadamente 15,64% e na resistência à flexão de 12,57% após 28 dias.

A pasta de cimento também mostrou melhoria na sua resistência; segundo os pesquisadores Pan *et al.* (2015) houve uma melhoria de 33% na resistência à compressão e 59% na resistência à flexão, com a idade de 28 dias, após adicionar 0,05% de GO na mistura, conforme se verifica na Tabela 16 (Anexo C). Outra pesquisa que também demonstrou melhoria na resistência da pasta de cimento após secagem é a de Fan (2014); de acordo com as informações contidas na Tabela 17 (Anexo C), utilizando 0,1% de GO de grau M, atingiu-se uma melhoria de mais de 13% na resistência à compressão e, utilizando a mesma quantidade de GO de grau C, atingiu-se uma melhoria na resistência à compressão maior que 10%. Desse modo, é possível afirmar que, para ambos os óxidos de grafeno utilizados, seja o de grau C, derivado da oxidação do grafeno de grau C, que consiste em agregados de plaquetas submicrométricas que têm diâmetro inferior a $2 \mu\text{m}$ e área superficial média de $500 \text{ m}^2/\text{g}$. Seja o GO de grau M, que têm uma espessura média de aproximadamente 6 a 8 nm, área superficial de $150 \text{ m}^2/\text{g}$ e diâmetro médio de $15 \mu\text{m}$, produzidos pela xGnP®, é possível afirmar que a resistência atingida foi muito próxima para os dois tipos de GO, porém, poderia ser mais bem avaliada em posse dos valores do desvio padrão.

Romero, Cuaya-Simbro e Morales-Maldonado (2016) apresentaram uma pesquisa onde conseguiram atingir um aumento na resistência à compressão do concreto de 56,79% após 28 dias, utilizando um teor de óxido de grafeno de 2%. Quando utilizado um teor maior de GO, comparando com a amostra de controle, aos 28 dias, teve-se um declínio da resistência à compressão, conforme mostrado na Tabela 18 (Anexo C). Os autores não citam, exatamente, quais foram as misturas do concreto, apenas fazem referência a um concreto que atinge uma resistência de 39,14 MPa.

4.1.5 Processo de mistura do CPR

A literatura sobre o CPR indica que a ordem em que os componentes do concreto são misturados tem um impacto significativo nas condições de cura, afetando tanto o tempo de pega quanto o calor de hidratação (Ahmad; Zubair; Maslehuddin, 2015). Desse modo foi padronizado um método de mistura que levasse em consideração esses fatores a fim de produzir um concreto homogêneo, como descrito a seguir:

- a) estado de empacotamento seco: Misturar os materiais ligantes (cimento e sílica) em rotação baixa por 1 minuto para homogeneizar a mistura;
- b) estado de empacotamento flocular: Adicionar 80% da água e 100% do aditivo superplastificante e misturar por 3 minutos. Nessa etapa, devido ao alto teor de água e ao maior tempo de mistura, há maior produção de íons de cálcio (Ca^{2+}) devido às reações iniciais do clínquer, o que posteriormente ajudará o fluxo da mistura, pois esses íons adsorvem mais facilmente as cadeias do aditivo superplastificante;
- c) estado de empacotamento pendular: Adicionar os demais constituintes, como o pó de quartzo e a areia, misturar em velocidade alta por mais 3 minutos até atingir visualmente a homogeneidade da massa do CPR;
- d) estado de empacotamento capilar: Acrescentar os 20% restantes de água e misturar o concreto por mais 4 minutos em velocidade alta. Isso deve resultar em um concreto homogêneo.

De acordo com Hiremath e Yaragal (2017b), esse método apresenta alguns fatores limitantes, como o tempo de mistura, que não pode exceder 15 minutos, e as rotações, que não podem ser superiores a 125 rpm. Isso ocorre porque há a possibilidade de incorporação de ar na mistura, o que prejudicaria as características mecânicas e microestruturais do CPR.

4.2 ÓXIDO DE GRAFENO (GO)

O grafeno é o material mais fino e resistente que se conhece atualmente. É constituído por um plano monoatômico de carbono e possui área específica teórica elevada ($2.630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$). Ao ser oxidado, esse material apresenta grupos carboxílicos em suas extremidades, e grupos hidroxila e epóxi na sua superfície, sendo, então, denominado óxido de grafite (OG) (Ganassin; Lima; Faria, 2018).

O óxido de grafite, ou após sua esfoliação, óxido de grafeno (GO) é, por definição, uma folha de carbono bidimensional enrugada com vários grupos funcionais oxigenados em seus

planos basais e em suas periferias, tendo a espessura em torno de 1 nm e dimensões laterais variando entre um e alguns nm até vários μm .

O grafeno, de acordo com a IUPAC, consiste em uma folha plana de átomos de carbono em ligação sp^2 densamente compactados e com espessura de apenas um átomo, reunidos em uma estrutura cristalina hexagonal. Já os óxidos de grafeno são estruturas derivadas do grafeno, caracterizada pela presença de grupos funcionais oxigenados (hidroxila, carbonila e epóxi) na superfície e extremidade da folha de carbono. Os óxidos de grafeno apresentam vantagem em relação ao grafeno com melhor solubilidade e estabilidade em meio aquoso (Wick *et al.*, 2014 *apud* Camargos; Semmer; Silva, 2020, p. 1119).

A sintetização ocorreu, pela primeira vez, na Universidade de Oxford, pelo químico britânico Benjamin Collins Brodie, em 1859, tornando-se muito popular na comunidade científica durante a última década, simplesmente porque se acreditava que era um importante precursor do grafeno, por conter uma única camada atômica de grafite (Gao, 2015).

4.2.1 Obtenções

Para sintetizar o grafite pela primeira vez, Brodie adicionou KClO_3 (clorato de potássio) e uma pasta de grafite em HNO_3 (ácido nítrico) fumegante; ao realizar isso, obteve um novo composto resultante contendo carbono, oxigênio e hidrogênio. Ele lavou o composto retirando os sais produzidos na reação, secou-o a 100°C e colocou-o novamente sob ambiente de oxidação. A aparência do produto mudou após três tratamentos repetidos e, finalmente, resultou em uma substância com uma cor amarela clara que não mudava com qualquer tratamento de oxidação. Benjamin Brodie enfatizou, em sua pesquisa, que o produto não podia ser produzido por um tratamento prolongado e que é necessário promover um processo de oxidação com a restauração das condições originais de forma gradual.

Pela análise de Brondi, verificou-se que o produto obtido foi $\text{C}_{11}\text{H}_4\text{O}_5$ (Furo [3,2-c] crhomene-2,3,4-triona), com acidez fraca e dispersão moderada em solução básica. No entanto, a caracterização goniométrica reflexiva não foi bem-sucedida devido ao tamanho pequeno, espessura limitada e estrutura imperfeita. Benjamin Brodie também reagiu o produto final com cloreto de cobre (CuCl_2) e protocloreto de estanho (SnCl_2) para obter os sais de óxido de grafite, acompanhando, com uma análise detalhada, a composição e decomposição térmica. Entretanto, suas observações e conclusões foram limitadas devido às teorias e técnicas de caracterização disponíveis naquele momento, deixando um grande espaço na pesquisa para ser trabalhado (Gao, 2015).

A primeira melhoria no método de Brodie ocorreu em 1898, por L. Staudenmaier, o qual adicionou ácido sulfúrico (H_2SO_4) para aumentar as propriedades de oxidação, elevando a acidez da mistura e, ainda, adicionou várias alíquotas de solução de clorato de potássio (KClO_3) na mistura, ao longo da reação. Com isso, foi possível a produção de óxido de grafite altamente oxidado, em um único vaso de reação, em um processo de síntese; porém, o método de Staudenmaier, além de demorado, era perigoso, pois a reação produzia dióxido de cloro (ClO_2) que precisava ser removido com risco constante de explosão por ser, em forma gasosa e líquida, altamente inflamável (Gao, 2015).

Em 1958, William S. Hummers e Richard E. Offeman, da Mellon Institution of Industrial Research, apresentaram o método Hummers, o qual propôs o emprego de uma mistura de ácido nítrico (HNO_3) produzido *in situ* a partir de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, nitrato de sódio (NaNO_3) e o permanganato de potássio (KMnO_4), como agente oxidante. A mistura foi mantida abaixo de $45\text{ }^\circ\text{C}$ durante a oxidação de grafite. Todo o processo de oxidação finalizou-se em duas horas, e levou a um produto com maior grau de oxidação (Dreyer *et al.*, 2010 *apud* Smaniotto, 2015; Gao, 2015).

O que se pode dizer desses três experimentos anteriores é que a obtenção do GO ocorre de diferentes modos, dependendo do método de oxidação empregado e do uso de agentes que se intercalam, tendo-se uma influência no grau de oxidação do material e no tamanho das folhas. Conjectura-se que isso ocorra devido a defeitos localizados na estrutura π do grafite que atua como pontos de partida para a oxidação. Todavia, a elucidação exata dos mecanismos é, deveras, arduada dada à complexidade do grafite, inerente por ser um mineral de ocorrência natural (Dreyer *et al.*, 2010 *apud* Smaniotto, 2015; Negreti, 2016).

Outra influência são as proporções distintas entre os grupos funcionais oxigenados existentes no óxido de grafite (hidroxila, epóxi, carbonila e carboxila) que causam variações nas características estruturais; isso ocorre dependendo do método de oxidação empregado (Chua; Sofer; Pumera, 2012 *apud* Smaniotto, 2015; Eng *et al.*, 2013 *apud* Smaniotto, 2015).

Além do processo de produção, a fonte de grafite também é um fator importante na fabricação de óxido de grafite. Embora amostras diferentes de grafite compartilhem a mesma estrutura química, são observadas grandes diferenças em seus tamanhos de grãos, dispersão, reatividades e, especialmente, a propensão para a oxidação. Devido a essas características inerentes e a complexidade da estrutura, o mecanismo de oxidação nessas reações são difíceis de elucidar, precisamente. Mas, pode-se afirmar que o material com maior cristalinidade de grafite oferece melhor transporte para elétrons, como ainda, quando usadas nanofibras de grafite como matéria-prima para fazer GO, as nanofolhas resultantes são mais uniformes na

distribuição de tamanho (Gao, 2015).

Em vista disso, há várias maneiras de produção do óxido de grafite, podendo-se citar uma relação feita por Negreti, apresentada na Tabela 19 (Anexo D), com algumas variações das técnicas utilizadas para se obter o GO a partir do grafite.

Como observado, vários modelos foram propostos para a produção de óxido de grafite e, devido a isso, como também a diversidade estrutural do grafite, faz com que sua estrutura química final permaneça discutível, dado ainda que a avaliação estrutural desse material, utilizando as técnicas de análise superficial sofisticada, por causa do seu caráter não estequiométrico, torna-se complexa. O mesmo ocorre pela variação da composição, dependendo das condições de síntese, além da elevada higroscopia (Szabó *et al.*, 2006 *apud* Smaniotto, 2015).

É possível explicar a reação decorrida na produção de GO, sendo que, para tal, ocorre a oxigenação do grafite, onde diversos carbonos sp^2 das lamelas são oxidados formando sp^3 com a adição de grupos oxigenados. Tem-se, como resultado, a formação de óxido de grafite, composto por folhas empilhadas, fortemente hidrofílicas devido à presença de moléculas de água entre elas, com um espaçamento de 6 a 12 Å.

O fato é que o óxido de grafite obtido a partir do processo de síntese, não é o óxido de grafeno, sendo o segundo uma redução do primeiro. Isso significa que, para chegar ao GO, ainda é exigida mais uma rota no processo produtivo, a qual formará uma única folha do material; para que isso ocorra, é necessário o processo de esfoliação do OG (Negreti, 2016; Smaniotto, 2015).

Existem vários métodos para obtenção do óxido de grafeno, sendo alguns desses: a microesfoliação mecânica, que consiste no uso de fitas adesivas para retirada de camadas do grafite. Um outro método é a deposição química em fase vapor, na qual o óxido de grafite é aquecido rapidamente em temperaturas elevadas e atmosfera inerte, gerando a liberação de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O), forçando a separação das folhas devido à grande pressão gerada no interior das camadas que estão empilhadas, formando um material com grande área superficial e baixa densidade, tendo um aumento de volume de 100 a 300 vezes maior que o volume inicial. Por último - e o mais utilizado - é a microesfoliação química, na qual o óxido é disperso em água, álcool ou outro solvente polar e suas folhas bidimensionais são separadas com o uso de ultrassom e/ou agitação mecânica por longos tempos, obtendo dispersões estáveis de coloração marrom (Negreti, 2016; Oliveira; Poletto; Severo, 2018).

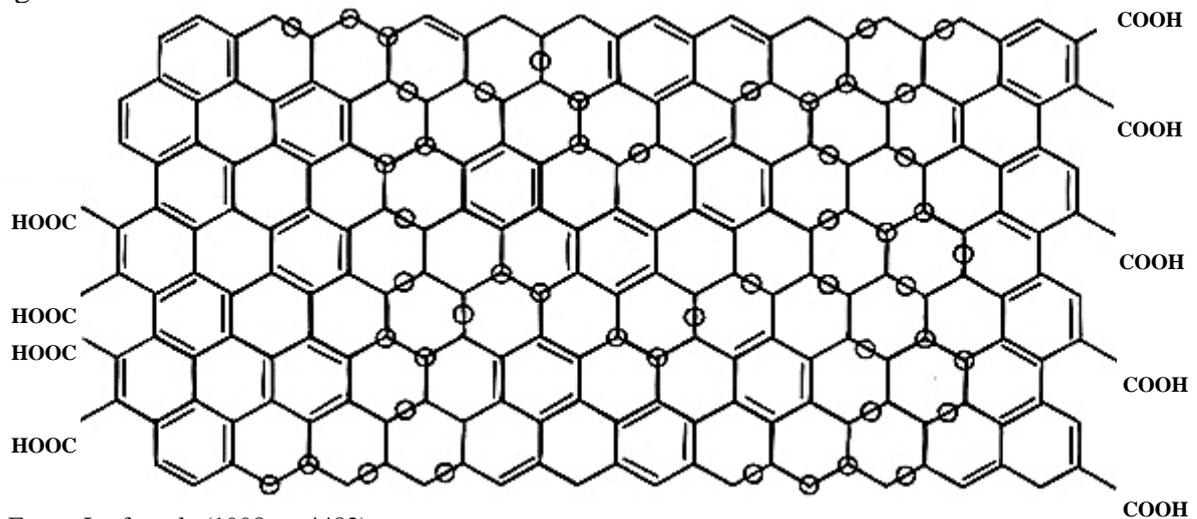
Outro método mais atual de esfoliação para a produção do GO é a utilização de radiação

eletromagnética por meio de laser de gravador de DVD, tal que além de eficiente é pouco dispendioso, podendo ser utilizado para produção em escala industrial. Esse processo aplica a radiação eletromagnética sob um filme de óxido de grafite produzindo uma camada de GO mecanicamente muito resistente, podendo ser utilizado para capacitores e substrato de semicondutores. Entretanto, o material resultante possui uma série de grupos funcionais ligados e falhas na rede hexagonal, isso ocorre devido à ação dos oxidantes que causam uma estrutura mineral defeituosa (Camargos; Semmer; Silva, 2020).

4.2.2 Características e propriedades

Atualmente, o modelo do óxido de grafeno mais reconhecido na comunidade científica é o de Lerf-Klinowski (Chua; Sofer; Pumera, 2012 *apud* Smaniotto, 2015). Anton Lerf e Jacek Klinowski publicaram vários artigos relacionados à estrutura do óxido de grafeno. Tais publicações demonstram a estrutura do GO envolvendo regiões aromáticas com anéis benzênicos não oxidados e regiões contendo anéis alifáticos de seis membros (Oliveira *et al.*, 2018). O modelo estrutural de Lerf-Klinowski para o GO está indicado na Figura 1.

Figura 1 – Modelo estrutural do GO

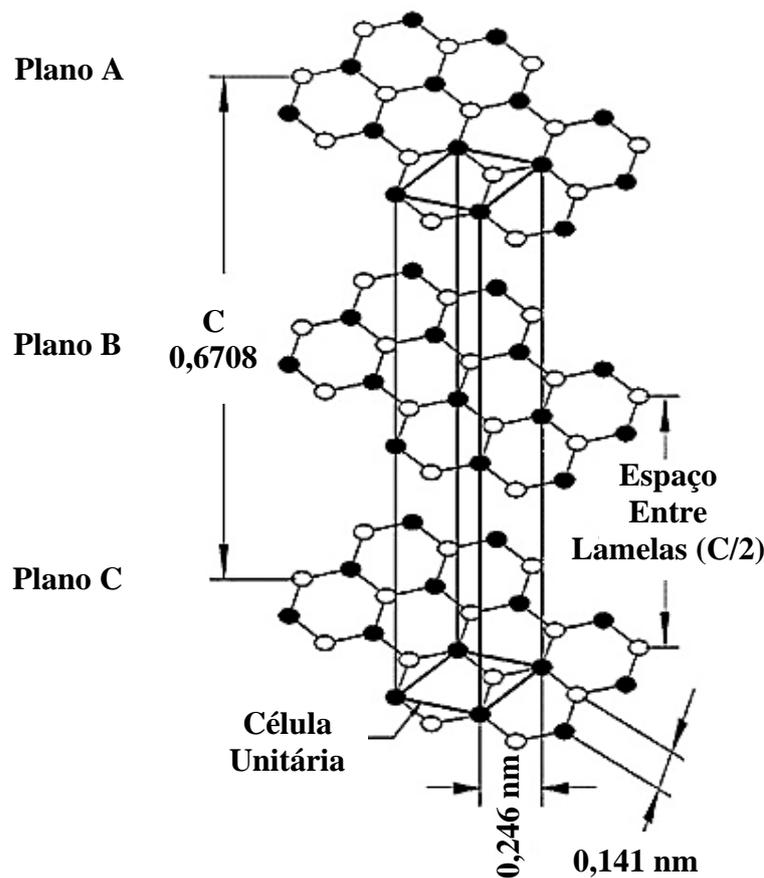


A imagem, popularmente denominada como “estrutura de favo de mel”, trata-se, especificamente, de uma estrutura de carbono hexagonal semelhante à do grafeno, mas que contém grupos, como: hidroxil, epóxi, carbonila e carboxila. sendo OH e COC os grupos dominantes no GO (Pendolino; Armata, 2017 *apud* Smith *et al.*, 2019). Assim, é possível

verificar que a estrutura do GO, conceitualmente, tem o comportamento químico semelhante à do grafeno puro (Eigler; Hirsch, 2014 *apud* Smaniotto, 2015), como pode ser visto na Figura 2.

O grafeno puro é um material de difícil utilização, dado que possui *bottom-up* complexo, baixa solubilidade e aglomeração em solução devido às interações de Van der Waals, uma alternativa para substituí-lo e manter as propriedades vantajosas que ele proporciona é pela utilização de compostos semelhantes à sua estrutura que pudessem ser sintetizados a partir do grafite por um método *top-down*, ao mesmo tempo que permitisse a adesão em sua superfície de grupos de oxigênio (Zhu *et al.*, 2010 *apud* Smith *et al.*, 2019; Niyogi *et al.*, 2006 *apud* Smith *et al.*, 2019; Kuilla *et al.*, 2010 *apud* Smith *et al.*, 2019). Devido a isso, o GO tornou-se um substituto à altura, conseguindo ter, analogamente, as propriedades do grafite, tais como: grande área superficial específica, estabilidade química, excelente condutividade elétrica e térmica, e vultosa capacidade de resistência mecânica. Ainda além, devido a ocorrência de várias ligações π durante a oxidação, torna-se mais favorecido com a propriedade de adsorção (Mcnaught, 2018, *apud* Almeida *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2008 *apud* Smith *et al.*, 2019; Kuilla *et al.*, 2010 *apud* Smith *et al.*, 2019).

Figura 2 – Estrutura de cristal de grafite mostrando a sequência e unidade de empilhamento ABAB e a célula unitária



Fonte: Adaptada de Pierson (1993) *apud* Smaniotto (2015, p. 30).

4.2.3 Aplicações

A partir da literatura referente ao óxido de grafeno, é possível verificar que há numerosas utilizações em várias áreas; dentre elas, é curioso citar: revestimentos condutores transparentes, eletrônicos, células solares, fotocatalisadores, baterias de lítio, membranas adsorventes, uso na medicina (Dideikin; Vul, 2018), e, por fim, sendo a motivação desse trabalho, o óxido de grafeno aplicado em concretos.

Nos revestimentos condutores transparentes, são utilizadas folhas de óxido de grafeno dispersas em água, a fim de fazer parte na produção de um compósito nomeado de diacrilato de polietilenoglicol óxido de grafeno por fotopolimerização. Foi descoberto que as folhas de grafeno sofrem excelente distribuição morfológica dentro do sistema da resina, dando origem a um compósito transparente com propriedades térmicas e eletricamente condutivo em baixas taxas de carregamento (Sangermano *et al.*, 2010).

Nos eletrônicos, há o desenvolvimento de estudos para a aplicação do grafeno em circuitos devido à sua alta condutividade e sintonizabilidade. Pesquisadores estudam a possibilidade de uso do grafeno em um projeto de circuito de micro-ondas como deslocador de fase (Huang *et al.*, 2016).

Nas células solares, o óxido de grafeno reduzido (RGO) tem sido comumente utilizado como aditivo nos dispositivos optoeletrônicos devido suas propriedades; um exemplo é a adição de 6% de RGO em dióxido de titânio mesoporoso (mpTiO_2) para melhorar o desempenho das células solares de perovskita (PSC). A adição de RGO resultou no aprimoramento da estrutura cristalina e na absorbância óptica do filme de perovskita. O transporte de carga também foi aperfeiçoado devido a uma melhor interface entre o contato da perovskita com o titânio mesoporoso. Com esse tratamento, o PSC obteve uma otimização de 14% (Kadhim; Ali; Mohammad, 2021).

Nos fotocatalisadores, o dióxido de titânio (TiO_2) é um dos materiais mais importantes no campo da purificação de águas, não é tóxico e tem baixo custo, tornando-se um dos principais componentes dos novos materiais desenvolvidos. A combinação de TiO_2 com óxido de grafeno (GO) ou óxido de grafeno reduzido (RGO) pode diminuir a taxa de buracos, diminuindo seu gap de energia e melhorando seu desempenho fotocatalítico em águas residuais (Oliveira *et al.*, 2016).

As baterias de lítio à base de grafeno possuem alta condutividade elétrica, pois o grafeno permite que os elétrons se movam livremente, diminuindo a impedância elétrica e a polarização durante o processo eletroquímico. Ainda, durante a inserção do lítio e o esforço sobre o eletrodo,

o inevitável inchaço e flexão podem levar à destruição e pulverização da microestrutura, degradando a estabilidade cíclica e a vida útil da bateria, mas com o comportamento mecânico do grafeno, é possível manter a estabilidade estrutural resolvendo essa problemática (Segundo, 2017).

Nas membranas poliméricas com óxido de grafeno é possível atingir melhor capacidade de adsorção para diferentes contaminantes: medicamentos, pigmentos, surfactantes e produtos de cuidado pessoal. Com isso, verificou-se que a maioria dos poluentes foram adsorvidos pelas membranas, sendo justificado pela solubilidade, hidrofiliabilidade e polaridade desses compostos, podendo, ainda, serem reutilizadas (Zambianchi *et al.*, 2017 *apud* Oliveira, 2018). Na medicina, os materiais à base de grafeno são usados para reparo ósseo ou regeneração de órgãos. Ambos, GO e RGO, são utilizados em células-tronco osteogênicas para estudar condrogênese, adipogênese, gênese epitelial, miogênese, cardiomiogênese e neurogênese.

A presença das enzimas proteolíticas no citoplasma, muitas vezes, interfere no processo de liberação de fármacos. Nesse caso, o GO é usado para a entrega efetiva dessas drogas atuando como carreador. O grupo funcional (COOH e OH) do GO permite que ele se conjugue com vários polímeros e biomoléculas.

Outro uso medicinal do grafeno é para detectar o estágio inicial de células cancerígenas. Ensaio realizado com esferas tumorais mostram que a funcionalidade, bem como a expansão clonal da célula-tronco de câncer, pode ser medida. Ainda, o GO restringe a formação da esfera tumoral de forma eficaz, sendo elas: câncer de ovário, pâncreas, mama, pulmão e glioblastoma. (Priyadarsini *et al.*, 2018).

Como aditivo em concretos, o GO pode atuar da mesma forma que um material de reforço em compósitos cimentícios e melhorar as propriedades mecânicas. Há relatos de aumento da resistência à compressão de 33% e resistência à flexão de 59% pela adição de 0,05% de GO. Isso ocorre devido ao excelente reforço dado pela forte adesão interfacial entre GO e matriz de cimento; as chapas GO evitam a propagação de microfissuras na peça moldada com o compósito (Pan *et al.*, 2015 *apud* Jyothimol *et al.*, 2020).

4.2.4 Impacto ambiental com o uso do GO no concreto

O óxido de grafeno consegue, quando adicionado em determinadas condições no concreto, aumentar a sua resistência mecânica no estado seco. No entanto, no que diz respeito às questões ambientais, ainda não existem definições claras; contudo, é possível considerar a existência de alguns impactos ambientais positivos com essa adição.

Sabendo-se que a aplicação dessa técnica de adição no concreto pode provocar, como afirma Anand, Abraham e George (2016 *apud* Alsaad; Radhi; Taher, 2019), a redução do uso de aço e até mesmo modificar a formulação do cimento, verifica-se, por essa afirmação, que há um fator ambiental importante, visto que quando determinado produto tem o mesmo desempenho com menor consumo de recursos, conseqüentemente menor será a extração de materiais que o compõe, bem como a formação de resíduos e poluentes na extração e no processo produtivo (John *et al.*, 2002 *apud* Vanderlei *et al.*, 2014). Nesse sentido, como o concreto e aço vêm aumentando seu consumo devido ao desenvolvimento econômico dos países, associativamente há o aumento da emissão de grande quantidade de CO₂ na atmosfera, produzidos no processo produtivo de ambos os materiais. As usinas de cimento, por exemplo, são responsáveis por 5% das emissões de CO₂ por ano no mundo (Lopes, 2011); assim, reduzindo o seu uso, reduz-se a emissão do poluente.

Ainda, sobre o impacto ambiental, atualmente sabe-se que o GO não causa riscos naturais significativos, conforme afirma a pesquisa de Castro *et al.* (2017) apresentada no IX Workshop de Nanotecnologia Aplicada ao Agronegócio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). A avaliação de risco ambiental estimada pela exposição ao óxido de grafeno revelou, de acordo com a pesquisa, valores de quociente de risco (RQ) inferiores a 1 (Castro *et al.*, 2017).

4.3 CONCRETOS E O GO: ESTADO DA ARTE

O concreto, como visto anteriormente, é um material composto de agregados e aglutinantes, onde os materiais de ligação são, principalmente, uma combinação de cimento Portland, materiais pozolânicos e água.

A hidratação do cimento gera calor devido à natureza exotérmica do processo, sendo que essa temperatura varia de acordo com parâmetros, tais como: o tipo de cimento, a composição mineralógica, a distribuição de tamanho de partícula, a proporção água/cimento e a temperatura de cura.

No processo de cura do concreto, o gradiente de temperatura entre o núcleo interno e a superfície resulta em tensões que podem exceder a resistência ao esforço à tração do mesmo, levando, naturalmente, ao trincamento térmico. Isso ocorre, pois, parte desse calor liberado é absorvido pelo próprio concreto, elevando a temperatura da mistura (Devasena; Karthikeyan, 2015). Essa condição térmica, de natureza intrínseca do concreto, é nomeada de calor de hidratação. Em geral, essa situação ocorre no sétimo dia, quando as reações internas diminuem

e a temperatura do concreto começa a cair de forma heterogênea (Carneiro; Gil; Campos Neto, 2011).

A diminuição dessa temperatura pode ser mais bem distribuída pela hidratação e/ou melhoramento da dissipação de calor por aumento da condutividade térmica do concreto; com isso, reduz-se a probabilidade de ocorrência de trinca térmica (Devasena e Karthikeyan, 2015; Carneiro; Gil; Campos Neto, 2011). Essas trincas térmicas são responsáveis pela perda de resistência, infiltração de água, lixiviação (dissolução e transporte dos cristais de hidróxidos de cálcio devido à infiltração de água), corrosão da armadura e outras possíveis patologias (Carneiro; Gil; Campos Neto, 2011).

Além dessas situações que envolvem o concreto, devido à perda de resistência à tração na flexão, esse material acaba enfrentando consequências indesejáveis, dado que seu desempenho como um material de construção eficaz, seria o de conseguir sofrer grandes esforços. Por isso, peças moldadas com esse compósito têm a necessidade de reforço auxiliar.

Ao mesmo tempo que há a possibilidade da ocorrência de patologias por consequências naturais que acometem na perda de resistência, cada vez mais está sendo exigido maior robustez do concreto para suportar os esforços, sendo que uma peça de concreto não deve somente ter sua ruptura evitada, como também evitar deformações permanentes, ou seja, nas aplicações das forças ao limite, as deformações devem cessar.

Uma tecnologia que vem emergindo com potencial para superar essas limitações é o concreto de pós reativos (CPR), um material cimentício moldado, no qual as propriedades mecânicas da matriz são melhoradas pela supressão das zonas fracas de transição interfacial normalmente desenvolvidas em torno dos agregados; isso ocorre, devido ao melhor empacotamento das partículas e pelo refinamento da microestrutura da pasta hidratada (Maroliya, 2012).

Outra nova técnica de reforço desenvolvida atualmente é o concreto com óxido de grafeno. Segundo os estudos de Fan (2014) as partículas de grafeno de grau C (GC), as partículas de óxido de grafeno de grau M (GOM), as partículas de grafeno de grau M (GM) e as partículas de óxido de grafeno de grau C (GOC) podem melhorar a resistência compressiva de materiais cimentícios em 19,9%, 13,2%, 11,5% e 10,2%, respectivamente, mais alto do que o concreto convencional. O concreto utilizado na pesquisa de Fan (2014) segue a formulação indicada na Tabela 20 ([Anexo E](#)).

Fan (2014) observou que o GC melhora a capacidade de conservação de água nos materiais cimentícios e, assim, enfraquece a resistência de resfriamento para endurecimento do cimento, enquanto o GOM tem, ligeiramente, essa mesma melhora. Outra observação é a de

que a resistência à corrosão dos materiais cimentícios, em 5 meses, pode ser impulsionada pelo GC e GOM, enquanto pode ser enfraquecido pelo GM. A partir dos dados recolhidos, notou-se que o GC e os GOM aumentam a difusividade térmica do composto de cimento; isso ocorre pela capacidade em dissipar o calor (Fan, 2014).

Segundo as pesquisas de Sedaghat *et al.* (2014), foi observado que a incorporação de 5% de grafeno melhora a difusividade térmica em 25% a 25°C, e cerca de 30% a 400 °C, em comparação com a pasta de cimento pura ou o composto de grafeno a 1%. A mistura contendo 10% de grafeno mostra uma melhora significativa na difusividade térmica de cerca de 75% a 25 °C e 60% a 400 °C.

A melhoria da difusividade térmica das pastas cimentícias reduz o gradiente de temperatura, efeito esse que ocorre devido à hidratação da massa do concreto. Isso pode, conseqüentemente, reduzir o potencial de ocorrer fissuras térmicas em elementos maciços de concreto, melhorando, assim, a integridade térmica e a durabilidade das estruturas.

O impacto incremental do grafeno na condutividade elétrica dos compósitos indica o potencial de seu uso em aplicações onde a dissipação eletrostática (ESD) de carga é desejável (Sedaghat *et al.*, 2014). A Tabela 21 ([Anexo E](#)) mostra as propriedades de condutividade elétrica do compósito grafeno-cimento hidratado.

Por meio das análises de Babak *et al.* (2014), a argamassa de cimento contendo 1,5% em peso de GO atinge um ponto de gel de hidratos do silicato de cálcio (C-S-H): esse produto é o mais desejável na hidratação do cimento. Além da aumenta, respectivamente, com a cura devido à formação de cristais. O teor de óxido de grafeno até um máximo de 2% tem a resistência à compressão aumentada em 57% depois de 28 dias. Quando utilizado um teor maior de GO, comparando com a amostra de controle, aos 28 dias, tem-se um declínio da resistência a compressão, conforme já mostrado na Tabela 18 ([Anexo C](#)).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada para a realização desse estudo foi baseada em pesquisas bibliográficas sobre o tema proposto, com a finalidade de obter uma melhor compreensão a respeito das características e do funcionamento do concreto com a adição de óxido de grafeno.

Em uma etapa subsequente, foram conduzidos testes de caracterização dos materiais usados na produção do CPR dessa pesquisa, sendo esses materiais:

- a) cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI) produzido pela Lafarge Holcim (Brasil) S.A., com características presentes na Tabela 23 ([Anexo F](#));
- b) areia média normal destinada à execução do ensaio de determinação da resistência à compressão do cimento segundo a ABNT NBR 7214/2015 (Areia normal para ensaio de cimento - Especificação) embalada pela empresa Gato Neves;
- c) pó de quartzo processado pelo Beneficiamento de Minérios Rio Claro Ltda, tendo suas análises granulométrica e química expressa na Tabela 24 ([Anexo F](#));
- d) sílica ativa obtida pelo processamento do silício metálico, transformado em pó fino pulverizado pela Tecnosil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda, com sua caracterização apresentada na Tabela 25 ([Anexo F](#));
- e) aditivo superplastificante de terceira geração PCE (éter policarboxilato) Glenium 51, produzido pela empresa BASF S.A. e distribuído pela NTC Brasil Ltda, com os dados técnicos apresentados na Tabela 26 ([Anexo F](#));
- f) óxido de grafeno produzido pelo CTNano/UFMG, Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno da Universidade Federal de Minas Gerais, com seus aspectos descritos na Tabela 27 ([Anexo F](#)).

Alguns valores de testes de caracterização dos materiais foram extraídos do trabalho de Oliveira (2022), membro do grupo de pesquisa sobre concreto do PPGCEM UNIFAL - MG, *campus* Poços de Caldas - MG, que utilizou os mesmos materiais para a produção do CPR que essa pesquisa utiliza. Outros valores foram obtidos por meio de testes realizados no Laboratório de Ciências das Engenharias da UNIFAL - MG e no Laboratório de Ciências da Terra (Multiusuário III) da UNIFAL - MG, *campus* Poços de Caldas - MG; em ambos os casos com o intuito de obter valores referentes a caracterização do agregado miúdo: granulometria, massa específica, absorção de água, densidade, umidade, inchamento, massa unitária, índice de vazios, perda ao fogo e microscopia óptica.

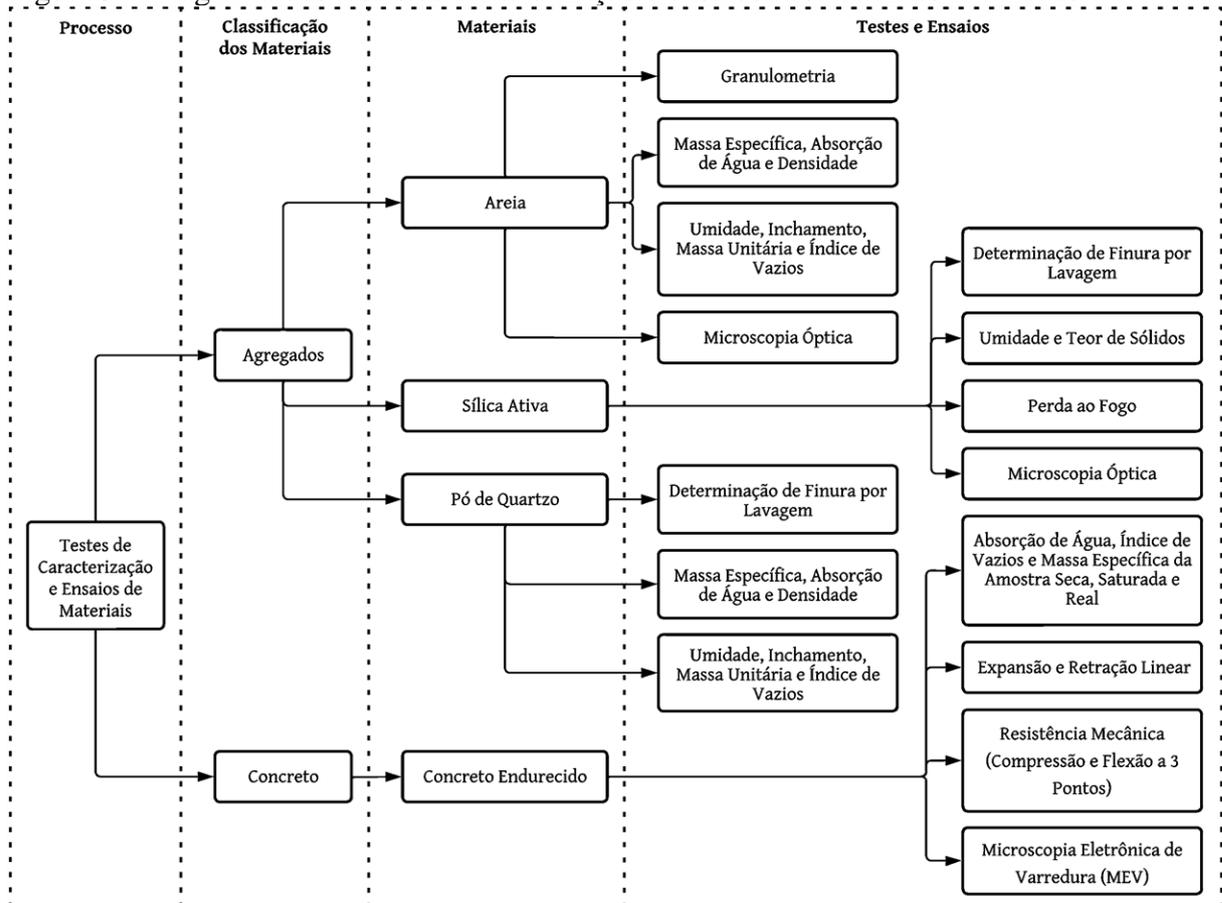
Após a caracterização das matérias-primas constituintes do concreto, em especial o miúdo, foi feito um estudo visando a seleção da melhor formulação a ser adotada no procedimento experimental sequencial.

Foram investigadas três formulações, sem GO, sendo elas desenvolvidas por Cwirzen, Penttala e Vornanen (2008); Vanderlei e Giongo (2006); e a utilizada por Oliveira (2022); selecionando, então, a partir dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, realizado no Centro Cerâmico do Brasil - CCB, em Santa Gertrudes - SP, a formulação mais adequada para o prosseguimento da pesquisa, levando em consideração a propriedade de resistência à compressão mais acentuada, menor dispersão desses resultados e melhor controle estatístico entre um grupo de amostras de uma mesma formulação.

A partir dessa formulação (denominada padrão), a qual foi preparada em argamassadeira de movimento planetário no Laboratório de Edificações do Instituto Federal do Sul de Minas Gerais (IFSULMINAS), *campus* de Poços de Caldas, foram realizados novos ensaios no concreto, como indicado na Figura 3, variando-se o teor de GO presente nas formulações. Dos ensaios realizados, os de resistência mecânica a flexão e compressão foram executados no Centro Cerâmico do Brasil (CCB); a microscopia eletrônica de varredura (MEV), no Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo (IQSC USP); e os demais ensaios (absorção de água, índice de vazios, massa específica da amostra seca, saturada e real, expansão e retração linear), no Laboratório de Ciências das Engenharias da UNIFAL - MG.

Os testes de caracterização dos materiais, bem como os ensaios realizados no concreto, estão apresentados no diagrama de árvore (Figura 3) para simplificar a visualização das atividades referentes à pesquisa.

Figura 3 – Diagrama dos testes de caracterização e ensaios dos materiais realizados



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Por último, foi realizada a análise dos dados obtidos pela pesquisa laboratorial por meio de gráficos e tabelas, comparando com resultados já demonstrados em outras pesquisas; como ainda foi feita a apuração desses dados pelos métodos estatísticos (ANOVA e Teste de Tukey); para o exame de imagens, foi feito o uso de softwares de manipulação.

Todas essas etapas possibilitaram o estudo mais detalhado do comportamento do CPR com a adição de GO por meio da investigação de suas características, como também das propriedades físicas e químicas, verificando a viabilidade de aplicação na construção civil que demande alta resistência mecânica.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

5.1.1 Caracterização do agregado miúdo

O agregado é um material particulado de tamanhos variados, não coesivo, com atividade química inerte, comumente divididos em dois grupos, miúdos e graúdos, tamanhos que podem ser consultados no subcapítulo sobre “Granulometria” desse capítulo, também podem ser

classificados conforme seu peso específico aparente e sua origem, natural ou industrializado. A caracterização do agregado é indispensável no estudo do concreto, visto que 70% a 80% do volume do concreto é constituído por ele (Bauer, 2000).

Para a caracterização do agregado miúdo são realizados testes específicos; a saber: granulometria, umidade do agregado, massa específica, absorção de água e inchamento.

5.1.1.1 Granulometria

O conhecimento do tamanho das partículas e da distribuição delas é um pré-requisito para a maioria das operações de produção que utilizam agregados (areia, sílica ativa) como um dos materiais, visto que o tamanho e distribuição dos grãos tem efeito significativo na resistência mecânica, densidade e outras propriedades do objeto acabado. O tamanho e a distribuição granulométrica podem ser determinados usando vários instrumentos disponíveis comercialmente ou projetados para operações em ambientes muito específicos (Jillavenkatesa; Dapkunas; Lum, 2001). Esse trabalho, como pode ser visto no capítulo sobre “Materiais e Métodos”, faz uso de agregados miúdos, sendo necessária, assim, a análise granulométrica do material.

No Brasil, o método para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos está definido na ABNT NBR 17054/2022 (Agregados - determinação da composição granulométrica), que normatiza o teste feito por peneiramento utilizando agitadores eletromagnéticos de peneira ou mesa vibratória de peneira. Ambos os equipamentos são utilizados para agitar um conjunto de peneiras empilhadas, essas que estão classificadas na própria NBR em questão, embasada, para isso, nas normas NM-ISO 3310-1 ou 2 (Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação). A classificação dessas peneiras encontra-se na Tabela 28 ([Anexo G](#)).

5.1.1.2 Massa específica

Segundo a ABNT NBR NM 52/2002 (Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente) define-se como massa específica a relação entre a massa do agregado seco e seu volume.

O ensaio é realizado inicialmente com a coleta de amostras conforme define a ABNT NBR 16915/2021 (Agregados - Amostragem), em seguida é feita a pesagem de uma amostra (m_s), em torno de 500g, seguida da inserção dessa em um frasco de Erlenmeyer com tampa, de

modo a completá-lo com água até 500 ml; em seguida, coloca-se em um banho mantido a temperatura entre 18 °C e 23 °C por uma hora. A seguir, a amostra é retirada do frasco, seca entre 100 °C e 110 °C e resfriada, pesando-a novamente de modo a obter-se a massa seca (m). O cálculo da massa específica (d) é obtido a partir da equação (1):

$$d\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (1)$$

Em que V é o volume do frasco, em centímetros cúbicos, V_a é o volume de água adicionada ao frasco após o banho, em centímetros cúbicos e ρ_a a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico (ABNT NBR NM 52, 2002).

5.1.1.3 Absorção de água e densidade

A determinação da absorção de água e densidade do agregado miúdo, destinado ao uso em concreto, é normatizada pela ABNT NBR 16916/2021 (Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água). O ensaio consiste na colocação de 2,5 kg da amostra preparada conforme a ABNT NBR 16915/2021 (Agregados - Amostragem), em uma bandeja metálica, formando um lastro de camada delgada. Cobre-se a amostra com água, deixando-a assim durante 24 horas. Retira-se o material da água e coloca-se sobre uma superfície plana para secagem.

Em um primeiro processo, toma-se 500 g da amostra preparada na condição saturada com superfície seca (m_B), deposita-se a amostra em um picnômetro com capacidade de (500 ± 25) ml (V) que possua uma tampa com entrada para termômetro. Enche-se o frasco com água até a marca de 500 ml, colocando-o em um banho mantido à temperatura constante entre 21 °C e 25 °C.

Após uma hora, é possível observar que a água irá ter abaixado da marca de 500 ml no picnômetro; desse modo, completa-se com água até a marca de 500 ml, verificando o quanto de água foi utilizada para completar a marca desejada (V_a).

Em um segundo processo, toma-se 500 g dos 2,5 kg de amostra preparada, faz-se uma camada delgada com ela sobre uma bandeja, secando-a entre 100 °C e 110 °C, até atingir a massa constante. Esfria-se à temperatura ambiente e determina-se a massa da amostra seca (m_A).

Assim, é possível ter os valores necessários para saber a porcentagem de absorção de água pelo agregado (*Abs*), dada pela equação (2):

$$Abs (\%) = \frac{m_B - m_A}{m_A} \cdot 100 \quad (2)$$

Também, é possível encontrar a densidade do agregado na condição seca (ρ_s), determinada a partir da equação (3):

$$\rho_s \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{m_A}{V - V_a} \quad (3)$$

A densidade do agregado na condição saturada com superfície seca (ρ_{sss}) também pode ser calculada a partir da equação (4) (ABNT NBR 16916, 2021):

$$\rho_{sss} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{m_B}{V - V_a} \quad (4)$$

5.1.1.4 Umidade, inchamento, massa unitária e índice de vazios

Define-se como umidade do agregado a relação da massa de água contida no mesmo e sua massa seca expressa em porcentagem. Essa determinação é de muita importância, pois a água contida na superfície dos grãos de um agregado influencia na quantidade de água que será necessária adicionar em um concreto para proporcionar a trabalhabilidade adequada e a resistência estabelecida no processo de dosagem (Bohn *et al.*, 2011; Vitali, 2018). A coleta da amostra dos agregados e a redução para ensaio dever ser realizada conforme a ABNT NBR 16915/2021.

O ensaio para análise de umidade e inchamento inicia-se com a secagem do agregado até a massa constante, em uma estufa mantida entre 100 °C e 110 °C, seguido de resfriamento até a temperatura ambiente. Posteriormente, adiciona-se água em quantidades sucessivas, de modo a obter teores de umidade próximos aos seguintes valores, 0,5%, 1%, 2%, 4%, 5%, 7%, 9% e 12%. Para cada teor, retira-se uma porção da amostra a fim de preencher uma cápsula com tampa de cerca de 50 cm³ e outra porção para determinar a massa unitária do agregado inchado em acordo com a norma de Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT NBR 6467, 2006).

As cápsulas, previamente pesadas enquanto vazias, contendo o agregado com diferentes teores de umidade, são colocadas em estufa e mantidas entre 100 °C e 110 °C para secagem até massa constante. Após resfriadas, determina-se a massa.

O teor de umidade (h) do agregado é calculado pela equação (5). Por fim, calcula-se o coeficiente de inchamento $\left(\frac{V_h}{V_s}\right)$ conforme a equação (6):

$$h (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_f - m_c} \quad (5)$$

Em que m_i é a massa inicial da cápsula com o material ensaiado, em gramas; m_f é a massa da cápsula com o material após a secagem, em gramas e m_c é a massa da cápsula, em gramas.

$$\frac{V_h}{V_s} = \frac{\gamma_s}{\gamma_h} \cdot \left(\frac{100 + h}{100}\right) \quad (6)$$

Em que V_h é o volume do agregado com um determinado teor de umidade, em centímetros cúbicos; V_s é o volume do agregado seco em estufa, em centímetros cúbicos; γ_h é a massa unitária do agregado com um determinado teor de umidade, em gramas por centímetro cúbico e γ_s é a massa unitária do agregado seco em estufa, em gramas por centímetro cúbico (ABNT NBR 6467, 2006).

Para encontrar a massa unitária, utiliza-se da ABNT NBR 16972/2021 (Determinação da massa unitária e índice de vazios.). Começa-se o ensaio de determinação da massa unitária secando-se 10 dm³ de agregado até a massa constante, em temperatura entre 100 °C e 110 °C. Toma-se um recipiente de 10 dm³ (V), determina-se sua massa enquanto vazio (m_r), enche-o com o material, nivela-se a camada e determina-se a massa do recipiente com o conteúdo (m_{ar}). A massa unitária (γ_h) é calculada a partir da equação (7) (ABNT NBR 16972, 2021):

$$\gamma_h \left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (7)$$

Observa-se que, utilizando a massa unitária no cálculo de inchamento, esse solicita, além da massa unitária do agregado seco em estufa, também a massa unitária do agregado com um determinado teor de umidade; para o segundo, basta obter teores de umidade próximos aos

seguintes valores, 0,5%, 1%, 2%, 4%, 5%, 7%, 9% e 12% no material seco e pesar o recipiente com o conteúdo úmido.

O índice de vazios nos agregados refere-se ao espaço entre as partículas de uma massa de material (ABNT NBR 16972, 2021). O agregado pode conter água internamente com base na porosidade e externamente, denominada de umidade superficial. Isso dá ao agregado a característica da absorção de água no corpo das partículas ou retenção na sua superfície, como um filme de umidade. Dessa forma, faz-se com que haja a redução de água disponível para hidratação, ainda, se o agregado estiver muito úmido, adicionar água na mistura de cimento pode acarretar um excesso (Camp, 2002). Desse modo, saber o índice de vazios no agregado auxilia na correção da quantidade de água no concreto.

Para encontrar o índice de vazios (E_v), segue-se a equação (8), presente na ABNT NBR 16972/2021 (Determinação da massa unitária e índice de vazios.).

$$E_v = \frac{100 [(d_1 \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 \rho_w} \quad (8)$$

Sendo d_1 a densidade do agregado seco, em quilogramas, determinada segundo a ABNT NBR 16916/2021 (Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água); ρ_w a densidade da água, em quilogramas por metro cúbico e ρ_{ap} a densidade média do agregado, em quilograma por metro cúbico.

5.1.1.5 Determinação de finura por lavagem

Quando se analisa a granulometria de um material muito fino, tais como o pó de quartzo e a sílica ativa, pode ocorrer uma absorção da umidade do ar. A consequência da absorção da umidade é a de que as partículas do material se aderem umas às outras, por conta da umidade, formando aglomerados, o que comprometeria uma análise granulométrica a seco. Nesse caso, é feito o peneiramento com auxílio da lavagem em fluxo contínuo de água.

Para esse trabalho, foram utilizadas duas normas, a ABNT NBR 16973/2021 (Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 μm por lavagem), que trata da análise granulométrica de materiais finos utilizados como agregado no concreto - no caso dessa pesquisa, o material com essa característica é o pó de quartzo. A outra norma é a ABNT NBR 13956-4/2012 (Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 4: Determinação da finura por meio da peneira 45 μm).

O procedimento, de acordo com a ABNT NBR 16973/2021 (Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 μm por lavagem), inicia-se pesando 300 g do material (pó de quartzo). Após secagem em temperatura entre 100 °C e 110 °C, determina-se a massa do material (m_i). Em seguida, coloca-se o material sobre a peneira com abertura de malha de 75 μm e faz-se a lavagem com fluxo de água contínuo, deixando a água verter pela peneira até que a coloração do líquido fique límpida. O material que ficou retido na peneira é, então, colocado em estufa, em temperatura entre 100 °C e 110 °C, durante uma hora e, após resfriado, é pesado (m_f).

Já a norma ABNT NBR 13956-4/2012 envolve a pesagem de 5 g (m_i) de sílica ativa; após, passa-se em peneira com malha de 45 μm com lavagem por um fluxo de água contínuo, até que a coloração do líquido fique límpida. O material que ficou retido na peneira é, então, colocado em estufa em temperatura entre 100 °C e 110 °C, durante uma hora e, após resfriado, é pesado (m_f).

A quantidade percentual de material que passa (m) pela peneira é calculada pela seguinte equação (9) (ABNT NBR 13956-4, 2012):

$$m(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (9)$$

5.1.1.6 Umidade e teor de sólidos

Com base na ABNT NBR 13956-2/2012 (Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 2: Ensaios químicos), o teor de umidade refere-se à relação da quantidade de massa de água

, presente no material, com a sua massa seca, igualmente como é feito com outros agregados, por exemplo, a areia.

Parte-se de 5 g de amostra (m), colocando-a em uma cápsula de porcelana e aferindo a massa do conjunto (m_1). Após secagem em estufa na temperatura entre 100 °C e 110 °C, por uma hora, e posterior resfriamento, pesa-se novamente o conjunto (m_2). O teor de umidade (U) é calculado segundo a equação (10):

$$U(\%) = \frac{(m + m_1) - m_2}{m} \cdot 100 \quad (10)$$

O teor de sólidos presente na amostra, segundo a norma, tem uma simples relação com o teor de umidade, pois se refere à massa restante sem a presença de umidade, ou seja, o percentual de massa seca da amostra (S), expressa pela equação (11) (ABNT NBR 13956-2/2012):

$$S(\%) = 100 - U \quad (11)$$

5.1.1.7 Perda ao fogo

Conforme ABNT NBR 13956-2/2012 (Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 2: Ensaio químicos), como já dito anteriormente, tem como um dos testes a perda ao fogo. Esse ensaio permite identificar a porcentagem de massa perdida depois de passar por um processo térmico, devido à volatilização de compostos como matéria orgânica e perda de água.

A presença de matéria orgânica nos materiais que constituem o concreto causa o retardamento, significativamente, do endurecimento do mesmo, atrasando as reações químicas do processo de cura; outrossim, quando esse material orgânico entra em decomposição, cria compostos que danificam a liga do compósito (Clare; Sherwood, 1954).

Para realizar o ensaio, é pesado 1 g de amostra (m_3) que, após seca em estufa entre 100 °C e 110 °C, é colocada em um cadinho de porcelana previamente tarado (m_4). O conjunto cadinho e amostra é levado para um forno a uma temperatura entre 900 °C e 1000 °C, por um período de 50 minutos. Uma vez resfriado o sistema, pesa-se a amostra (m_5). A perda ao fogo (PF) é calculada pela equação (12):

$$PF(\%) = \frac{(m_3 + m_4) - m_5}{m_3} \cdot 100 \quad (12)$$

5.1.1.8 Microscopia óptica (MO)

Para a realização de uma análise de microscopia óptica apenas na morfologia dos agregados, não existe uma norma específica. No entanto, pode-se utilizar uma norma que faça referência a uma determinada análise que utilize o MO como ferramenta, por exemplo, a ASTM C457/C457M (2017) (*Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters*

of the Air-Void System in Hardened Concrete), que determina a microscopia de parâmetros do vazio aéreo em concreto endurecido. Contudo, sabe-se que a MO é aconselhada pela própria ASTM para o exame petrográfico de agregados para concreto, conforme afirma a ASTM C295/C295M (2019) (*Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete*).

5.1.2 Caracterização do concreto

Os ensaios adotados nesse estudo para investigar o concreto foram: resistência mecânica (compressão e flexão a 3 pontos), absorção e índice de vazios, durabilidade e inchamento (expansibilidade).

5.1.2.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica da amostra seca, saturada e real

Os vazios são espaços decorrentes da presença de ar ou microfissuras, permitindo a entrada de água no concreto e fragilizando-o. Logo, dada essa condição, quanto menor o índice de vazio, maior o ganho de resistência e menor consumo de cimento na massa (ISAIA, 2017).

De acordo com a ABNT NBR 9778/2005 (Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica), que visa a determinação da absorção de água e do índice de vazios por imersão e fervura, deve-se, inicialmente, seguir a ABNT NBR 16886/2020 (Concreto - Amostragem de concreto fresco) (ABNT NBR 9778, 2005) para a conformação do corpo.

Antes de o molde ser preenchido pela massa, deve-se revesti-lo internamente com uma fina camada de óleo mineral ou outro lubrificante que não reaja com o cimento (ABNT NBR 5738, 2015). Para o teste de absorção de água e índices de vazios, é necessária uma quantidade mínima de concreto no corpo de 1500 cm³ (ABNT NBR 9778, 2005).

A primeira camada do molde tem que ser atravessada em toda sua espessura pela haste, quando adensada, evitando-se golpear a base do molde. Cada uma das camadas seguintes também precisa ser adensada em toda sua espessura, fazendo com que a haste penetre aproximadamente 2 cm na camada anterior. Após a moldagem, é feita a cura inicial por, pelo menos, 24 horas para os corpos de prova cilíndricos e 48 horas para os prismáticos.

Após a cura inicial, os corpos carecem ser armazenados, até o momento do ensaio, em solução saturada de hidróxido de cálcio, à temperatura entre 21 °C e 25 °C, ou em câmara úmida com a mesma temperatura da solução saturada, e com umidade do ar superior a 95% (ABNT NBR

5738, 2015).

A execução do ensaio inicia-se com a secagem da amostra e determinação de sua massa na condição seca (m_s), em gramas, colocando-a na estufa e mantendo-a à temperatura entre 100 °C e 110 °C por um período de 72 horas. Esse processo define a massa do material na condição seca. Por conseguinte, realiza-se a saturação da amostra e determina-se sua massa na condição saturada e imersa. Mergulha-se a amostra em água à temperatura de 21 °C a 25 °C, mantendo-a durante 72 horas nessa condição. Após, coloca-se a amostra em um recipiente de água e leva-a à ebulição durante 5 horas. Em seguida, deixa-se a água esfriar até a temperatura entre 21 °C e 25 °C; determina-se, assim, a massa, em gramas, com auxílio de uma balança hidrostática (m_i). Retira-se a amostra da água e enxuga-a com pano úmido; após, determina-se a sua massa (m_{sat}), em gramas. A absorção de água (A), em porcentagem, é dada pela expressão (13):

$$A(\%) = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (13)$$

O cálculo de índice de vazios (I_v), em porcentagem, é dada pela expressão (14):

$$I_v(\%) = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad (14)$$

Das análises anteriores sobre absorção de água e índice de vazios, é possível encontrar a massa específica da amostra seca (ρ_s), em gramas por centímetro cúbico, pela relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis, seguindo a expressão (15):

$$\rho_s \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot \gamma_{\text{Água}} \quad (15)$$

A massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}), em gramas por centímetro cúbico, é obtida a partir da relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis seguindo a expressão (16):

$$\rho_{sat} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \cdot \gamma_{\text{Água}} \quad (16)$$

Por fim, concebe-se o encontro da massa específica real (ρ_r), em gramas por centímetro cúbico, dada pela relação entre a massa do material seco e o volume, excluindo os poros permeáveis, seguindo a expressão (17):

$$\rho_r \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{m_s}{m_s - m_i} \cdot \gamma_{\text{Água}} \quad (17)$$

5.1.2.2 Determinação da retração hidráulica

A ABNT NM 131/1997 (Concreto endurecido - Determinação da retração hidráulica ou higrométrica do concreto), define a redução volumétrica ocorrida no concreto no seu processo de cura e pós cura.

O primeiro passo para o processo de teste é a montagem da amostra seguindo a ABNT NBR 16886/2020 (Concreto - Amostragem de concreto fresco). Após 24 horas da moldagem dos corpos de prova, remove-se dos moldes e coloca-os em um recipiente com água à temperatura de $(23 \pm 0,5)^\circ\text{C}$, por 30 minutos. Retire-se e faz a leitura inicial (ΔL_i). Após a leitura, estoca-se os corpos de prova em recipiente com água saturada de cal até 28 dias.

Ao fim do período de cura, toma-se a segunda medida de comprimento, e após, aos 3 dias, 7 dias, 28 dias, 3 meses, 6 meses, 9 meses e 12 meses (ΔL_x). Para calcular a variação de comprimento de cada corpo (ΔL_i), em porcentagem, utiliza-se a equação (18).

$$\Delta L_i(\%) = \frac{\Delta L_x - \Delta L_i}{L_g} \cdot 100 \quad (18)$$

Sendo L_g o comprimento, em *cm*, do molde do corpo de prova.

5.1.2.3 Resistência mecânica (compressão e flexão a 3 pontos)

O ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos inicia-se pelo preparo dos corpos que toma como base a ABNT NBR 5738/2015 (Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova).

Após o processo de formação das amostras e a cura inicial, é necessária a continuidade do processo de cura dos corpos de prova. Para isso, a ABNT NBR 5739/2018 (Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos) solicita que seja seguida a ABNT NBR

9479/2006 (Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova), que define dois modos de cura: ou por câmara úmida, ou em tanque de cura. Essa pesquisa utilizou-se do tanque de cura; ou seja, um reservatório com água potável não corrente, saturada de cal, protegida de raios solares e contaminações, com temperatura controlada entre 21 °C e 25 °C.

Os corpos de prova precisam ser rompidos à compressão em uma dada idade específica (7, 14 e 28 dias), com as tolerâncias de tempo descritas na Tabela 29 ([Anexo G](#)), tendo que garantir o nivelamento das faces das bases dos corpos para realizar o ensaio em questão.

A resistência à compressão (f_c), em Megapascal, é calculada pela expressão (19), sendo F a força máxima alcançada, em newtons e D o diâmetro do corpo de prova, em milímetros.

$$f_c(MPa) = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad (19)$$

Caso a relação altura/diâmetro (h/d) dos corpos de prova tenha valor menor que 1,94, multiplica-se a força F pelo fator de correção, conforme apresenta a Tabela 30 ([Anexo G](#)).

Para determinar a resistência à flexão, utiliza-se o ensaio de tração na flexão a três pontos em corpos de prova prismáticos, conforme descrito na ABNT NBR 12142/2010 (Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos).

Inicia-se com a produção dos corpos de prova conforme a ABNT NBR 5738/2015 (Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova). O processo de cura das amostras deve seguir a norma ABNT NBR 9479/2006 (Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova).

A resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$), em Megapascal, é calculada de acordo com a equação (20):

$$f_{ct,f}(MPa) = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (20)$$

Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância desse não superior a 5% da dimensão do vão entre os apoios, calcula-se a resistência pela expressão (21), sendo F a força máxima registrada na máquina de ensaios, em newtons; l a dimensão do vão entre apoios, em milímetros; b a largura média do corpo de prova, em milímetros; d a altura média do corpo, em

milímetros e a a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em milímetros (ABNT NBR 12142, 2010).

$$f_{ct,f}(MPa) = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot d^2} \quad (21)$$

5.1.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Segundo a ASTM C1723/2022, a microscopia eletrônica de varredura é definida como um método capaz de produzir imagens de alta resolução de superfície de amostras, fornecendo imagens que podem variar em escala de baixa ampliação (15x) a alta ampliação (50000x ou mais). No concreto, essa análise é possível ser feita em amostras, fragmentos, superfícies polidas ou pós. Essas imagens fornecem informações sobre variações composicionais ou topográficas.

5.2 TÉCNICAS ESTATÍSTICAS PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Ao avaliar uma série de valores amostrais que resultam em médias, como a resistência à compressão do concreto, a resistência à flexão ou a retração hidráulica, é importante o emprego da análise estatística, visto que isso permite verificar se existe, ou não, uma diferença significativa entre as médias dos resultados obtidas. Uma ferramenta estatística possível de ser adotada para essa verificação é a análise de variância (ANOVA), a qual compara as médias de três ou mais grupos para determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre eles, procurando determinar se as discrepâncias observadas nas médias ultrapassam o que seria esperado. Essa técnica é frequentemente aplicada em estudos experimentais, com o intuito de testar a hipótese nula, a qual afirma não haver diferenças significativa entre os grupos analisados, ou melhor dizendo, que esses grupos não são indissociáveis.

A ANOVA engloba diferentes modalidades, como a de um fator, considerando apenas uma variável independente, e a de dois fatores, contemplando duas variáveis independentes, entre outras. Cada uma dessas variações é adaptada para os cenários específicos de análise estatística, proporcionando uma gama diversificada de aplicações (Jasrai, 2020; Rutherford, 2011).

A interpretação desse método estatístico considera dois fatores. Primeiramente, escolhe-se um nível de significância, ou seja, a probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando, na

verdade, ela é verdadeira. O nível de significância é representado por α , sendo comum nas pesquisas o uso da probabilidade de 5% para rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira. Desse modo, se o resultado do teste (ρ) estiver abaixo do nível de significância (α), então a hipótese nula é rejeitada em favor da hipótese alternativa.

Outro fator analisado é a chamada estatística F , que se refere à diferença da variância dentro do grupo e a variância entre os grupos. O resultado é um valor que permite concluir se a hipótese nula é suportada ou rejeitada. Quando há diferença entre os grupos, a hipótese nula - aquela que sugere que não existe relação entre os grupos em estudo - é rejeitada. Isso ocorre quando $F > F_{\text{Fisher-Snedecor}}$, sendo que os valores de $F_{\text{Fisher-Snedecor}}$ são facilmente encontrados em tabelas estatísticas sobre a distribuição F .

Após a realização da ANOVA e a constatação da existência de uma diferença estatisticamente significativa, busca-se a identificação dos grupos específicos que diferiram entre si, o que é feito comumente por meio do teste de Tukey, comparando-se todos os pares de médias analisadas (Tabachnick; Fidell, 2012).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS

6.1.1 Testes de caracterização da areia

6.1.1.1 Granulometria

O ensaio granulométrico foi realizado seguindo a ABNT NBR 17054/2022 (Agregados - determinação da composição granulométrica).

A areia testada pertence à classificação de agregado médio e fino misturados; ou seja, varia, de acordo com ABNT NBR 6502/2022, entre 0,06 mm e 0,2 mm (areia fina) e 0,2 mm e 0,6 mm (areia média).

A afirmação prévia sobre a granulometria da areia se dá devido a duas condições: a primeira, pela compra da areia embalada e comercializada pela empresa Gato Neves, vendida como areia média. Por conseguinte, corroborando para que a areia possuísse a granulometria para ser classificada como média e com a menor quantidade de impurezas, foi realizado o processo de passagem por peneira com abertura de malha de 0,6 mm. Na realização do ensaio, foram escolhidas quatro séries de peneiras, sendo elas: 30, 60, 100 e 270 e o fundo para recolher os grãos com finura menor que 0,05 mm. Os resultados obtidos por meio do ensaio com peneiramento mecânico em um agitador eletromecânico estão apresentados na Tabela 33 (Apêndice A).

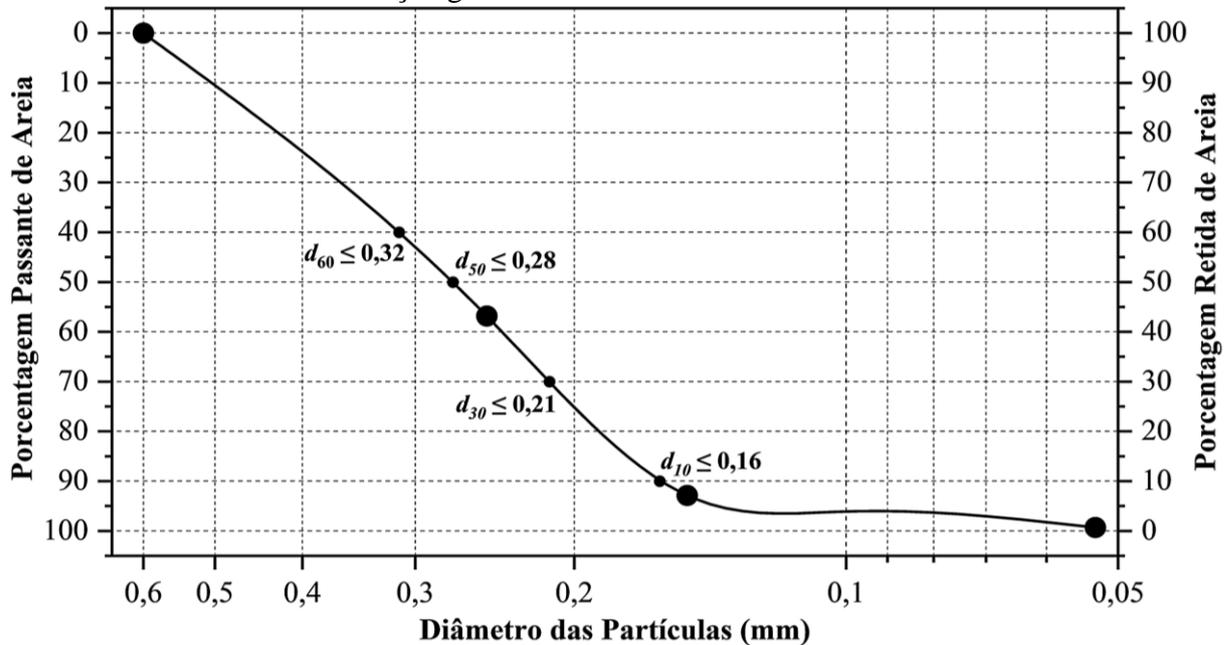
A quantidade da amostra obtida para análise e o total peneirado teve uma perda 0,24%, estando de acordo com a ABNT NBR 17054/2022 (Agregados - determinação da composição granulométrica), a qual limita a perda em 0,3%. O módulo de finura obtido de 1,56 também está em conformidade à norma ABNT NBR 7211/2022 (Agregados para concreto - especificações), que pode variar entre 1,55 e 2,20.

O diâmetro máximo obtido foi de 0,6 mm; tendo em conta que a areia foi passada por peneira com abertura de 0,6 mm, logo não deveriam estar presentes grãos com diâmetros maiores ou iguais a esse, visto que os mesmos foram descartados por ficarem retidos no peneiramento do material. Contudo, é importante salientar que no processo de peneiramento manual é feito sobre o lastro do agregado uma força manual, provocando a passagem forçosa das partículas.

Por meio do ensaio granulométrico, foi possível estimar o diâmetro das partículas presentes na amostra e, ao mesmo tempo, ter ciência da quantidade percentual de material que ficou retido em determinada peneira. Esses valores de massa de material retido nas peneiras podem ser expressos graficamente, conforme apresenta o Gráfico 1, com a abcissa

representando o diâmetro e duas ordenadas, uma com a porcentagem do material passante e a outra do material retido.

Gráfico 1 – Curva de distribuição granulométrica da areia



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Partindo dos valores de d_{10} que se refere o diâmetro máximo dos 10% de areia retida demonstrado na curva de distribuição granulométrica; d_{30} que se refere ao diâmetro máximo dos 30% de areia retida demonstrada na curva; d_{60} que se refere ao diâmetro máximo dos 60% de areia retida demonstrado na curva; pode-se calcular o coeficiente de uniformidade e o coeficiente de curvatura.

O coeficiente de uniformidade (C_u) é dado pela expressão (22):

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (22)$$

De acordo com a ASTM D2487/2017, se $C_u < 6$, a areia deve ser considerada não uniforme; ou seja, para o material analisado, as partículas não têm tamanhos próximos, o que foi observado no ensaio, visto que o seu $C_u = 2$.

O coeficiente de curvatura (C_c) pode ser obtido a partir da relação (23):

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \quad (23)$$

Para essa areia o coeficiente de curvatura é $C_c = 0,86$. Quanto maior o coeficiente de curvatura, mais uniforme o material tende a ser na região central da curva de distribuição granulométrica. Nesse sentido, conforme a ASTM D2487/2017, a distribuição do tamanho de partículas da areia não é tão estreita como o desejado, visto que $C_c < 1$ ou $C_c > 3$.

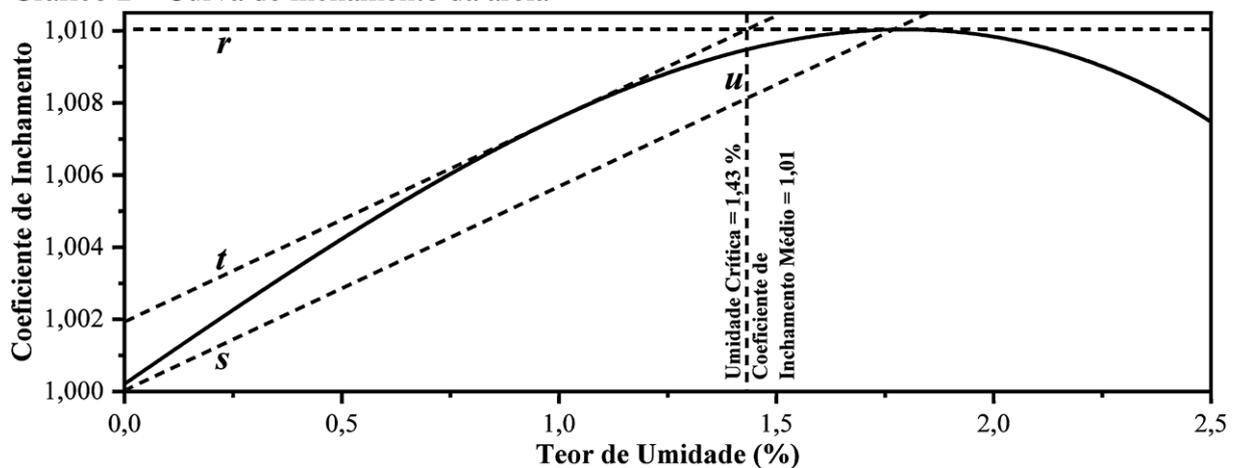
6.1.1.2 Massa específica e absorção de água

A massa específica da areia utilizada nas formulações é $2,43 \text{ g/cm}^3$. Esse valor foi obtido em estudos anteriores e extraído do trabalho de Oliveira (2022), membro do grupo de pesquisa sobre concreto do PPGCEM UNIFAL-MG, que utilizou, nas formulações dos corpos de prova, os mesmos materiais e respectivos fornecedores. Uma vez que a areia possui baixa absorção de água, não será necessário realizar qualquer correção na formulação.

6.1.1.3 Umidade, inchamento e índice de vazios

Os resultados mostrados na(s) Tabela(s) 34 e 35 (Apêndice A) referem-se aos testes de massa unitária, umidade e inchamento da areia, sendo dois últimos testes (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Curva de inchamento da areia



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Sobre a umidade crítica da areia de 1,43%, observa-se que o material analisado está dentro do intervalo do valor esperado para o agregado, que deve estar entre 1% e 2%, como afirma Mindess, Young e Darwin (2002).

O fator de inchamento calculado, para esse material em questão, é de 1,01, indicando não ser necessária a correção na formulação do concreto, visto que seu inchamento foi pequeno.

No Gráfico 2, r é a reta tangente ao ponto de teor de umidade máxima; s é a reta de união da origem com a tangente ao ponto de teor de umidade máxima; t é a reta tangente à curva e paralela com a reta s ; u é a reta que intersecciona a intersecção entre o ponto de teor de umidade máxima e a reta tangente à curva e paralela com a reta s . O índice de vazios calculado foi de 3,63% para a areia, o que é condizente com o baixo inchamento do material e baixa absorção de água, conforme afirma Camp (2002).

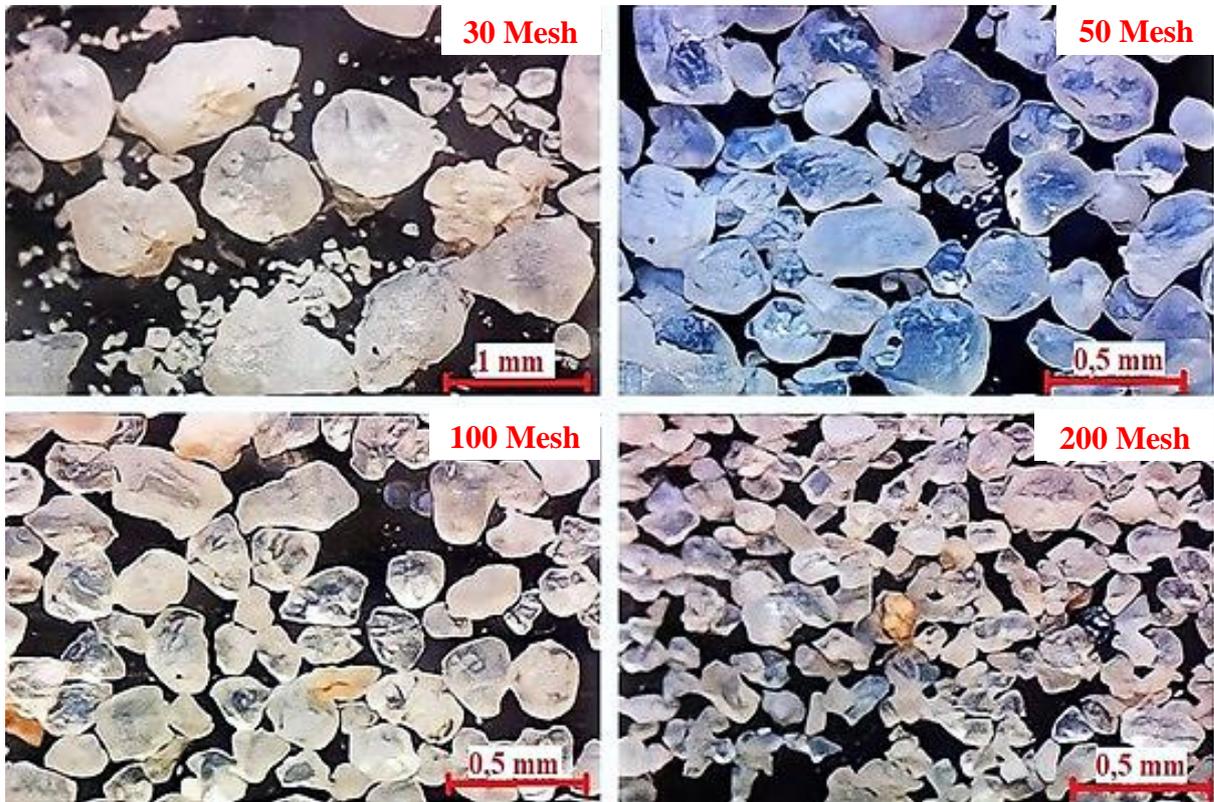
6.1.1.4 Microscopia óptica

Para análise morfológica da areia, foi utilizada a ABNT NBR 7389-1/2009 (Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 1: Agregado miúdo). Por meio do microscópio óptico com câmera acoplada, foi possível obter imagens do material, realizadas em faixas granulométricas diferentes, utilizando as peneiras de 30, 50, 100 e 200 Mesh para gradação do agregado. As imagens apresentadas na Figura 4 foram obtidas por Oliveira (2022), que utilizou o mesmo material empregado na presente pesquisa.

A ABNT NBR 7389-1/2009 (Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 1: Agregado miúdo) fornece uma comparação e classificação petrográfica dos grãos do material analisado.

Pela avaliação visual das imagens e comparando-as com a classificação da ABNT, conclui-se que as partículas da areia natural são subarredondadas com alto grau de esfericidade. Esse resultado era esperado, visto que os agregados miúdos naturais, como a areia, tendem a ser arredondados devido à abrasão, atrito e ao efeito cumulativo de colisões múltiplas, que geram a perda dos vértices e das arestas dos sedimentos.

Figura 4 – Microscopia óptica da areia com iluminação de LED incidente retida nas peneiras de 30, 50, 100 e 200 mesh, apresentando um material bem graduado, com grãos de formato subarredondado com alto grau de esfericidade



Fonte: Adaptado de Oliveira, (2022, p. 81).

6.1.2 Testes de caracterização do pó de quartzo

Os testes para caracterização do pó de quartzo são, em sua maioria, iguais àqueles que caracterizam a areia, pois comportam-se como agregado, quando presentes no concreto.

6.1.2.1 Determinação de finura por lavagem

Uma vez que o pó de quartzo empregado na pesquisa é um material muito fino, com diâmetros muito menores que 75 μm , foi utilizada a peneira mais fina existente no Laboratório de Ciências das Engenharias da UNIFAL - MG; a de 635 Mesh, ou seja, 0,02 mm de abertura, adaptando-se, dessa maneira, o ensaio.

Obteve-se que cerca de 92,86% do material ensaiado é passante na peneira supra referenciada, indicando que o pó de quartzo caracterizado é um material ultrafino. É provável que o material retido esteja entre 500 Mesh até 635 Mesh, visto que a fornecedora do material o classifica acima de 500 Mesh.

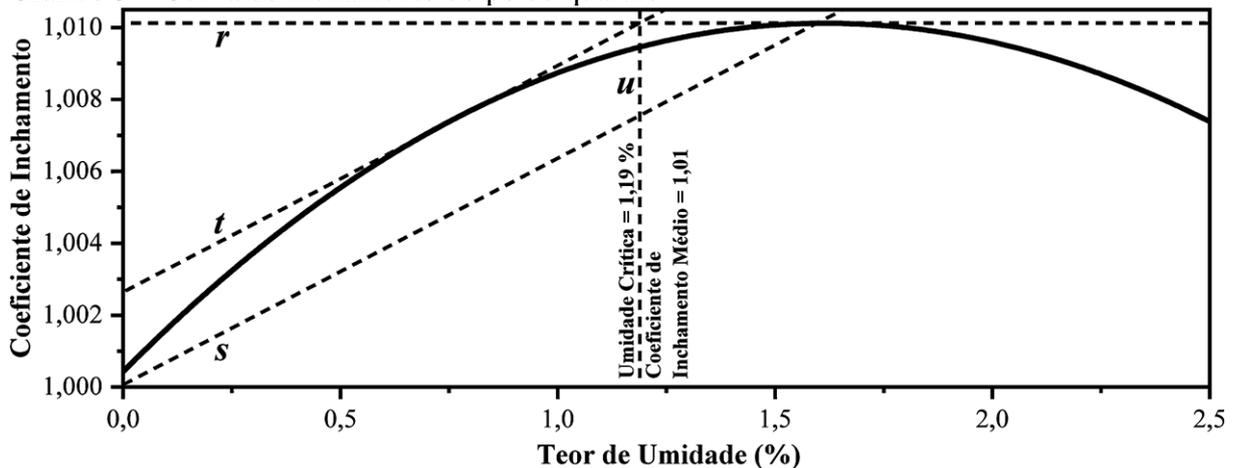
6.1.2.2 Massa específica e absorção de água

A massa específica do pó de quartzo a ser utilizado é $2,71 \text{ g/cm}^3$. Assim, como mencionado anteriormente para a areia, esse valor foi obtido em estudos anteriores por Oliveira (2022). Também, não foi necessário realizar qualquer correção na formulação devido à baixa absorção de água (Oliveira, 2022).

6.1.2.3 Umidade, inchamento e índice de vazios

Os resultados mostrados nas Tabela(s) 36 e 37 (Apêndice A) referem-se aos testes de massa unitária, umidade e inchamento, com os dois últimos resultados plotados no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Curva de inchamento do pó de quartzo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Sobre a umidade crítica do pó de quartzo (1,19%), verifica-se que o valor está de acordo com o esperado para agregados utilizados em concreto, que deve ficar entre 1% e 2%, conforme confirma Mindess, Young e Darwin (2002). O fator de inchamento foi de 1,01, indicando que não deverá ser feito nenhum ajuste da quantidade de material no CPR, visto que seu inchamento foi muito pequeno. O índice de vazios não foi calculado, uma vez que os demais parâmetros estão de acordo com a norma.

Os parâmetros r , s , t e u foram anteriormente definidos (Gráfico 2).

6.1.3 Testes de caracterização da sílica ativa

6.1.3.1 Determinação de finura por lavagem

Por meio desse ensaio, obteve-se que as partículas de sílica ativa, que são maiores ou iguais a 45 μm , estão presentes em 71,51% do material. A sílica ativa disponível não é a mais adequada para uso em concreto, visto que, segundo a ABNT NBR 13956-1/2012 (Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos), o valor admissível de finura das partículas que ficam retidas na peneira com malha de 45 μm deve ser $\leq 10\%$. Logo, a formulação a ser utilizada deverá levar em conta essa granulometria mais grosseira, já que não há meios e recursos laboratoriais para redução granulométrica do material.

6.1.3.2 Umidade e teor de sólidos

O teor de umidade para a sílica ativa foi de 11,53% e o percentual de sólidos de 88,47%. Segundo a ABNT NBR 13956-1/2012 (Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos), o teor de umidade para a sílica ativa deve ser ≤ 3 , indicando que há necessidade da secagem do material antes da pesagem, o que já era esperado.

6.1.3.3 Perda ao fogo

A sílica ativa utilizada nessa pesquisa tem sua perda ao fogo de 0,06%, em concordância com a norma ABNT NBR 13956-1/2012 (Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos), que estabelece que a perda ao fogo deve ser inferior a 6,0%. Com esse percentual, é possível dizer que o conteúdo de materiais inorgânicos na sílica ativa é adequado (99,94%), prevenindo alterações significativas na estrutura cristalina do concreto.

6.1.3.4 Microscopia óptica

Para análise morfológica da sílica ativa, foi utilizada a ABNT NBR 7389-1/2009 (Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 1: Agregado miúdo). Por meio do microscópio óptico com câmera acoplada, obteve-se a imagem do material, sendo, assim, feita com ampliação de 1000 x (Figura 5). Para materiais com uma finura ainda menor que o da sílica ativa, como o pó de quartzo utilizado nesse trabalho, torna-se impossível a análise petrográfica.

Figura 5 – Microscopia óptica da sílica ativa com iluminação de LED incidente, apresentando grãos com formato arredondado com alto grau de esfericidade



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Partindo-se da comparação com o esquema ilustrativo oferecido pela ANBT NBR 7389-1/2009, conclui-se que a sílica ativa possui formato arredondado com alto grau de esfericidade; mesmo que seja um material processado, devido ao uso de moinhos de bolas para redução de sua finura, onde ocorre além do impacto, o atrito, dá-se a esse material essa morfologia por conta do efeito cumulativo de colisões múltiplas, que geram a perda dos vértices e das arestas das partículas. Assim, tanto a areia quanto a sílica ativa, nesse formato de esfericidade, são interessantes, visto que tendem a promover maior empacotamento de partículas e, por conseguinte, uma melhoria na resistência final.

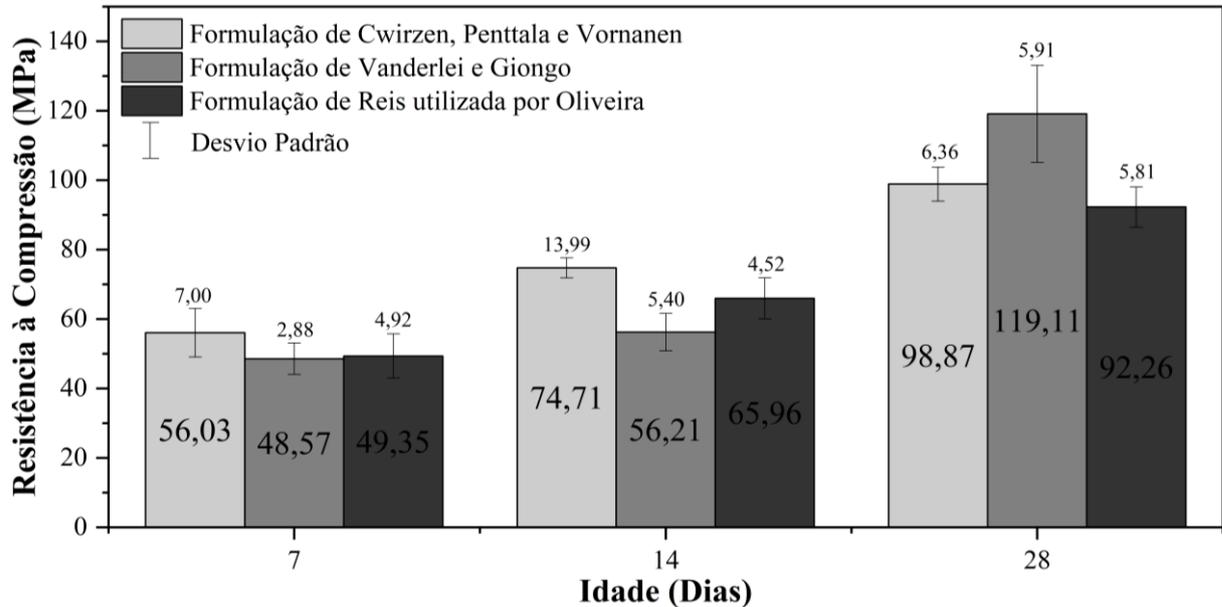
6.2 ESCOLHA DA FORMULAÇÃO DO CPR PARA TESTES COM ADIÇÃO DE GO

Três formulações distintas foram testadas para selecionar aquela a ser utilizada nessa pesquisa, sendo elas: o trabalho de Cwirzen, Penttala e Vornanen (2008), o trabalho de Vanderlei e Giongo (2006) e o trabalho de Olivera (2022).

Considerou-se como melhor formulação aquela que apresentou os resultados mais promissores em termos de propriedades mecânicas no ensaio de resistência à compressão. A partir da formulação escolhida (denominada formulação padrão), novos ensaios foram conduzidos, variando o teor de GO nas formulações, com o objetivo de descobrir sua influência no CPR, conforme já discutido.

Os resultados dos ensaios de resistência média à compressão das três formulações encontram-se no Gráfico 4, com valores extraídos da(s) Tabela(s) 38, 39 e 40 (Apêndice B).

Gráfico 4 – Resistência média à compressão para escolha da formulação onde será adicionado o GO



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Dos resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados com as três formulações supracitadas, nas idades de 7, 14 e 28 dias, observou-se que na última idade, o CPR utilizado na pesquisa de Vanderlei e Giongo apresentou maior resistência média, como visto na Tabela 39 (Apêndice B). No entanto, ao ser feito o controle estatístico do concreto utilizando a análise do $f_{ck,est}$, ou seja, da resistência à compressão característica do concreto estimada a partir de vários corpos de prova moldados de uma mesma formulação, obteve-se como resultado que a resistência média do CPR que atingiu o valor mais próximo da resistência à compressão características foi a formulação adotada no trabalho de Cwirzen, Penttala e Vornanen, descartando, assim, a formulação de Vanderlei e Giongo como a escolhida. Para obter esse resultado, tomou-se como base a equação (24) apresentada pela ABNT NBR 12655/2022 (Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimentos).

$$f_{ck, est} = 2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m - 1} - f_m \quad (24)$$

Em que m é igual a $n/2$, sendo n a quantidade de corpos de prova, devendo desprezar o valor mais alto de n , se for ímpar; e $f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}$ os valores das resistências dos exemplares, em ordem crescente.

Outro meio de avaliação dos resultados de resistência mecânica é o desvio padrão, como pôde ser visto nas Tabela(s) 38, 39 e 40 (Apêndice B). Esse indicador demonstra quão uniformes são os dados de um grupo de corpos de prova de determinada formulação. Sua interpretação, quando se trata de concreto, está vinculada ao coeficiente de variação, condição apresentada no documento ACI 214 (2011) (*Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete*), que define o grau de variabilidade da resistência à compressão de um grupo de amostras. O coeficiente de variação é calculado conforme a expressão (25):

$$CV = \frac{S}{f_{cm}} \quad (25)$$

Em que o S é o desvio padrão; e o f_{cm} a resistência média à compressão do concreto.

Do valor obtido com a equação anterior, pode-se interpretá-lo seguindo a classificação da variação da amostra, apresenta da na Tabela 31 (Anexo G).

Ao verificar o coeficiente de variação, observou-se que a formulação utilizada na pesquisa por Cwirzen, Penttala e Vornanen alcançou um valor que lhe conferiu a classificação de uma boa variação. Esse resultado implica no fato de que o valor da resistência média está mais próximo da realidade. Quando essa variação não recebe uma classificação positiva, indica que a média está sendo afetada por valores extremos de resistência, tanto mais altos quanto mais baixos, dentro de um grupo de corpos de prova com a mesma formulação.

Desse modo, considerando todos os fatores utilizados para avaliação, a formulação escolhida foi a utilizada na pesquisa de Cwirzen, Penttala e Vornanen, visto que possuiu maiores pontos positivos.

6.3 TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DO CPR COM ADIÇÃO DE GO

6.3.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica da amostra seca, saturada e real

A absorção de água, o índice de vazios e a massa específica das amostras na condição seca, saturada e real, foram determinadas a partir da norma ABNT NBR 9778/2005, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica da amostra seca, saturada e real do CPR

Condições	0,00%	0,025%	0,05%
Massa Seca (g)	382,35	404,71	418,52
Massa Saturada (g)	397,52	417,63	428,90
Massa (Balança Hidrostática) (g)	211,22	225,70	235,82
Absorção de Água (%)	3,97	3,19	2,48
Índice de Vazios (%)	8,14	6,73	5,38
Massa Específica da Amostra Seca (g/cm ³)	2,05	2,11	2,17
Massa Específica da Amostra Saturada (g/cm ³)	2,13	2,18	2,22
Massa Específica da Amostra Real (g/cm ³)	2,23	2,26	2,29

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se uma diminuição da absorção de água nas amostras e do índice de vazios com o aumento do teor de GO adicionado. Comportamento semelhante foi obtido por *Suo et al.* (2022) que, ao adicionar o GO no concreto, observou a diminuição da quantidade de poros, dado que no processo de cura o material fica mais denso com a formação de gel C-S-H adicional, diminuindo, assim, sua porosidade, resultando em uma absorção de água menor.

De acordo com a Tabela 1, a absorção de água teve um decréscimo de 19,64% (de 3,97% para 3,19%) entre a amostra de CPR sem GO comparada com a amostra com 0,025% de GO, e uma diminuição de 37,53% (de 3,97% para 2,48%) entre a amostra de CPR sem GO comparada com a amostra com 0,05% de GO. Em relação ao índice de vazios, essa diminuição foi de 17,32% (de 8,14% para 6,73%) entre a amostra de CPR sem GO comparada com a amostra com 0,025% de GO, e um decréscimo de 33,91% (de 8,14% para 5,38%) entre a amostra de CPR sem GO comparada com a amostra com 0,05% de GO. Tais valores evidenciam a influência positiva da presença do GO no que diz respeito à redução da absorção de água e do índice de vazios, o que está relacionado diretamente com as propriedades mecânicas.

Apesar das considerações anteriores, é válido lembrar que o CPR tem sua microestrutura melhor que a do concreto convencional; ou seja, sua porosidade e microfissuras são, pela própria natureza do material, pequenas, dado o melhoramento do empacotamento das partículas inerente da utilização de uma formulação mais refinada. Nesse sentido resulta-se que a absorção de água e o índice de vazios do material sejam baixos e fazem com que ele seja classificado como impermeável, conforme apresenta a Tabela 32 ([Anexo G](#)) que classifica a qualidade do concreto pela absorção de água, segundo Helene (1983).

Com relação à massa específica real do CPR, é válido afirmar que os valores alcançados estão de acordo com a definição encontrada na literatura, como mencionado por Mostofinejad, Nikoo e Hosseini (2016), a massa específica do CPR varia entre $2,5 \text{ g/cm}^3$ e 3 g/cm^3 , sendo nesse trabalho os valores de $2,23 \text{ g/cm}^3$, $2,26 \text{ g/cm}^3$, $2,29 \text{ g/cm}^3$, para o CPR com teores de 0%, 0,025% e 0,05% de GO, respectivamente. Esse aumento pode ser atribuído à adição do nanomaterial, observando que, para a formulação com 0,025% de GO, a massa específica real teve um incremento de 1,35% em relação ao CPR sem GO e para a formulação com 0,05% de GO o aumento foi de 2,69%. Em outras palavras, ao duplicar a quantidade de GO, duplicou-se também o percentual da massa específica real do material estudado.

Os valores atingidos na absorção de água, no índice de vazios e na massa específica denotam que houve um refinamento na microestrutura do CPR; fato corroborado pelas imagens obtidas por MEV, que indicou uma diminuição na quantidade e no tamanho dos poros, bem como na presença de fissuras menores, tornando o concreto com adição de GO mais homogêneo

6.3.2 Determinação da retração hidráulica

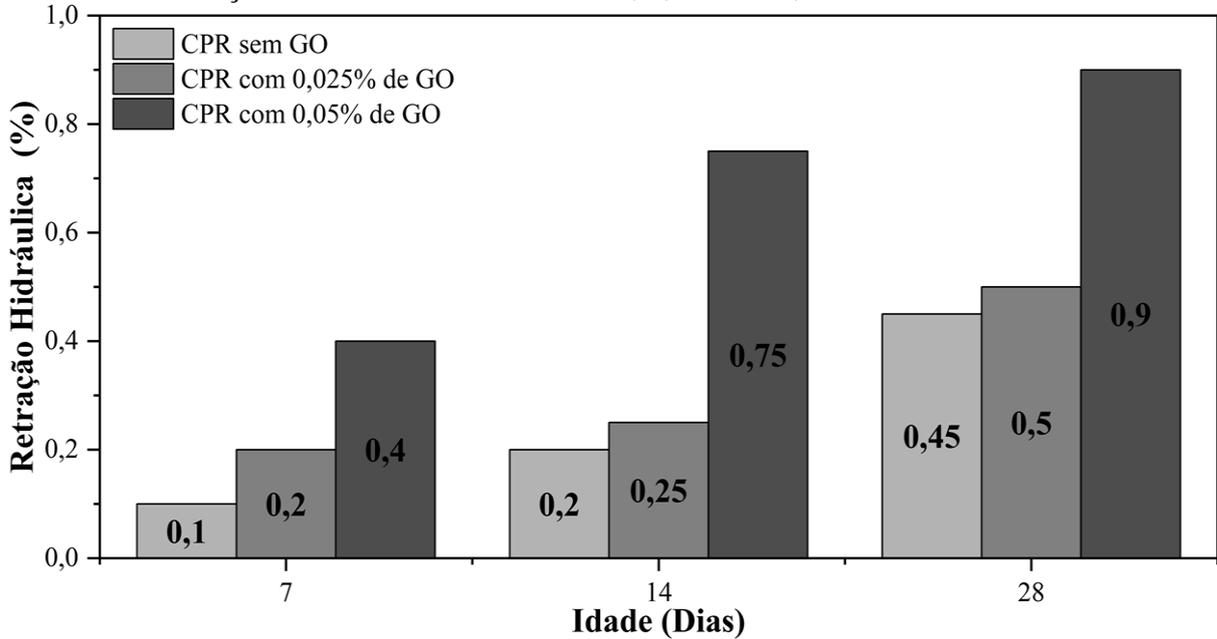
A redução volumétrica do concreto durante o processo de cura, nos períodos de 7, 14 e 28 dias foi realizada de acordo com a norma ABNT NM 131/1997 (Concreto endurecido - Determinação da retração hidráulica ou higrométrica do concreto).

Embora a norma recomende o uso de um comparador de expansibilidade para realizar as medições, na ausência desse equipamento, foi utilizado um paquímetro para medir a altura do corpo de prova cilíndrico, com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm. Foram moldados dois corpos de prova para cada formulação de CPR, com concentrações de GO de 0%, 0,025% e 0,05%. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 41 (Apêndice C) e ilustrados no Gráfico 5.

Verificou-se que com o aumento do teor de GO adicionado à formulação, maior é a retração hidráulica obtida. Comparando as retrações médias dos CPR sem e com adição de 0,025% de GO, a retração média aumentou em 11,1%; já para os CPR sem e com a adição de 0,05% de GO o valor da retração duplicou. Entende-se que isso ocorreu, com base nos resultados da pesquisa conduzida por Chen *et al.* (2020), devido ao processo de hidratação do cimento. Durante esse processo, o CaO (óxido de cálcio) presente no material reage, produzindo Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio). Essa reação é acelerada pela interação com as nanofolhas de GO (grafeno oxidado), que contêm grupos carboxila (-COOH). Esses grupos promovem a

retração do concreto, ao auxiliarem no processo de cura com uma melhor distribuição da água de amassamento.

Gráfico 5 – Retração hidráulica do CPR com 0%, 0,025% e 0,05% de GO



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

6.3.3 Resistência mecânica (compressão e flexão a 3 pontos)

Após o processo de formação das amostras e a cura dos corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, realizou-se, com base na norma ABNT NBR 5739/2018 (Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos), o ensaio de ruptura aplicando força compressiva por meio de uma prensa elétrica hidráulica digital da marca Contenco, modelo 20/100T (Figura 6). Antes do ensaio foi assegurado o nivelamento das faces das bases dos corpos de prova por meio de retificação com uma serra circular para corte de mármore, resfriada com água, como apresentado na Figura 7.

Figura 6 – Ensaio de resistência à compressão em prensa elétrica hidráulica



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 7 – Retífica do corpo de prova



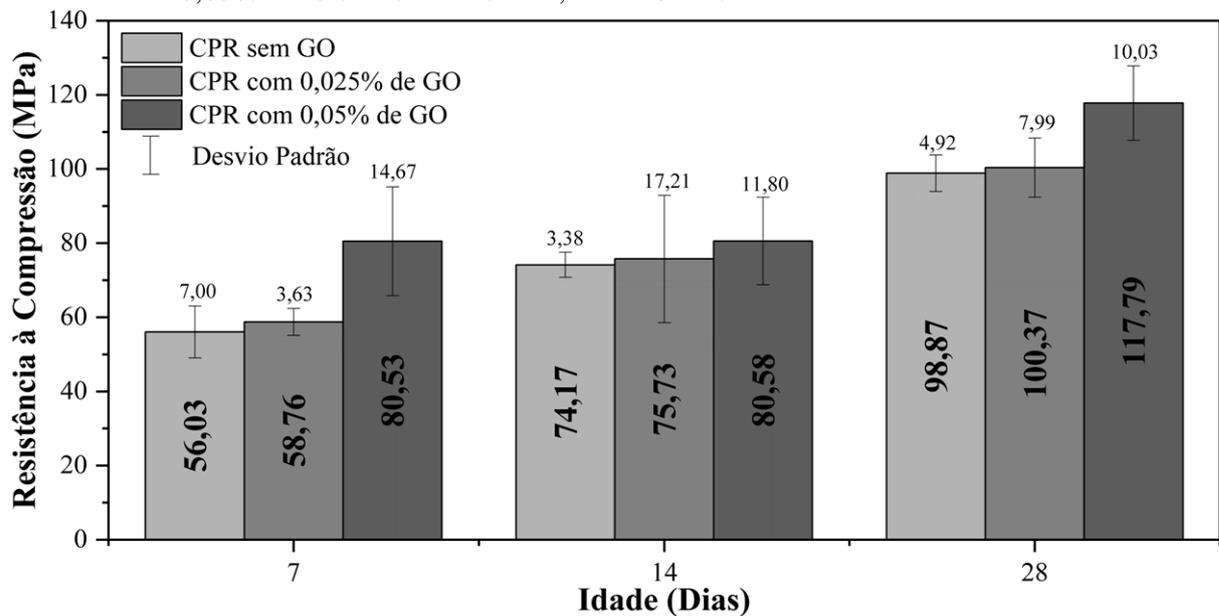
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os resultados do ensaio de ruptura por compressão dos corpos de prova encontram-se nas Tabela(s) 42, 43 e 44 ([Apêndice D](#)), equivalentes às idades de 7, 14 e 28 dias, com as formulações do CPR em três condições: sem adição de GO; com a adição de 0,025% de GO; e com a adição de 0,05% de GO; o Gráfico 6 mostra todos os resultados obtidos.

Para analisar os dados referentes a resistência à compressão, inicialmente foram calculadas as médias. Constatou-se que a adição de GO no CPR com cura realizada por 7 dias resultou em um aumento na resistência mecânica de 4,87% para a adição de 0,025% de GO e

de 43,73% para a adição de 0,05% de GO, em comparação com a amostra padrão (sem GO). Aos 14 dias, o aumento foi menor, 2,10% para a primeira adição e 8,64% para a segunda. Aos 28 dias, o aumento foi de 1,52% e 19,14%, respectivamente. Portanto, é possível concluir que à medida em que foi adicionado maior teor de GO na formulação, maior a resistência à compressão obtida.

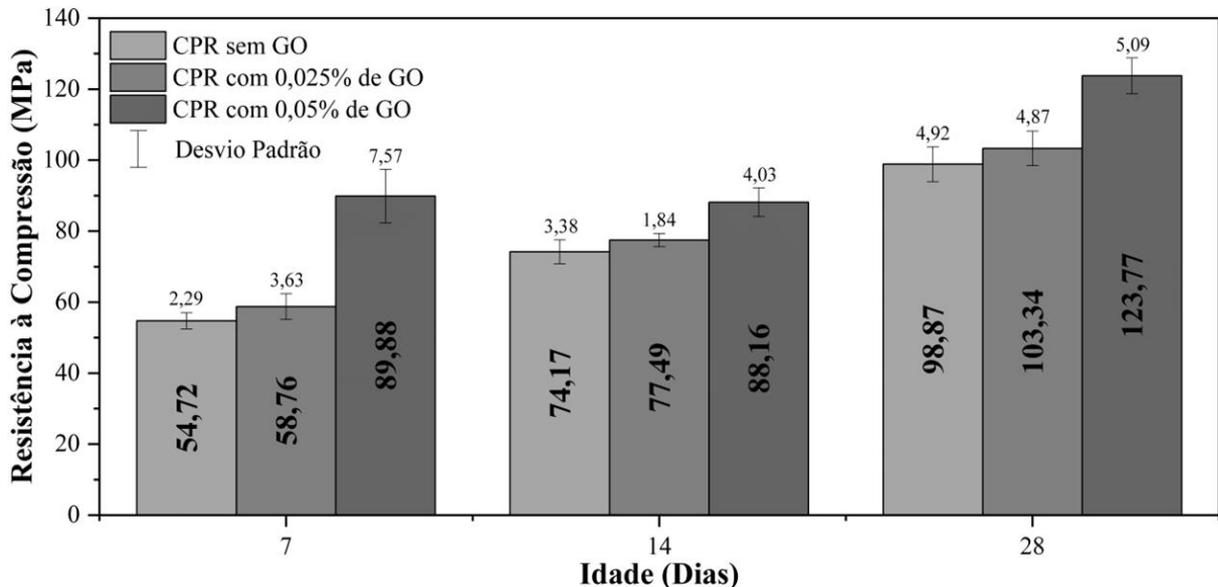
Gráfico 6 – Resistência média à compressão dos CPR sem adição de GO, com adição de 0,025% e 0,05% de GO nas idades de 7, 14 e 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

No entanto, uma análise mais cautelosa dos dados mostra que, para alguns valores médios, o desvio padrão de alguns grupos de amostras estava muito alto, levando a uma classificação da variação da amostra como ruim, avaliação essa feita aplicando a equação (25) e interpretando o valor alcançado por meio da classificação da variação da amostra presente na Tabela 31 (Anexo G). Como solução, foi adotada a média aparada, para isso, antes de calcular a média, foi excluída, quando necessário, uma quantidade de amostras, aquelas que tinham uma percentagem maior que 10% do valor da resistência das amostras subsequentes e/ou antecedentes, considerando a ordem crescente desses valores. As demais amostras anteriores ou sucessoras a esse valor eliminado também foram excluídas. Os valores restantes resultaram na média aparada, a fim de que a classificação da variação da amostra fosse, no mínimo, boa, categorização essa já vista na Tabela 31 (Anexo G). O Gráfico 7 mostra os resultados de resistência média aparada à compressão das amostras investigadas.

Gráfico 7 – Resultados de resistência média aparada à compressão dos CPR sem adição de GO, com adição de 0,025% e 0,05% de GO nas idades de 7, 14 e 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com base na média aparada, os valores de resistência à compressão, também presentes nas Tabela(s) 42, 43 e 44 (Apêndice D), apresentaram um aumento nas amostras com a adição de 0,025% e 0,05% em relação à média das amostras padrão. Aos 7 dias de cura, houve um aumento de 7,38% e 64,25%, respectivamente. Aos 14 dias, esse aumento foi de 4,48% e 18,86% e para os 28 dias, o aumento foi de 4,52% e 25,18%. Desse modo, assim como na análise anterior, é possível concluir que a adição de 0,05% de GO resultou em um aumento de resistência muito melhor do que a adição de 0,025%. Tal comportamento já era esperado tendo em vista o efeito do aumento do teor de GO nas propriedades de absorção de água e de índice de vazios. A diminuição dos vazios e da absorção de água estão diretamente ligadas ao aumento das propriedades mecânicas.

Comparando com algumas pesquisas, é possível dizer que os valores atingidos, tanto da média quanto da média aparada, estão próximos. Na pesquisa de Chu *et al.* (2020), ao adicionar 0,06% de GO, ocorreu um aumento de 16,83% na resistência à compressão do concreto UHCP. Já na pesquisa de Wu *et al.* (2020), ao adicionar 0,04% de GO no UHCP, houve um aumento de 26,35%.

Para determinar a resistência à flexão, utilizou-se o ensaio de tração na flexão em três pontos, conforme descrito na ABNT NBR 12142/2010 (Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos), rompendo corpos prismáticos nas dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL 2000 (Figura 8).

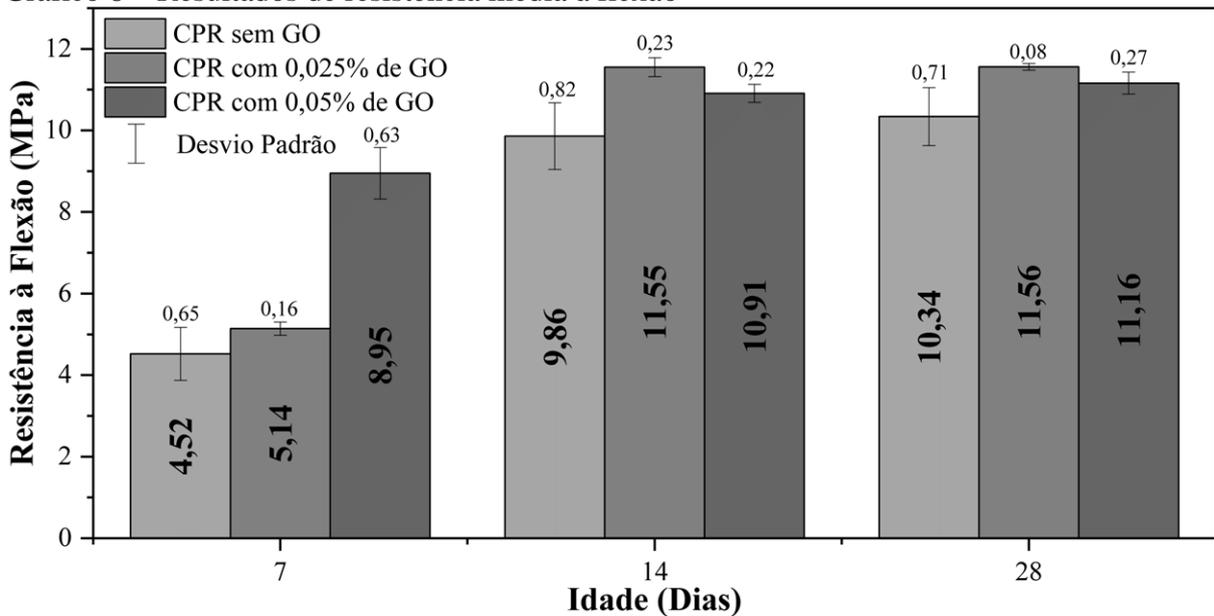
Os resultados do ensaio de ruptura por flexão a 3 pontos dos corpos de prova encontram-se nas Tabela(s) 45, 46 e 47 (Apêndice D), equivalentes às idades de 7, 14 e 28 dias, com as formulações do CPR em três condições: sem adição de GO; com a adição de 0,025% de GO; e com a adição de 0,05% de GO; e representado no Gráfico 8.

Figura 8 – Ensaio de resistência à flexão a 3 pontos em prensa EMIC



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Gráfico 8 – Resultados de resistência média à flexão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A resistência média à flexão do CPR com 0,025% de GO aumentou 13,72% em relação à amostra padrão após 7 dias de cura. Já o CPR com 0,05% de GO apresentou um aumento de

98,01% em relação à amostra padrão no mesmo período. Após 14 dias de cura, os aumentos foram de 17,14% e 10,65%, respectivamente e, após 28 dias, os aumentos foram de 11,80% e 7,93%, respectivamente.

Isso indica que o concreto com adição de 0,025% de GO apresentou um desempenho melhor em relação à resistência média à flexão quando comparado ao concreto com adição de 0,05% de GO. No entanto, a diferença foi pequena (3,58%), não sendo possível afirmar se essa diminuição da resistência se deve a maior taxa de GO ou a outra condição. Além disso, a quantidade de amostras é pequena para uma comparação estatística confiável. No entanto, vale ressaltar que essa quantidade está de acordo com a norma referente a esse ensaio.

Comparando com a literatura, pode-se dizer que o material em estudo teve um resultado de resistência à flexão próximo ao encontrado na pesquisa de Chu *et al.* (2020) que utilizando 0,03% de GO no concreto UHCP, obteve um aumento de 11,26% na resistência à flexão.

No ensaio de resistência à compressão e no de resistência à flexão, observou-se que, aos 7 dias, houve um aumento significativo quando adicionado 0,05% de GO no CPR em comparação com a média da amostra padrão. Esse aumento foi maior do que aos 14 e 28 dias. Isso ocorreu porque, ao usar o CP V-ARI, teve-se uma resistência elevada em um curto intervalo de tempo.

Sabendo-se que um dos principais produtos de hidratação inicial do CP V-ARI é o C-S-H, dado que esse cimento é rico em C_3S e tem uma finura menor que o cimento convencional, tem-se que o processo de hidratação ocorre de forma mais rápida e, no presente caso, acabou sendo fortemente auxiliado pelo uso do GO.

De acordo com Zhan *et al.* (2011 *apud* Vacciola, 2022, p. 22), “[...] a estrutura das folhas de óxido de grafeno possui caráter fortemente polar e hidrofílico, principalmente devido à presença de grupos funcionais hidroxilas (-OH)”, isso significa que as forças de adesão das moléculas desses materiais com a água são grandes, fazendo com que parte da água do amassamento seja atraída pelo GO. Nesse sentido, o nanomaterial carrega consigo uma determinada parcela da água, que é melhor distribuída dentro do concreto. Como ocorre uma ligação mais forte entre os flocos de GO e a matriz de cimento, efeito esse conhecido como nucleação dos flocos de GO, tem-se uma alta resistência na ligação com o CPR, resultando na melhoria da microestrutura, criando núcleos para a formação de mais C-S-H do que é comumente formado no concreto (Babak *et al.*, 2014).

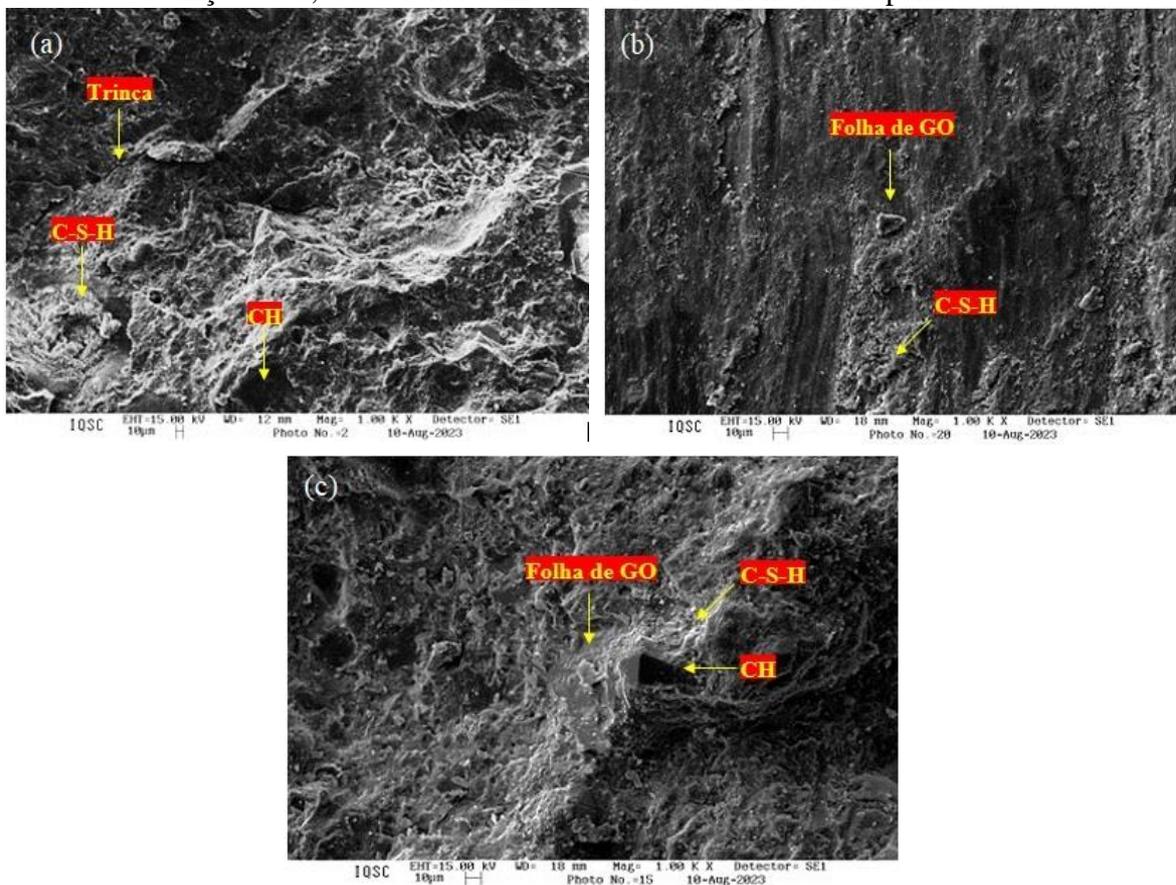
Em suma, ao usar o CP V-ARI, essa formação é ainda maior devido à quantidade de C_3S presente no material. Desse modo, com a adição de 0,05% de GO, nos 7 primeiros dias, essa resistência inicial tornou-se, naturalmente, mais significativa. No entanto, após esse

período, ocorreu uma diminuição na quantidade de silicato tricálcico ainda disponível no CPR para hidratação, que só foi hidratado conforme a água foi sendo difundida no concreto, por isso o aumento da resistência aos 14 e 28 dias foi menor.

6.3.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As Figuras 9 (a), (b) e (c) mostram as microestruturas (ampliação de 1000x) das amostras sem GO, com adição de 0,025% de GO e com 0,05% de GO, respectivamente.

Figura 9 – MEV da amostra do CPR: (a) sem GO, (b) com a adição de 0,025% de GO e (c) com a adição de 0,05% de GO sem detector de elétrons retroespalhados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

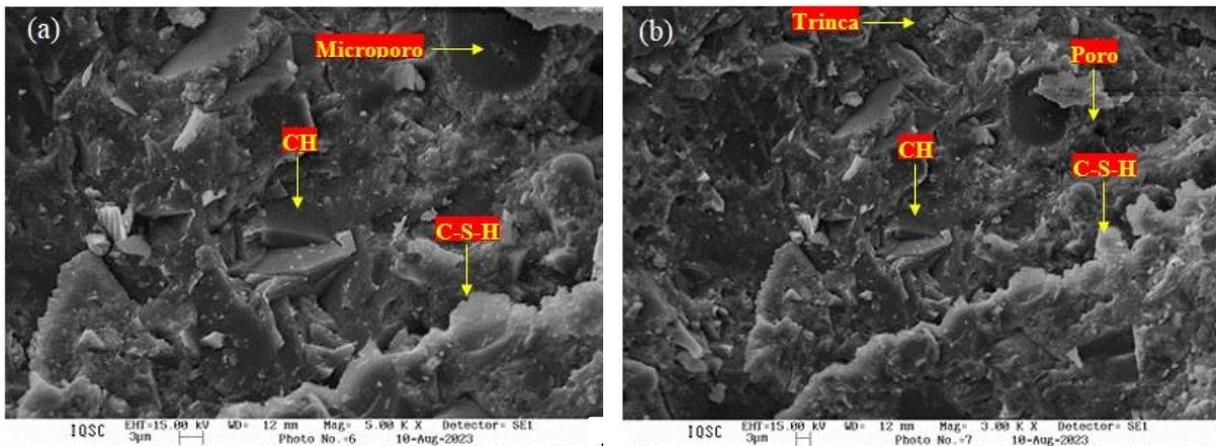
O ensaio de MEV realizado em microscópio eletrônico de varredura da marca LEO, modelo 440, analisou a morfologia do concreto e ao mesmo tempo comprovou a presença do GO no CPR. Além disso, o MEV auxiliou a comprovar possíveis alterações na microestrutura das amostras com adição de GO e sem GO. A análise foi feita na superfície das fraturas das amostras que foram obtidas a partir de fragmentos resultantes do ensaio de resistência mecânica realizado aos 28 dias de idade.

Na Figura 9(a) observa-se a presença de microfissuras na superfície, fato não observado nas demais figuras, além de maior heterogeneidade na superfície, fatores que corroboram os resultados obtidos a partir dos ensaios físicos e mecânicos.

Embora o concreto tenda a apresentar fissuras por sua própria natureza, as ampliações de 5000x mostraram que, se houver fissuras nas amostras contendo GO, são apenas microfissuras, não sendo perceptíveis nessa ampliação.

Na imagem do CPR sem GO com ampliação de 5000x (Figura 10 (a)), é possível observar uma superfície mais uniforme no concreto, que pode ser atribuída à presença do CH (Hidróxido de Cálcio). Para verificar se essa característica é local ou em outras áreas, a ampliação foi reduzida para 3000x (Figura 10 (b)). Nessa nova visão, ainda é evidente a presença significativa do CH, que se manifesta com uma aparência lisa e compacta, como afirma Mehta e Monteiro (1994). Essa estrutura exibe uma resistência menor que o C-S-H.

Figura 10 – MEV da amostra do CPR sem GO, sem detector de elétrons retroespalhados: (a) ampliação de 5000x e (b) ampliação de 3000x



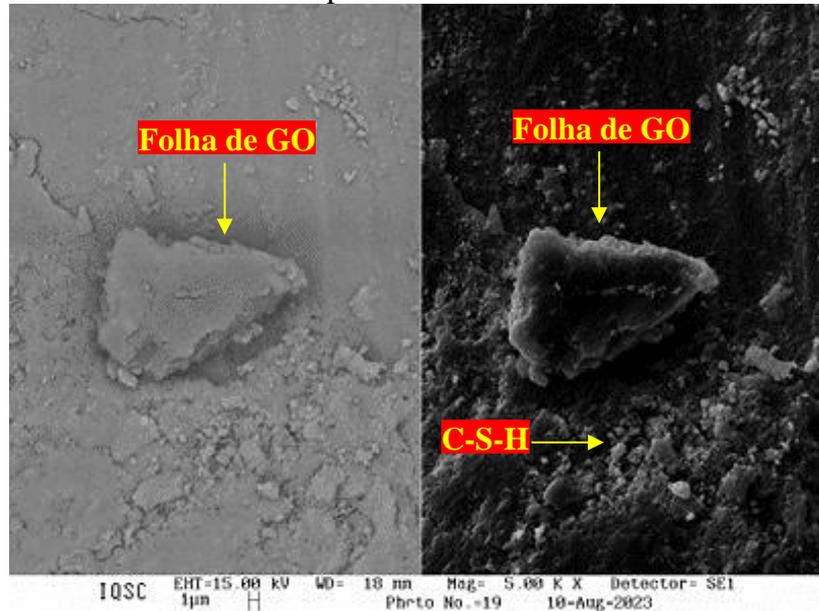
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Em muitos outros pontos da imagem do CPR, é possível identificar estruturas pouco cristalinas de natureza fibrosa, que correspondem ao C-S-H (silicato de cálcio hidratado), composto primordial do cimento hidratado e diretamente relacionado à sua resistência mecânica. Sabe-se que quanto maior a presença do C-S-H, maior a resistência mecânica do concreto.

Na Figura 11, é possível visualizar uma nanofolha de GO cercada por concreto. A imagem foi capturada usando o MEV com um detector de elétrons retroespalhados (à esquerda), pois sem ele seria difícil encontrar uma folha de GO na estrutura; à direita tem-se a mesma imagem sem o detector de elétrons retroespalhados. Todas essas imagens, com ampliação de

5000x, mostram que o CPR com adição de 0,025% de GO tem uma maior formação de C-S-H ao redor da nanofolha quando comparado com a amostra padrão.

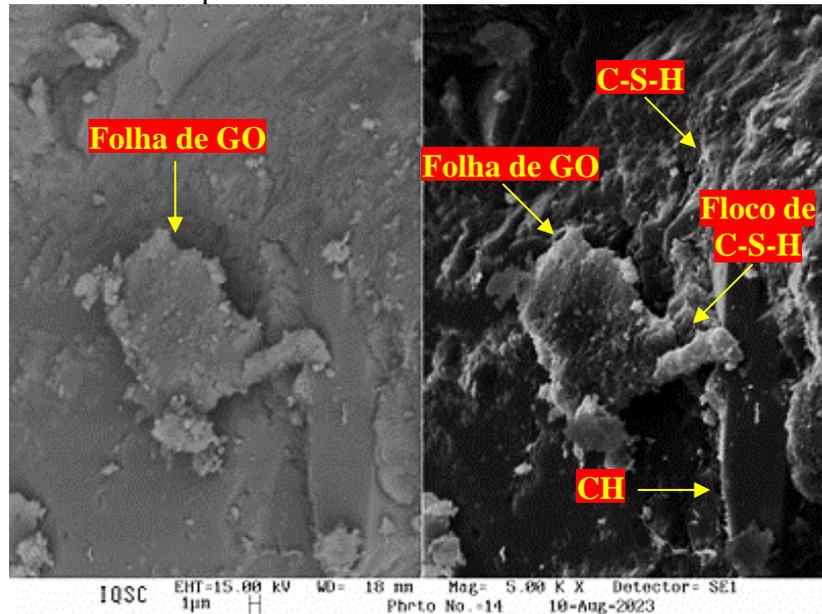
Figura 11 – MEV da amostra do CPR com 0,025% de GO, ampliação 5000 x, com e sem detector de elétrons retroespalhados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na Figura 12, também é possível visualizar uma nanofolha de GO pelo MEV com detector de elétrons retroespalhados. Essa imagem se repete à direita, mas sem o detector, mostrando os elétrons secundários. Todas essas imagens, com ampliação de 5000x, mostram o CPR com adição de 0,05% de GO. Observa-se uma grande quantidade de CH ao redor da nanofolha, mas sobre ela há alguns flocos de C-S-H. Comparando com a Figura 9 (c), com menor ampliação (1000x) da mesma amostra, verifica-se que essa região foi singular, tendo no exemplar uma grande área com C-S-H. Uma hipótese é que ao quebrar a amostra para retirar uma amostra menor para a MEV, a região que essa nanofolha hidratou estava acima dela e ficaram resquícios do C-S-H dessa região sobre ela, o que foi chamado aqui de flocos de C-S-H.

Figura 12 – MEV da amostra do CPR com 0,05% de GO, ampliação 5000 x, com e sem detector de elétrons retroespalhados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Pode-se dizer, observando a MEV e embasando-se na literatura sobre o GO, como a de Ganassin, Lima e Faria (2018), que a estrutura das folhas de óxido de grafeno é altamente polar e hidrofílica, principalmente devido à presença de grupos funcionais hidroxilas. Isso resulta em uma forte adesão desse nanomaterial à água, o que faz com que, quando adicionado ao concreto, parte da água de amassamento seja atraída pelo GO. Assim, ele carrega consigo uma parcela da água, que é distribuída de maneira mais eficiente dentro do concreto, melhorando sua hidratação, difusividade térmica e criando núcleos para a formação de mais C-S-H do que é normalmente formado no CPR. Esse produto é o que proporciona ao concreto sua resistência mecânica. Tal comportamento não é inédito na literatura, estando presente em pesquisas como a de Babak *et al.* (2014), que adicionou GO em argamassa e obteve a formação de C-S-H com aparência de gel já durante o processo de cura.

6.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS TESTES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CPR

6.4.1 Análise de variáveis dos resultados de resistência à compressão

Para afirmar se os valores dos ensaios de resistência à compressão do CPR são estatisticamente diferentes entre os grupos (teor de GO e dias de cura), foi utilizada a ANOVA (análise de variância).

Os resultados da ANOVA referente ao teste de resistência à compressão para as formulações sem GO e com a adição de 0,025% e 0,05% de GO, são apresentados na Tabela 48 (Apêndice E).

Verificou-se que as formulações sem GO, com 0,025% e 0,05% de GO, apresentaram, respectivamente, os valores do fator F igual a 82,01, 17,62 e 15,22, sendo todos superiores ao valor de $F_{\text{Fisher-Snedecor}}$, que foi de 3,68, indicando que existe uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos comparados. Além disso, os valores estão dentro do nível de significância estabelecido ($\rho < 5\%$) para as formulações sem GO, com 0,025% e 0,05% de GO ($8,39 \times 10^{-9} < 0,05$; $1,16 \times 10^{-4} < 0,05$; $2,45 \times 10^{-4} < 0,05$, respectivamente).

O Teste de Tukey, que relaciona as formulações entre seus grupos respectivos; ou seja, sem GO nos grupos de 7, 14 e 28 dias de idade, e o mesmo com 0,025% e 0,05% de GO adicionados na formulação, como mostra a Tabela 49 (Apêndice E), indicou que de 7 para 14 dias, tanto na adição de 0,025%, quanto na adição de 0,05% de GO, houve uma diferença não significativa estatisticamente entre as médias dos grupos, ou seja, $\rho > 5\%$. Isso pode ser explicado pela possibilidade de que, com a adição de GO, houve o favorecimento da formação de C-S-H em grande quantidade já nos primeiros dias, reduzindo a quantidade de silicato tricálcico disponível no CPR para a continuação da hidratação no mesmo ritmo, o qual continuou sendo hidratado, mas de forma mais lenta.

Já em relação às idades de rompimento do CPR (7, 14 e 28 dias), verificou-se que a ANOVA (Tabela 50) (Apêndice E) apresentou $F < F_{\text{Fisher-Snedecor}}$ ($0,38 < 3,68$) e $\rho > \alpha$ ($0,693 > 0,05$) para a idade de 14 dias. Logo, a hipótese nula não é falsa, e assim, o grupo para todas as formulações nessa idade não possui diferença significativa na resistência à compressão. Esse fato está alinhado à afirmativa anterior, visto que a resistência do concreto é mais expressiva na relação idade-resistência nos primeiros 7 dias de cura.

Dado o cenário de $F < F_{\text{Fisher-Snedecor}}$, o grupo com 14 dias de cura não é submetido a análise do Teste de Tukey. Já nos grupos com 7 e 28 dias, o teste é realizado, visto que $F > F_{\text{Fisher-Snedecor}}$ ($9,74 > 3,682$; $8,79 > 3,682$, respectivamente) e $\rho < \alpha$ ($1,94 \times 10^{-3} < 0,05$; $2,98 \times 10^{-3} < 0,05$, respectivamente).

Para o teste de Tukey, com os dados presentes na Tabela 51 (Apêndice E) observou-se que, com 7 dias e 28 dias, a formulação sem GO em relação à formulação com 0,025% de GO não apresentou diferença estatisticamente significativa entre os grupos, ao contrário do observado ao compará-los com a amostra contendo 0,05% de GO, confirmando que com a maior taxa de adição de GO, há uma melhora mais expressiva da resistência.

6.4.2 Análise de variáveis dos resultados de resistência à flexão

Para a análise estatística dos resultados de resistência à flexão utilizando ANOVA, comparando as três formulações, com os valores apresentados na Tabela 52 (Apêndice E), observou-se que as formulações sem GO, com 0,025% e 0,05% de GO, apresentaram, respectivamente, os valores do fator F igual a 38,67, 996,42 e 16,94, sendo todos superiores ao valor de $F_{\text{Fisher-Snedecor}}$, que foi de 5,14, indicando que existe uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos comparados. Além disso, os valores estão dentro do nível de significância estabelecido para as formulações sem GO, com 0,025% e 0,05% de GO ($3,73 \cdot 10^{-4} < 0,05$; $2,70 \times 10^{-8} < 0,05$; $3,41 \times 10^{-3} < 0,05$; respectivamente)

Ao realizar o Teste de Tukey (Tabela 53) (Apêndice E), observou-se que, para todos os grupos de formulação, na comparação das idades de 14 para 28 dias, $\rho > 5\%$, ou seja, não houve diferença estatisticamente significativa entre os grupos. Isso ocorre porque, ao utilizar o CP V-ARI como material cimentante, devido à sua composição rica em C_3S e uma finura menor que a do cimento convencional, tem-se um processo de hidratação mais acelerada já nos primeiros dias. Ao atingir os 28 dias, embora a resistência seja maior do que aos 14 dias, estatisticamente essa resistência não é significativamente diferente, pois o concreto está com uma quantidade menor de C_3S disponível para se transformar em C-S-H após o 14º dia.

Aplicando a ANOVA aos grupos referentes às idades de cura, observou-se, de acordo com os resultados da Tabela 54 (Apêndice E), que aos 28 dias, $F < F_{\text{Fisher-Snedecor}}$ ($3,94 < 5,14$) e $\rho > \alpha$ ($0,08 > 0,05$). Isso implica que não houve uma diferença estatisticamente significativa entre as formulações, logo, a análise do Teste de Tukey não é realizado para essa idade. No entanto, para as idades de 7 e 14 dias o teste é aplicado, visto que $F > F_{\text{Fisher-Snedecor}}$ ($40,69 > 5,14$; $5,56 > 5,14$, respectivamente) e $\rho < \alpha$ ($3,24 \times 10^{-4} < 0,05$; $4,30 \times 10^{-2} < 0,05$, respectivamente).

Com o Teste de Tukey (Tabela 55) (Apêndice E), foi possível observar uma diferença estatisticamente significativa na idade de 7 dias ao comparar as formulações, sem GO e com 0,025%, com a formulação contendo 0,05% de GO. Aos 14 dias, a diferença estatística também foi significativa, mas apenas quando se compara a amostra sem GO com a amostra contendo 0,025% de GO.

Constatou-se, assim, que até a idade de 7 dias de cura, o GO provocou o aprimoramento da resistência devido à composição e às características do cimento usado no CPR; dada à quantidade de C_3S e sua granulometria muito fina, esse cimento tem sua hidratação mais acelerada e, conseqüentemente, uma formação mais rápida de C-S-H. Com a adição de 0,05%

de GO, essa hidratação tornou-se mais uniforme e ainda mais rápida, conseqüentemente, atingiu-se resistências maiores já nos primeiros 7 dias de cura.

Esse efeito de aumento da resistência com diferença estatisticamente significativa somente prossegue até o 14º dia com a adição de 0,025% de GO, quando comparada essa formulação com a que não possui GO. Essa condição denota que a adição de 0,05% acelerou o processo de cura de tal modo que provocou a formação de C-S-H em grande quantidade já nos primeiros dias, se estabilizando antes do 14º dia. Em relação a formulação sem GO, na mesma idade, nota-se que os valores de resistência são estatisticamente próximos aos valores alcançados com a adição de 0,05%, ou seja, sem diferença estatisticamente significativa. Isso se explica observando o teste de resistência à flexão, em que os valores de resistência alcançados pelo CPR sem GO no 14º dia (Tabela 46) (Apêndice D), são próximos dos valores do CPR com adição de 0,05% de GO alcançados no 7º dia (Tabela 45) (Apêndice D). Já o CPR com 0,025% de GO manteve a hidratação de forma homogênea e atingiu valores com diferença estatisticamente significativa quando comparada com a formulação sem GO. No entanto, aos 28 dias de cura, todas as formulações atingiram um equilíbrio na resistência à flexão, e todos os resultados não apresentaram diferença estatisticamente significativa.

Depreende-se disso que a quantidade de formação de silicatos de cálcio hidratado não altera a resistência à flexão do CPR, quando se analisa os resultados sob a ótica estatística; isso ocorre porque as alterações na resistência à flexão são muito pequenas entre as formulações, diferentemente do que acontece com a resistência à compressão. Além disso, sabe-se que o concreto apresenta menor resistência quando submetido às forças de tração, devido à facilidade de separação dos agregados, o que não foi refreado com o uso do GO.

6.4.3 Análise de variância de testes de caracterização física do CPR com GO

A análise estatística dos valores de absorção de água, índice de vazios e massa específica não pôde ser realizada devido a poucos exemplares de corpos de prova para o teste, resultante da quantidade limitada de GO disponível para a produção.

Para a retração hidráulica, conforme visto na Tabela(s) 56 e 57 (Apêndice E), não foi observada diferença significativa em nenhuma das análises ($F < F_{\text{Fisher-Snedecor}}$) e $\rho > \alpha$, tanto ao considerar os grupos referentes a adição de GO quanto os de dias de cura. Isso ocorre porque a retração hidráulica de uma formulação para outra têm pequenas alterações, e estatisticamente não podem ser consideradas significativamente diferentes.

7 CONCLUSÕES

A adição de GO no CPR promoveu melhoria nas suas características e propriedades. As mudanças positivas estão ligadas às alterações químicas que o nanomaterial realiza nesse tipo de concreto. Como pôde ser observado pela MEV, quando adicionado o GO, seja na quantidade de 0,025% ou 0,05%, obtém-se, no processo de cura, uma melhoria da microestrutura, criando núcleos para a formação de mais C-S-H do que é comumente formado no concreto. Como consequência disso, o CPR ganha maior resistência à compressão.

Segundo o ensaio de compressão, a resistência mecânica foi otimizada com a adição de 0,05% de GO, quando comparado com o CPR sem GO, obtendo-se um aumento da resistência de 19,14%. Já para a resistência à flexão, esse aumento foi maior com a adição de 0,025% de GO, sendo de 11,80%; ambos os resultados na idade de 28 dias. Por meio da ANOVA e do Teste de Tukey, conseguiu-se afirmar que o resultado de resistência à compressão possui uma diferença estatisticamente significativa em relação à formulação sem GO. Contudo, o mesmo não foi observado no resultado da resistência à flexão. A alteração nos valores dessa resistência, entre o material sem o GO e com o GO é estatisticamente pequena; logo, não houve uma diferença significativa. Entretanto, essa condição pode ser considerada esperada, dado que o concreto não possui boa resistência quando sujeito a força de tração, uma vez que os agregados se separam mais facilmente nessas condições, e o GO não promoveu grandes alterações químicas para resistir a esse esforço.

Os testes de absorção de água e índices de vazios indicaram um refinamento da microestrutura do CPR. Mesmo que se trate de um material considerado de baixa permeabilidade, tanto que sua classificação é de impermeável, ao adicionar 0,05% de GO, diminuiu-se ainda mais essa permeabilidade (37,53%) quando comparado com o CPR sem GO. Esse refinamento fica mais evidente com o decréscimo de 33,91% no índice de vazios, quando comparada as mesmas formulações.

Por fim, é possível dizer que o GO tem o papel de aditivo controlador de hidratação. Tanto que, no processo de cura, a retração hidráulica do CPR, com adição de 0,05% de GO, foi maior (22,2%). Isso se deve ao fato de que o nanomaterial redistribuiu de forma mais homogênea a água de amassamento dentro do concreto, promovendo, assim, um processo de cura mais uniforme.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dado os resultados aqui apresentados, a pesquisa merece investigações mais aprofundadas, buscando respostas para algumas perguntas, a saber:

- a) adicionando teores mais elevados que 0,05% de GO no CPR, haveria um aumento, estabilidade ou diminuição da resistência mecânica?
- b) seria possível reduzir a quantidade de cimento no CPR ao adicionar GO na formulação, alcançando um produto com as mesmas características da formulação padrão?
- c) como seria o envelhecimento do CPR com a adição de GO? O comportamento seria o mesmo da formulação sem o nanomaterial? As folhas de GO na microestrutura do concreto teriam um processo de desgaste distinto do CPR?
- d) ao utilizar outro tipo de cimento no concreto com GO (CP I, II, III, IV), ocorreria o mesmo efeito de melhoria em suas características, assim como se deu ao utilizar o CP V - ARI?

REFERÊNCIAS

- ABESC. **Manual do concreto dosado em central**. 9. ed. São Paulo - SP: ABESC - Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem do Brasil, 2007. 35 p. Disponível em: <https://www.abesc.org.br/assets/files/manual-cdc.pdf>. Acesso em: 9 out. 2021.
- ABID, M.; HOU, X.; ZHENG, W.; WAQAR, G. Q. Mechanical properties of steel fiber-reinforced reactive powder concrete at high temperature and after cooling. **Procedia Engineering**, Netherlands, v. 210, 2017. p. 597 - 604. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.119>. Acesso em: 12 dez. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768-1/2019**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12142/2010**: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655/2022**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 131/1997**: Concreto endurecido - Determinação da retração hidráulica ou higrométrica do concreto. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13956-1/2012**: Sílica Ativa Para Uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13956-2/2012**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 2: Ensaio Químicos. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13956-4/2012**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 4: Determinação da Finura por Meio da Peneira 45 µm. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15530/2019**: Fibras de aço para concreto - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 16916/2021**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972/2021**: Determinação da massa unitária e índice de vazios. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16973/2021:**
Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.
Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054/2022:**
Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738/2015:**
Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro - RJ:
ABNT, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6467/2006:**
Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de
Janeiro - RJ: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502/2022:** Solos e
rochas - Terminologia. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211/2022:**
Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7214/2015:** Areia
normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7389-1/2009:**
Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 1: Agregado Miúdo. Rio de Janeiro -
RJ: ABNT, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9479/2006:**
Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova. Rio de
Janeiro - RJ: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778/2005:**
Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índice de vazios e
massa específica. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16915/2021:**
Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16886/2020.**
Concreto - Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52/2002**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2002.

AHMAD, S.; ZUBAIR, A.; MASLEHUDDIN, M. Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder. **Construction and Building Materials, Reino Unido**, Reino Unido, 2015. v. 99, p. 73 - 81. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.010>. Acesso em: 21 jul. 2022.

ALATAWNA, A.; BIRENBOIM, M.; NADIV, R.; BUZAGLO, M.; PERETZ-DAMARI, S.; PELED, A.; REGEV, O.; SRIPADA, R. The effect of compatibility and dimensionality of carbon nanofillers on cement composites. **Construction and Building Materials, Reino Unido**, v. 232, 10 p, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117141>. Acesso em: 26 jul. 2022.

ALMEIDA, A. F. de; SANTOS, G. S. F. dos; STAUDT, J.; BARICATTI, R. A. Síntese e caracterização de óxido de grafeno pelo método de oxidação química do grafite visando suas aplicações em adsorção de resíduos. *In*: Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2., 2019. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu - PR: IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2019. 6 p. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/V-042.pdf>. Acesso em: 29 out. 2022.

ALSAAD, A. J.; RADHI, M. S.; TAHER, M. J. Eco-friendly utilizing of iron filings in production reactive powder concrete. *In*: International Conference on Sustainable Engineering Techniques, 2., 2019. **Anais [...]** Jakarta, Indonésia: IOP Science, 2019, 10 p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/518/2/022051>. Acesso em: 7 de out de 2023.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 214/2011**: Evaluation of strength test results of concrete. Michigan: ACI, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1723/2022**: Standard guide for examination of hardened concrete using scanning electron microscopy. Philadelphia - PA: ASTM, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C457/C457M/2017**: Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete. Philadelphia - PA: ASTM, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487/2017**: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). Philadelphia - PA: ASTM, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C295/C295M/2019**: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). Philadelphia - PA: ASTM, 2019.

BABAK, F.; ABOLFAZL, H.; ALIMORAD, R.; PARVIZ, G. Preparation and mechanical properties of graphene oxide: cement nanocomposites. **The Scientific World Journal**, Londres, 2014, 10 p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/276323>. Acesso em: 7 dez. 2021

BARBOSA, M. S.; CARVALHO, C. M. de. Efeito de diferentes cores de pigmento na resistência mecânica do concreto pós-reativo (CPR). **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa - PR, v. 12, n. 12, p. 240 - 250, 2020. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/15014/209209213426>. Acesso em: 9 dez. 2021.

BASF: Glenium® 51 Aditivo Superplastificante de Terceira Geração. Camaçari - BA: Badische Anilin & Soda Fabrik, 2015. 1 catálogo técnico. Disponível em: <https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/basf/glenium%2051.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2023.

BASTOS, P. S. **Fundamentos do concreto armado**. Disciplina de estruturas de concreto armado I do curso de engenharia civil. Bauru - SP: Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023. 90 p. Notas de aula. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf>. Acesso em: 8 out. 2021.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2000. 488 p. ISBN 978-85-216-1003-8.

BENETON, A. C.; CINTRA, A. B.; CARVALHO, L. A. A.; ANTUNES, M. R. **Concreto de pós reativos ecoeficiente**. 2014, 58p. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia civil) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo - SP, 2014. Disponível em: https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2016/03/Concreto_de_P%C3%B3s_Reativos_Ecoeficiente.pdf. Acesso em: 10 dez. 2021.

BIZ, C. E. **Concreto de Pós Reativos**. 2001. 101 p. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Unicamp - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2001.245244>. Acesso em: 15 out. 2021.

BMRC. **Pó de Quartzo - Análises**. Rio Claro - SP, 2013. Dados técnicos do pó de quartzo produzido pelo Beneficiamento de Minérios Rio Claro Ltda. Disponível em: <http://bmrc.com.br/produtos/analises/>. Acesso em: 2 jan. 2023.

BOHN, T. R.; HERMANN, T. D.; TESTA, M. CANTARELLI, G. M.; SOKOLOVICZ, B. C. Determinação da umidade da areia. *In* SIC - Seminário de Iniciação Científica, 19., 2011. **Anais [...]**. Ijuí- RS: UNIJAI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2011. 5 p. Disponível em: <https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/16660/15342>. Acesso em: 16 out. 2022.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro - RJ: GEN - Grupo Editorial Nacional, 2016. n.p. ISBN-13: 978-8521631033.

CAMARGOS, J. S. F.; SEMMER, A. O.; SILVA, S. N. Características e aplicações do grafeno e do óxido de grafeno e as principais rotas para síntese. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa - MG, 2020. vol. 3, n. 8. p. 1118 - 1130. Disponível em: <https://doi.org/10.18540/jcecv13iss8pp1118-1130>. Acesso em: 18 out. 2021.

CAMP, C. **Part 6. Concrete Aggregates**. Tennessee, 2002, notas de aulas da University of Memphis do Department of Civil Engineering. Disponível em: http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/everything_about_concrete/06_aggregate.html. Acesso em: 25 jan. 2023.

CARNEIRO, G. V. H. S.; GIL, L. K. S.; CAMPOS NETO, M. P. **Calor de hidratação no concreto**. 2011, 67 p. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia civil) - Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia - GO, 2011. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/CALOR_DE_HIDRATA%C3%87%C3%83O_NO_CONCRETO.pdf. Acesso em: 2 dez. 2021.

CASTRO, V. L.; CLEMENTE, Z.; JONSSON, C.; SILVA, M.; VALLIM, J. H.; MEDEIROS, A. M. Z.; MARTINEZ, D. S. T. Avaliação de risco ambiental estimado pela exposição ao óxido de grafeno. *In: Workshop de Nanotecnologia Aplicada ao Agronegócio*, 9., 2017. **Anais [...]**. São Carlos - SP: Embrapa, 2017, p. 651 - 654. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/171439/1/2017AA63.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2023.

CASTRO, V. G.; CUNHA, T.; LACERDA, R. G.; SILVA, G. G. Grafenos produzidos e aplicados no centro de tecnologia em nanomateriais e grafeno da UFMG. **Revista Grafeno**, Belo Horizonte - BH, n. 1, p. 18 - 23, out. 2021.

CHEN, Z.; XU, Y.; HUA, J.; XU, W.; HUANG, L.; ZHOU, X. Mechanical properties and shrinkage behavior of concrete-containing graphene-oxide nanosheets. **Materials**, Suíça, v. 13, n. 3, 15 p., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13030590>. Acesso em: 9 out. 2023.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós - reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental**. 2014, 110 p. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo - RS. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/3207/RobertoChrist.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 out. 2021.

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. 2019, p. 152. Tese (doutorado em engenharia civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo - RS. Disponível em: http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/9052/Roberto%20Christ_.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 10 dez. 2021.

CHU, H.; ZHANG, Y.; WANG, F.; FENG, T.; WANG, L.; WANG, D. Effect of Graphene Oxide on Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete Prepared from Recycled Sand. **Nanomaterials**, Suíça, v. 10, 17 p, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano10091718>. Acesso em: 27 jul. 2022.

CLARE, K. E.; SHERWOOD, P. T. The effect of organic matter on the setting of soil-cement mixtures. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, Reino Unido, p. 625 - 630, 1954. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jctb.5010041107>. Acesso em: 26 jan. 2023

CROW, J. M. The concrete conundrum. **Chemistry World (online)**, Londres, p. 62 - 66, mar. 2008. Disponível em: https://www.rsc.org/images/Construction_tcm18-114530.pdf. Acesso em: 27 jan. 2022.

CWIRZEN, A.; PENTTALA, V.; VORNANEN, C. Reactive powder based concretes: mechanical properties, durability and hybrid use with OPC. **Cement and Concrete**

Research, Reino Unido, v. 38, n. 10, p. 1217 - 1226, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.013>. Acesso em: 26 jul. 2022.

DENG, M.; YI, J. Fatigue life prediction of orthotropic steel deck strengthened with UHPC under stochastic traffic load. **Frontiers in Materials**. Suíça, v. 10, 13 p., 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1208363>. Acesso em: 16 out. 2021.

DEVASENA, M.; KARTHIKEYAN, J. Investigation on strength properties of graphene oxide concrete. **International Journal of Engineering Science Invention Research & Development**, Índia, 8. ed., v 1. p. 307 - 310, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274066457_Investigation_on_strength_properties_of_Graphene_Oxide_Concrete. Acesso em: 1 dez. 2021.

DIDEIKIN, A. T.; VUL, A. Y. Graphene oxide and derivatives: the place in graphene family. **Frontiers in Physics**, Suíça, v. 6, 13 p, 2018 Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fphy.2018.00149>. Acesso em: 22 nov. 2021.

FAN, Z. **Investigation on properties of cementitious materials reinforced by graphene**. Pittsburgh. 2014, 101 p. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - University of Pittsburgh, Swanson School of Engineering, Pensilvânia. Disponível em: http://d-scholarship.pitt.edu/20957/1/Investigation_on_Properties_of_Cementitious_Materials_Reinforced_by_Graphene_R.pdf. Acesso em: 5 dez. 2021.

GANASSIN, I.; LIMA, O. C. M.; FARIA, S. H. B. Síntese de óxido de grafeno empregando o método de Hummers modificado. *In*: Encontro Anual de Iniciação Científica, 27., out. 2018. **Anais [...]**. Maringá - PR: UEM - Universidade Estadual de Maringá, 2018, 4 p. Disponível em: <http://www.eaic.uem.br/eaic2018/anais/artigos/3096.pdf>. Acesso em: 18 out. 2021.

GAO, W. **Graphene oxide**: Reduction recipes, spectroscopy, and applications. 1. ed. Nova Iorque: Springer International Publishing, 2015. 154 p. ISBN 978-3-319-15500-5.

GO: óxido de grafeno disperso em água. Responsável técnico -. Belo Horizonte - MG: CTNano/UFMG - Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno da Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. 1 rótulo da embalagem.

GONGALE, S.; BHOVATE, S.; VISHWAKARMA, A.; MUNDE, N. Review paper on reactive powder concrete (CPR). **International Journal for Research in Emerging Science and Technology**, 2022. v. 9, p. 725 - 730. Disponível em: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2207188.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

GRZESZCZYK, S.; JANUS, G. Lightweight reactive powder concrete containing expanded perlite. **Materials**, Suíça, n. 14, 18 p, 20, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14123341>. Acesso em: 10 dez. 2021.

HAN, B.; LI, Z.; ZHANG, L.; ZENG, S.; YU, X.; HAN, B.; OU, J. Reactive powder concrete reinforced with nano SiO₂-coated TiO₂. **Construction and Building Materials**, Reino Unido, v. 148, p. 104 - 112, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.065>. Acesso em: 23 jul. 2022.

HELENE, P. **La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón**. Buenos Aires: AATH - Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 1983. n. 10, p. 25 - 35.

HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S. C. Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, Reino Unido, v. 154, p. 72 - 87, 2017a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.181>. Acesso em: 23 jul. 2022.

HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S. C. Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, Reino Unido, v. 141, p. 271 - 288, 2017b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.009>. Acesso em: 14 mar. 2023.

HUANG, J.; CHEN, H.; JING, L.; FAM, D.; TOK, A. I. Y. Improved synthesis and growth of graphene oxide for field effect transistor biosensors. **Biomed Microdevices**, Países Baixos, 10 p., 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10544-016-0092-9>. Acesso em: 26 nov. 2021.

IPEK, M.; YILMAZ, K.; SÜMER, M.; SARIBIYIK, M. Effect of pre-setting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase. **Construction and Building Materials**, Reino Unido, n. 1, v. 25, p. 61 - 68, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.056>. Acesso em: 23 jul. 2022.

IPEK, M.; YILMAZ, K.; UYSAL, M. The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase. **Construction and Building Materials**, Reino Unido, n. 1, v. 26, p. 459 - 465, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.045>. Acesso em: 23 jul. 2022.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3. ed. São Paulo - SP: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2017. v. 1, 1745 p.

ITAMBÉ: Relatório de ensaio de cimento - CP V ARI. Curitiba - PR: Indústria de Cimentos Itambé, 2021. 1 catálogo técnico. Disponível em: https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/blade/_assets/pdf/relatorios/2021-12/CP-V-ARI.pdf. Acesso em: 10 dez. 2021.

JASRAI, L. **Data analysis using SPSS**. 1. ed. Los Angeles: Sage, 2020. 468 p. ISBN-13: 978-9353883287.

JILLAVENKATESA, A.; DAPKUNAS, S. J.; LUM, L. H. **Particle size characterization**. 1. ed. Washington - DC: NIST - National Institute of Standards and Technology, 2001. 175 p.

JOHN, V. M. On the sustainability of concrete. **Sustainable Building and Construction**. Nairóbi, Quênia, p. 62 - 63, 2003. Disponível em: <http://cbcs.org.br/userfiles/bancodeconhecimento/on%20the%20sustainability%20of%20concrete%20unep%20sustainable%20concrete%20005-098.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2022.

JYOTHIMOL, P.; HAZEENA, R.; ISSAC, M. T.; MATHIAZHAGAN, A. Effect of reduced graphene oxide on the mechanical properties of concrete. *In*: International Conference on

Modeling and Simulation in Civil Engineering, 5., 2020. **Anais [...]**: Coulão, Índia: IOP Science, 2020, 8 p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/491/1/012038>. Acesso em: 9 de out de 2023.

KADHIM, A. K.; MOHAMMAD, M. R.; ALI, A. I. A. Enhancing the efficiency of perovskite solar cells by modifying perovskite layer with rGO additive. **Chemical Physics Letters**, Amsterdã, v. 786, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.139189>. Acesso em: 27 nov. 2021.

KAEFER, L. F. **A evolução do concreto armado**. Disciplina de concepção, projeto e realização das estruturas: aspectos históricos do curso de engenharia civil. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), São Paulo - SP, 1998, 43 p. Notas de aula. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/Historiado/Concreto.pdf>. Acesso em: 8 out. 2021.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - a miniature slump test. cement, concrete, and aggregates. **American Society for Testing and Materials (ASTM)**, Pensilvânia, v. 2, n. 2, p. 95 - 102, 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/CCA10190J>. Acesso em: 2 maio 2023.

LERF, A.; HE, H.; FORSTER, M.; KLINOWSKI, J. Structure of graphite oxide revisited. **Journal of Physical Chemistry B**, EUA, v. 102, p. 4477 - 4482, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jp9731821>. Acesso em: 28 out. 2021.

LONG, G.; WANG, X.; XIE, Y. Very-high-performance concrete with ultrafine powders. **Cement and Concrete Research**, Reino Unido, v. 32, n. 4, p. 601 - 605, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00732-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00732-3). Acesso em: 18 jul. 2022.

LOPES, D. F. **Créditos de carbono na indústria do cimento**. 2011. 29 p. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/36902/000793021.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 jul. 2023.

MACHI, I. S.; DONÁ, W.; BERTEQUINI, A. B. T. Estudo da resistência à compressão do concreto reforçado com adição de sílica ativa. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, Toledo - PR, v. 4, n. 2, 2019. p. 18 - 34. Disponível em: <http://www.ojs.toledo.br/index.php/engenharias/article/view/3324/549>. Acesso em: 13 dez. 2022.

MALLMANN, P. F. **Concreto de pós reativos: adição de nanosílica**. 2013, 67 p. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia, Porto Alegre - RS. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/78225/000896901.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2022.

MAROLIYA, M. K. A state of art - on development of reactive powder concrete. **International Journal of Innovative Research e Development**, 8. ed., v. 1, p. 493 - 503, 2012. Disponível em: https://www.internationaljournalcorner.com/index.php/ijird_ojs/article/view/133175/92382. Acesso em: 5 dez. 2021.

MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; FOIATO, M.; REPETTE, W. L.; GLEIZE, P. J. P. Workability maintenance of water-reducing admixtures in high-performance pastes produced with different types of Portland cement. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro- RJ, v. 26, n.1, 2021, 9 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1225>. Acesso em: 12 dez. 2021.

MAYHOUB, O. A.; NASR, E.A.R.; ALI, Y. A.; KOHAIL, M. The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review. **Ain Shams Engineering Journal**, Egito, 1. ed., v. 12, p. 145 - 158, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.016>. Acesso em: 10 dez. 2021.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo - SP: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 1994. 573 p. ISBN-13: 978-8572660402.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN D. **Concrete**. 2. ed. Pearson, Itália: Prentice Hall, 2002. 664 p. ISBN-13: 978-0130646323.

MOSTOFINEJAD, D.; NIKOO, M. R.; HOSSEINI, S. A. Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). **Construction and Building Materials**, Reino Unido, v. 123, p. 754 - 767, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.082>. Acesso em: 2 set. 2019

MORAES Jr., J. S. L. Aditivos Para Concreto. **Revista Científica Eletrônica de Ciências Aplicadas da Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias**, Itapeva - SP, 1. ed., 4 p., 2014. Disponível em: http://fait.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/HtBSo4Wx0iBUAD2_2014-4-22-17-20-16.pdf. Acesso em: 12 out. 2021.

NEGRETI, M. A. P. **Obtenção e caracterização de compósitos poliméricos com óxido de grafeno reduzido**. 2016. 104 p. Dissertação (mestrado em ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI - USP), São Paulo - SP, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-13032017-115009/publico/MariaAnitadePaulaNegretiOrig16.pdf>. Acesso em: 19 out. 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre - RS: Bookman Editora Ltda. 2016. 887 p. ISBN 9788582603659.

NILSON, A. H.; DARWIN, D.; DOLAN, C. W. **Design of concrete structures**. Nova Iorque: Tata McGraw-Hill. 13. ed., 2005. ISBN: 0-007-059854-1.

OLIVEIRA, A. G. de; NASCIMENTO, J. P.; GORGULHO, H. F.; MARTELLI, P. B.; FURTADO, C. A.; FIGUEIREDO, J. L. Electrochemical synthesis of TiO₂/graphene oxide composite films for photocatalytic applications. **Journal of Alloys and Compounds**, Países Baixos, v. 654, p. 514 - 522, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.110>. Acesso em: 27 nov. 2021.

OLIVEIRA, I. R. B. de. **Materiais compósitos à base de cimento com adições de vidro cominuído como agregado fino para aplicação na construção civil**. 2022, 107 p. Dissertação (mestrado em engenharia e ciência de materiais) - Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), Poços de Caldas - MG. Disponível em: <https://btdt.UNIFAL-mg.edu.br>

[8443/bitstream/tede/2057/5/Dissertacao_IgorRafaelButtignolDeOliveira_2022_PPGCEM.pdf](https://repositorio.ufscar.br/bitstream/tede/2057/5/Dissertacao_IgorRafaelButtignolDeOliveira_2022_PPGCEM.pdf). Acesso em: 9 ago. 2022.

OLIVEIRA, L. M. R. **Membranas poliméricas híbridas policarbonato/grafeno: correlação estrutura e propriedades de transporte**. 2018, 178 p. Tese (doutorado em ciências) - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia Departamento de Química Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ). Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/10428/OLIVEIRA_Lucas2018.pdf?sequence=5&isAllowed=y. Acesso em: 30 nov. 2021.

OLIVEIRA, M, de; POLETTO, M.; SEVERO, T. C. Rota Química Para Produção de Óxido de Grafeno a partir de Oxidação do Grafite Comercial. **Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada**, Caxias do Sul - RS, v. 3, n. 6, p. 16 - 20, 2018. Disponível em: <https://sou.ucs.br/revistas/index.php/ricaucs/article/view/67#:~:text=A%20morfologia%20do%20grafite%20apresenta,utilizando%20a%20rota%20qu%C3%ADmica%20proposta>. Acesso em: 25 out. 2021.

PAN, Z.; HE, L.; QIU, L.; KORAYEM, A. H.; LI, G.; ZHU, J. W.; COLLINS, F.; LI, D.; DUAN, W. H.; WANG, M. C. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite. **Cement and Concrete Composites**, Reino Unido, v. 58, p. 140 - 147, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>. Acesso em: 28 jul. 2022.

PRIYADARSINI, S.; MOHANTY, S.; MUKHERJEE, S.; BASU, S.; MISHRA, M. Graphene and graphene oxide as nanomaterials for medicine and biology application. **Journal of Nanostructure in Chemistry**, Alemanha, v. 8, p. 123 - 137, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40097-018-0265-6>. Acesso em: 30 nov. 2022.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. Zurique. **Cement and Concrete Research**, Reino Unido, v. 25, n. 7, p. 1501 - 1511, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2). Acesso em: 17 jul. 2022.

ROHDEN, A. B.; KIRCHHEIM, A. P.; MOLIN, D. D. Strength optimization of reactive powder concrete. **Revista IBRACON**, 2020. v. 13, n. 5, 13 p., 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952020000500007>. Acesso em: 10 dez. 2022.

ROMERO, J. A. V.; CUAYA-SIMBRO, G.; MORALES-MALDONADO, E. R. Optimizing content graphene oxide in high strength concrete. **International Journal of Scientific Research and Management**, Índia, v. 4, n. 6, p. 4324 - 4332, 2016. Disponível em: <https://ijsrm.net/index.php/ijsrm/article/download/367/319/619>. Acesso em: 7 dez. 2022.

RUTHERFORD, A. **Anova and ancova a GLM approach**. 2. ed. Nova Jersey, EUA: Hoboken Wiley, 2011. 344 p. ISBN-13: 978-0470385555.

SANJUÁN, M. Á.; ANDRADE, C. Reactive powder concrete: durability and applications. **Applied Sciences**, Suíça, v. 11, 12 p., 2021. 12 p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app11125629>. Acesso em: 15 out. 2021.

SANGERMANO, M.; MARCHI, S.; VALENTINI, L.; BON, S. B.; FABBRI, P. Transparent and conductive graphene oxide-polyethylenglycol diacrylate coatings obtained by photopolymerization. **Macromolecular Materials and Engineering**. Alemanha, 5. ed., v.

296, p. 401-407, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/mame.201000372>. Acesso em: 22 nov. 2021.

SARIKA, S.; JOHN, E. A study on properties of reactive powder concrete. 11. ed. **International Journal of Engineering Research & Technology**, 2015. p. 110 - 113. v. 4. Disponível em: <https://www.ijert.org/research/a-study-on-properties-of-reactive-powder-concrete-IJERTV4IS110170.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2021.

SEDAGHAT, A.; RAM, M. K.; ZAYED, A.; KAMAL, R.; SHANAHAN, N. Investigation of physical properties of graphene-cement composite for structural applications. **Open Journal of Composite Materials**, EUA, v. 4. p. 12 - 21, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/ojcm.2014.41002>. Acesso em: 6 dez. 2021.

SEGUNDO, J. E. D. V. **Influência da densidade de corrente e da composição do eletrólito no desempenho eletroquímico de monocamada de grafeno em bateria de íons de lítio**. 2017, 84 p. Dissertação (doutorado em engenharia química) - Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande - PB. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/659>. Acesso em: 28 nov. 2021.

SHAH, R.; KAUSAR, A.; MUHAMMAD, B.; SHAH, S. Progression from graphene and graphene oxide to high performance polymer-based nanocomposite: A review. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**. EUA, 2. ed., v. 54, p. 173 - 183. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2014.955202>. Acesso em: 27 fev. 2022.

SILVA, G.; DALCIN, C.; PEDROZO, E. C.; ENDERLE, T. Propriedades e aplicações do concreto de ultra-alto desempenho produzido com pós reativos. *In*: Seminário de Iniciação Científica, 28., 2020. **Anais [...]**. Santa Rosa - RS: Unijuí - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2020. 7 p. Disponível em: <https://publicacoes.eventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/18256/16990>. Acesso em: 16 out. 2021.

SILVA, I. S. da. **Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento**. 1995, 129 p. Dissertação (mestrado em engenharia de estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos - SP. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-02052018-093914/publico/Dissert_Silva_InesS.pdf. Acesso em: 26 jan. 2022.

SMANIOTTO, A. **Obtenção, caracterização e funcionalização seletiva de óxido de grafeno com espécies sulfuradas e fragmentos orgânicos**. 2015, 158 p. Tese (doutorado em química) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis - SC. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/133236/334232.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 out. 2021.

SMITH, A. T.; CHANCE, A. M. L.; ZENG, S.; LIU, B.; SUN, L. Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites. **Nano Materials Science**. China, 1. ed., v. 1, p. 31 - 47, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.004>. Acesso em: 29 de out. 2021.

SINGH, H. **Steel fiber reinforced concrete: Behavior, modelling and design**. 1. ed. Nova Iorque: Springer, 2016. 186 p. ISBN-13: 978-9811025068.

SOMASRI, M.; KUMAR, B. N. Graphene oxide as nano material in high strength self-compacting concrete. **Materials Today: Proceedings**. Reino Unido, v. 43, p. 2280 - 2289, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1085>. Acesso em: 27 jul. 2022.

SONG, J.; LIU, S. Properties of reactive powder concrete and its application in highway bridge. **Advances in Materials Science and Engineering**. EUA, 7 p, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2016/5460241>. Acesso em: 17 out. 2021.

SOTO, N. T. A. **Avaliação das propriedades do concreto de pós reativos: Um estudo de durabilidade**. 2014. 59 p. Monografia (pós-graduação em patologias da construção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Construção Civil, Curitiba-PR. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/19792/2/CT_CEPAC_V_2014_08.pdf. Acesso em: 15 out. 2021.

STAQUET, S.; ESPION, B. Influence of Cement and Silica Fume Type on Compressive Strength of Reactive Powder. International Symposium on High Strength/High Performance Concrete, 6., 2002. **Anais [...]**. Bruxelas: University Brussels, 2002. p. 1421 - 1436. Disponível em: <https://dipot.ulb.ac.be/dspace/bitstream/2013/146186/3/Leipzig2002simili.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2022.

STEIGER, R. W. The history of concrete. **Aberdeen Group**, EUA, part. 1, 3 p., 1995. Disponível em: <https://pita.ess.washington.edu/tswanson/wp-content/uploads/sites/9/2018/10/The-History-of-Concrete.pdf>. Acesso em: 11 out. 2021.

SUO, Y.; GUO, R.; XIA, H.; YANG Y.; ZHOU, B.; ZHAO, Z. A review of graphene oxide/cement composites: performance, functionality, mechanisms, and prospects. **Journal Building Engineering**, Países Baixos, v. 53, p. 10461, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104502>. Acesso em: 3 set. 2023.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. **Using multivariate statistics**. 6. ed. Boston, EUA: Pearson, 2012. 983 p. ISBN-13: 978-0205849574.

TAI, Y.; PAN, H.; KUNG, Y. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C. **Nuclear Engineering and Design**, Países Baixos, 7. ed., v. 241, p. 2416 - 2424, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.04.008>. Acesso em: 17 out. 2021.

TECNOSIL. **Sílica ativa**. Dados técnicos da sílica ativa produzida pela Tecnosil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda, 2012. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>. Acesso em: 3 jan. 2023.

TEIXEIRA, S. M. F. **Determinação da influência do aditivo superplastificante no desempenho de um concreto estrutural autoadensável de resistência de 40 MPa**. 2014, 146 p. Dissertação (mestrado em construção civil) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Belo Horizonte - MG. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9RTGMM/1/disserta__o_de_sandra_moreira_junho_2014.pdf. Acesso em: 28 jan. 2023.

TORRES, A.; AGUAYO, F.; ALLENA, S.; ELLIS, M. The effect of various polynaphthalene sulfonate based superplasticizers on the workability of reactive powder concrete. **Journal of Building Material Science**, Singapura, 1 ed., v. 2, p. 24 – 29, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.30564/jbms.v2i1.2731>. Acesso em: 12 dez. 2021.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIÁ, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. *In*: IBRACON; **Concreto: Ciência e tecnologia**, São Paulo - SP: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2011, cap. 36, 44 p. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wpcontent/uploads/2014/07/lc53.pdf>. Acesso em: 13 out. 2021.

VACCIOLI, K. B. **Efeito da adição de sílica, óxido de grafeno e agentes organossulfurados na vulcanização e nas propriedades de compostos bem borracha natural**. 2022, 183 p. Tese (doutorado em ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli USP), São Paulo – SP. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2022.tde-05092022-101237>. Acesso em: 28 ago. 2023.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: Dosagem e propriedades mecânicas**. 2004, 168 p. Tese (doutorado em engenharia de estruturas) - Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), 2004. 168 p. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-23082006-095043/publico/2004DO_RomelDVanderlei.pdf. Acesso em: 9 dez. 2021.

VANDERLEI, R. D.; GIONGO, J. S. Análise Experimental do Concreto de Pós Reativos: Dosagem e Propriedades Mecânicas. **Caderno de Engenharia de Estruturas**, São Carlos - SP, v. 8, n. 33, p. 115 - 148, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237317840_Analise_experimental_do_concreto_de_pos_reativos_Dosagem_e_propriedades_mecanicas. Acesso em: 17 jul. 2022.

VANDERLEI, R. D.; PEINADO, H. S.; NAGANO, M. F.; FILHO, R. G. D. M. Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como agregado em concretos e argamassas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia - GO, v. 8, n. 1, p. 21 - 31, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v8i1.26534>. Acesso em: 20 jul. 2023.

VIANA, T. M. **Avaliação do comportamento de concretos de pós reativos com incorporação de nanotubos de carbono de paredes múltiplas frente a elevadas temperaturas**. 2019, 99 p. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET - MG), Belo Horizonte - MG. Disponível em: <https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo?idArquivo=2236233&key=0e5630a05bfb69e909f724aa6f196492>. Acesso em: 15 out. 2021.

VITALI, L. L. **Aula prática: Dosagem e moldagem de concreto**. Curso de dosagem de concreto e moldagem de corpo de prova da VI Semana Acadêmica de Engenharia Civil. UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2018. 61 p. Disponível em: <https://betons.paginas.ufsc.br/files/2018/08/apostila-aula-pratica-vi-saec.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

WU, Y.; ZHANG, J.; LIU, C.; ZHANG, Z.; LAMBERT, P. Effect of graphene oxide nanosheets on physical properties of ultra-high-performance concrete with high volume

supplementary cementitious materials. **Materials**, Suíça, v. 13, 14 p., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13081929>. Acesso em: 26 jul. 2022.

YANG, G.; WEI, J.; YU, Q.; HUANG, H.; LI, F. Investigation of the match relation between steel fiber and high-strength concrete matrix in reactive powder concrete. **Materials**, Suíça, v. 12, 12 p., 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12111751>. Acesso em: 24 jul. 2022.

YANZHOU, P.; JUN, Z.; JIUYAN, L.; JIN, K.; FAZHOU, W. Properties and microstructure of reactive powder concrete having a high content of phosphorous slag powder and silica fume. **Construction and Building Materials**. Reino Unido, v. 101, p. 482 - 487, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.046>. Acesso em: 18 jul. 2022.

YAZICI, H.; YARDIMCI, M.; AYDIN, S.; KARABULUT, A. S. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. **Construction and Building Materials**, Reino Unido, 3. ed., v. 23, p. 1223 - 1231, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.003>. Acesso em: 21 jul. 2022.

YAZICI, H.; YIĞİTER, H.; KARABULUT, A. S.; BARADAN, B. Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. **Fuel**, Países Baixos, 12. ed., v. 87, p. 2401 - 2407, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.03.005>. Acesso em: 21 jul. 2022.

YEKE, L.; YU, Z. Effect of graphene oxide on mechanical properties of UHPC and analysis of micro-control mechanism. **Materials Research Express**, Reino Unido, v. 8, 11 p, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac2015>. Acesso em: 27 jul. 2022.

YIĞİTER, H.; AYDIN, S.; YAZICI, H.; YARDIMCI, M. Y. Mechanical performance of low cement reactive powder concrete. **Composites Part B: Engineering**, Reino Unido, 8. ed., v. 43, p. 2907 - 2914, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2012.07.042>. Acesso em: 21 jul. 2022.

YUNSHENG, Z.; WEI, S.; SIFENG, L.; CHUJIE, J.; JIANZHONG, L. Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors. **Cement and Concrete Composites**, Reino Unido, 9. ed., v. 30, p. 831 - 838, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.008>. Acesso em: 19 jul. 2022.

ANEXO A - Características básicas dos materiais que constitui o CPR

Tabela 2 – Parâmetros de seleção para componentes para o CPR

Componentes	Parâmetros	Função	Tamanho da Partícula	Tipos
Areia	Boa dureza, disponibilidade e baixo custo	Aumentar a resistência e agregar	150 µm - 600 µm	Natural, triturado
Cimento	C ₃ S: 60%; C ₂ S: 22%; C ₃ A: 3,8%; C ₄ AF: 7,4%	Material aglutinante, produtor de hidratos primários	1 µm - 100 µm	OPC finura média
Pó de Quartzo	Finura	Reatividade máxima durante o calor de tratamento	5 µm - 25 µm	Cristalino
Sílica Ativa	Natureza e quantidade de impurezas	Preencher os vazios, melhorar a reologia, produzir os hidratos secundário	22 m ² /g (Finura)	Adquirido da indústria de zircônio (altamente refinado)
Fibras de Aço	Índice de bom aspecto	Melhorar a ductilidade	L: 13 mm - 25 mm Diâmetro: 0,15 mm - 0,5 mm	Corrugado.
Superplastificante	Menor retardador característico	Reduzir a quantidade de água	-	À base de poliacrilato ou policarboxilato

Fonte: Maroliya (2012, p. 497, tradução nossa).

Tabela 3 – Características químicas da sílica ativa

Composição Química	Teor (%)
Silício (Si)	88,43
Sódio (Na)	2,786
Potássio (K)	0,658
Alumínio (Al)	0,316
Cálcio (Ca)	0,286
Magnésio (Mg)	0,122
Titânio (Ti)	0,091
Ferro (Fe)	0,015

Fonte: Corning *apud* Christ (2019, p. 59).

Tabela 4 – Características químicas do CP V ARI

Composição Química	Teores %
Al ₂ O ₃	4,51
SiO ₂	18,54
Fe ₂ O ₃	2,75
CaO	62,09
MgO	3,62
SO ₃	2,85
Perda Fogo	3,57
CaO Livre	1,55
Resíduo Insolúvel	0,63
Equivalente Alcalino	0,67

Fonte: Adaptada de Itambé (2021, n.p.).

Tabela 5 – Características físicas do CP V ARI

Características	Valores	
Expansibilidade a Quente (mm)	0,25	
Tempos de Pega (min)	Início	186
	Fim	248
Consistência Normal (%)	29,9	
Blaine (cm ² /g)	4366	
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	23,9
	3 dias	37,9
	7 dias	44,4
	28 dias	53,1

Fonte: Adaptada de Itambé (2021, n.p.).

ANEXO B - Formulações presentes na literatura de CPR

Tabela 6 – Composição dos CPR formulados por Richard e Cheyrezy (proporção)

Lote	CPR 200				CPR 800	
	Sem Fibra		Fibrado		Agregados de Sílica	Agregados de Aço
Cimento Portland	1	1	1	1	1	1
Sílica Ativa	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Areia (150 - 600 μm)	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Pó de Quartzo (10 μm)	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Superplastificante (Poliacrilato)	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Fibra de Aço (12 mm)	-	-	0,175	0,175	-	-
Fibra de Aço (3 mm)	-	-	-	-	0,63	0,63
Agregados de aço (< 800 μm)	-	-	-	-	-	1,49
Água	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
Pressão de Compactação (MPa)	-	-	-	-	50	50
Temperatura de Tratamento Térmico ($^{\circ}\text{C}$)	20	90	20	90	250 - 400	250 - 400
Resistência à Compressiva (MPa)	175	285	225	270	490 - 680	650 - 810

Fonte: Adaptado de Richard; Cheyrezy (1995, p. 1502, tradução nossa).

Tabela 7 – Composição dos CPR formulados por Yang, Wei, Yu, Huang e Li (proporção)

Lote	Cimento Portland (CEM II - 52,5 R)	Sílica Ativa (Elkem)	Areia ($\leq 315 \mu\text{m}$)	Pó de Quartzo (10 μm)	Água	Superplastificante (Policarboxilato) (% por Massa dos Materiais Cimentícios)	Resistência à Compressão (MPa)
CPR 150	1	0,2	1,3	-	0,19	3	159,24
CPR 200	1	0,2	1,3	-	0,15	3	205,46
CPR 270	1	0,25	0,5	0,4	0,17	3	277,64

Fonte: Yang *et al.* (2019, p. 3, tradução nossa).

Tabela 8 – Composição do CPR formulado por Staquet e Espion

Composição do CPR	Quantidade (kg/m ³)	Relação Material/Cimento
Cimento (CEM I - 42.5 R)	693	1
Sílica Ativa (0.1 - 1000 µm)	225	0,324
Areia de Sílica (≤ 260 µm)	991	1,43
Quartzo Triturado (7 µm)	208	0,3
Fibras de Aço (0,2 mm)	151	0,218
Superplastificante (Policarboxilato)	14,4	0,021
Água	159	0,23
Resistência à Compressão (MPa) com Cura a 20°C	187	
Resistência à Compressão (MPa) com Cura a 90°C	258	

Fonte: Adaptado de Staquet; Espion (2002, p. 1422, tradução nossa).

Tabela 9 – Composição do CPR formulado por Song e Liu (kg/m³)

Cimento Portland Comum (42,5)	Sílica Ativa	Água	Superplastificante	Areia (1,25 mm)	Fibra de Aço (12 - 15 mm x 0.2 - 0.25 mm)	Resistência à Compressão (MPa)
884,3	221,1	148,2	27,6	1105,4	150	158

Fonte: Song; Liu (2016, p. 2, tradução nossa).

Tabela 10 – Composição do CPR formulado por Vanderlei e Giongo e do CPR utilizado por Oliveira (proporção)

Material	Proporção	Consumo (kg/m ³)	Material	Proporção	Consumo (kg/m ³)
Cimento (CP V ARI - RS)	1	854	Cimento (CP V-ARI)	1	881,9733
Areia (0,074 - 0,59 mm)	1,01	939	Areia (0,075 - 0,6 mm)	1,019	898,7308
Pó de Quartzo (0,01 - 0,08 mm)	0,235	201	Pó de Quartzo (< 4,65 µm)	0,164	114,6436
Sílica Ativa (< 0,5 µm)	0,216	210	Microsílica (0,2 µm)	0,152	134,0599
Superplastificante (Glenium 51)	0,02	17	Superplastificante (Glenium 51)	0,035	30,869
Água	0,2	184	Água	0,3	234,592
Resistência à Compressão (MPa) após 28 Dias		187	Resistência à Compressão (MPa) após 28 Dias		113

Fonte: Adaptado de Vanderlei; Giongo (2006, p. 119 e 129); Oliveira (2021, p. 66).

Tabela 11 – Composição dos CPR formulados por Cwirzen, Penttala e Vornanen (proporção)
(continua)

Mistura	Quantidade de Cimento	Tipo de Cimento	Sílica Ativa (x 0,01)	Tipo de Sílica Ativa	Agregado					Pó de Quartzo							Resistência à Compressão (MPa)
					Areia (160 - 600 µm) (x 0,1)	Diabas (3 - 6 mm)	Granito (2 - 5 mm) (x 0,1)	Granito (5 - 8 mm)	Fibras de Aço (x 0,1)	Nilsä (0,4 - 250 µm) (x 0,1)	Kemiö (0,4 - 70 µm) (x 0,1)	EHK (0,4 - 12 µm) (x 0,1)	SAD (0,4 - 1000 µm) (x 0,1)	(Água + Sólido) (x 0,01)	Água/Cimento (x 0,01)	Água/Superplastificante (x 0,01)	
F23/022/N	1	SR	25	920	8	-	-	-	-	-	-	2	-	4,5	22	18	146
F23/022/H	1	SR	25	920	8	-	-	-	-	-	-	2	-	4,5	22	18	181
F24/022/N	1	SR	25	920	8	-	-	-	-	-	-	2	5	22	18	127	
F24/022/H	1	SR	25	920	8	-	-	-	-	-	-	2	5	22	18	152	
F24/022/2/N	1	SR	25	983	8	-	-	-	-	-	-	2	3	22	18	142	
F24/022/2/H	1	SR	25	983	8	-	-	-	-	-	-	2	3	22	18	188	
F26/022/N	1	SR	25	983	8	-	-	-	-	-	2	-	-	3,2	22	18	152
F26/022/H	1	SR	25	983	8	-	-	-	-	-	2	-	-	3,2	22	18	184
F26/022/2/N	1	SR	25	920	8	-	-	-	-	-	2	-	-	5	22	18	137
F26/022/2/H	1	SR	25	920	8	-	-	-	-	-	2	-	-	5	22	18	176
F26/022/F/ H	1	SR	25	983	8	-	-	-	2	2	2	-	-	4,2	22	18	202
F26/022/F/ N	1	SR	25	983	8	-	-	-	2	-	2	-	-	4,2	22	18	155
F26/022/2/F /H	1	SR	25	983	8	-	-	-	3	-	2	-	-	5	22	18	202
F26/022/2/F /N	1	SR	25	983	8	-	-	-	-	-	2	-	-	5	22	18	158
F26/022/3/H	1	SW	25	983	8	-	-	-	-	-	-	-	-	3	22	18	187
F26/022/3/N	1	SW	25	983	8	-	-	-	-	-	-	-	-	3	22	18	152
F30/022/3/H	1	SR	25	983	6	-	-	-	-	4	-	-	-	5	22	18	150
F30/022/3/H	1	SR	25	983	6	-	-	-	-	4	-	-	-	5	22	18	195
F3/022/3/H	1	SR	25	983	11	-	-	-	-	-	-	-	-	5	22	18	177
F3/022/3/N	1	SR	25	983	11	-	-	-	-	-	-	-	-	5	22	18	129
F33/022/3/H	1	SR	25	983	7	-	-	-	-	-	2	-	0,6	4	22	17	189
F33/022/3/N	1	SR	25	983	7	-	-	-	-	-	2	-	0,6	4	22	17	147

Tabela 11 – Composição dos CPR formulados por Cwirzen, Penttala e Vornanen (proporção)
(conclusão)

Mistura	Agregado								Pó de Quartzo								Resistência à Compressão (MPa)
	Quantidade de Cimento	Tipo de Cimento	Sílica Ativa (x 0,01)	Tipo de Sílica Ativa	Areia (160 - 600 µm) (x 0,1)	Diabas (3 - 6 mm)	Granito (2 - 5 mm) (x 0,1)	Granito (5 - 8 mm)	Fibras de Aço (x 0,1)	Nilsä (0,4 - 250 µm) (x 0,1)	Kemio (0,4 - 70 µm) (x 0,1)	EHK (0,4 - 12 µm) (x 0,1)	SAD (0,4 - 1000 µm) (x 0,1)	(Água + Sólido) (x 0,01)	Água/Cimento (x 0,01)	Água/Superplastificante (x 0,01)	
F26/024/G /H	1	SR	25	983	8	-	10	-	1	-	2	-	-	4,5	24	18	170
F26/023/G /H	1	SR	25	983	8	-	10	-	-	-	2	-	-	4,5	23	18	167
F26/023/G /N	1	SR	25	983	8	-	10	-	-	-	2	-	-	4,5	23	18	140
F26/023/G /2/H	1	SW	25	983	8	-	1,9	1,16	-	-	2	-	-	4,5	23	18	165
F26/023/G /2/N	1	SW	25	983	8	-	1,9	1,16	-	-	2	-	-	4,5	23	18	145
F26/024/G /3/H	1	SR	25	983	8	-	-	2	-	-	2	-	-	4,5	24	19	172
F26/024/G /3/N	1	SR	25	983	8	-	-	2	-	-	2	-	-	4,5	24	19	132
F26/026/D /H	1	SR	25	983	8	2	-	-	-	-	2	-	-	4	26	21	188
F26/026/D /N	1	SR	25	983	8	2	-	-	-	-	2	-	-	4	26	21	139

Nota: SR: Cimento Portland resistente a sulfatos (CEM I 42.5 N).

SW: Cimento Portland de baixa temperatura (CEM I 42.5 N BV/SR/LA).

Sílica Ativa 920: marca Elkem, mais de 97% de SiO₂ e menos de 0,5% de carbono, 57,80 - 116,0 µm.

Sílica Ativa 983: marca Elkem, mais de 87% de SiO₂ e menos de 2% de carbono, 26,30 - 43,70 µm.

Fibras de Aço: marca Baekert, comprimento de 12 mm e diâmetro de 0,1 mm.

Superplastificante: policarboxilato.

Fonte: Cwirzen; Penttala; Vornanen (2008, p. 1221, tradução nossa).

ANEXO C - Formulações de materiais com matriz cimentícia com adição de GO

Tabela 12 – Composição do concreto com GO formulado por Wu, Zhang, Liu, Zheng e Lambert

Mistura	Água (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Sílica Ativa (kg/m ³)	Cinza Volante (kg/m ³)	Escória de Alto-Forno Granulada Moída (kg/m ³)	Areia de Quartzo (kg/m ³)	Areia de Quartzo (kg/m ³)	Areia de Quartzo (kg/m ³)	Areia de Quartzo (kg/m ³)	Óxido de Grafeno (kg/m ³)	Superplastificante (Policarboxilato) (kg/m ³)	Fibra de Aço (kg/m ³)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
UHPC0	151	453,8	180	360	93	473	341	274	0,00	4,35	120	97,0	24,5	
UHPC1	151	453,75	180	360	93	473	341	274	0,05	4,35	120	112,0	26,5	
UHPC2	151	453,71	180	360	93	473	341	274	0,09	4,35	120	122,0	30,5	
UHPC3	151	453,66	180	360	93	473	341	274	0,14	4,35	120	118,0	27,0	
UHPC4	151	453,62	180	360	93	473	341	274	0,18	4,35	120	115,0	20,5	
UHPC5	151	453,57	180	360	93	473	341	274	0,23	4,35	120	110,0	20,0	

Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2020, p. 4 e 14, tradução nossa).

Tabela 13 – Composição do concreto autoadensável de alta resistência com GO formulado por Somasri e Kumar

Designação da Mistura	Cimento (kg/m ³)	Sílica Ativa (kg/m ³)	Escória Granulada de Alto Forno (kg/m ³)	Areia de Rio (kg/m ³)	Agregado Graúdo (kg/m ³)	Superplastificante (kg/m ³)	Óxido de Grafeno (%)	Água/Cimento	Resistência à Compressão após 28 Dias (MPa)	Resistência à Compressão após 90 Dias (MPa)	Resistência à Flexão após 28 Dias (MPa)	Resistência à Flexão após 90 Dias (MPa)
HSSCC1	300	15	135	1000	857	2,74	0,00	0,34	62,7	72,4	8,40	9,70
HSSCC2	300	15	135	1000	857	2,74	0,02	0,34	63,9	73,8	8,63	9,97
HSSCC3	300	15	135	1000	857	2,74	0,04	0,34	65,2	75,3	9,03	10,43
HSSCC4	300	15	135	1000	857	2,74	0,06	0,34	66,4	76,7	9,13	10,55
HSSCC5	300	15	135	1000	857	2,74	0,08	0,34	66,7	77,0	9,47	10,94
HSSCC6	300	15	135	1000	857	2,74	0,10	0,34	73,6	85,0	10,41	12,02

Fonte: Adaptado de Somasri; Kumar (2020, p. 2280, tradução nossa).

Tabela 14 – Composição do concreto de ultra alto desempenho com GO formulado por Chu, Zhang, Wang, Feng, Wang e Wang

Mistura	RU0	RU25	RU50	RU75
Cimento (kg/m ³)	690	690	690	690
Cinzas Volantes (kg/m ³)	345	345	345	345
Sílica Ativa (kg/m ³)	115	115	115	115
Areia Reciclada (kg/m ³)	1265	1265	1265	1265
Agente Expansivo (kg/m ³)	34,5	34,5	34,5	34,5
Fibra de Aço (kg/m ³)	195	195	195	195
Água (kg/m ³)	207	207	207	207
Redutor de Água (kg/m ³)	23	24,6	29,4	36,1
Óxido de Grafeno (kg/m ³)	0	0,2875	0,575	0,8625
Resistência à Compressão (MPa)	156,21	169,08	182,5	174,23
Resistência à Flexão (MPa)	15,89	17,68	20,12	19,24

Fonte: Adaptado de Chu *et al.* (2020, p. 5, 8 e 9, tradução nossa).

Tabela 15 – Composição do concreto de ultra alto desempenho com GO formulado por Yeke e Yu (proporção)

Amostra	Água/Aglutinante (x 0,01)	Cimento	Sílica Ativa (x 0,1)	Areia (x 0,1)	Água (x 0,001)	GO (%) (x 0,01)	Fibra de Aço (x 0,1)	PCE (x 0,01)	Resistência à Compressão (MPa) após 28 Dias	Resistência à Compressão (MPa) após 90 Dias	Resistência à Flexão (MPa) após 28 Dias	Resistência à Flexão (MPa) após 90 Dias
UHPC-0	18	1	1	8	198	0	1	3	121,5	129,5	17,90	20,90
UHPC-2	18	1	1	8	198	2	1	3	132	140	19,50	22,05
UHPC-4	18	1	1	8	198	4	1	3	140,5	148,5	20,15	23,75
UHPC-6	18	1	1	8	198	6	1	3	138	142	19,95	23,00

Fonte: Adaptado de Yeke; Yu (2021, p. 3 e 5, tradução nossa).

Tabela 16 – Composição da pasta de cimento formulada por Pan, He, Qiu, Korayem, Li, Zhu, Collins, Li, Duan e Wang (proporção)

Amostra	Cimento Normal Tipo I	Relação Água/Cimento	Óxido de Grafeno (%)	Resistência à Compressão na Idade de 7 Dias (MPa)	Resistência à Flexão na Idade de 7 Dias (MPa)	Resistência à Compressão na Idade de 28 Dias (MPa)	Resistência à Flexão na Idade de 28 Dias (MPa)
OPC	1	0,5	0,00	31,3	4,7	41,6	7,5
Cimento GO	1	0,5	0,05	38,8	7,0	51,6	11,1

Fonte: Pan *et al.* (2015, p. 10 e 11, tradução nossa).

Tabela 17 – Composição da pasta de cimento formulada por Fan

	Quantidade de GO (%)	Cimento	Areia	Água	Resistência à Compressão (MPa) Após 28 Dias
Sem Óxido de Grafeno	0,0				34,59
Óxido de Grafeno de Grau C	0,1	30,22%	53,33%	16,44%	38,10
Óxido de Grafeno de Grau M	0,1				39,14

Fonte: Adaptado de Fan (2014, p. 20 e 38).

Tabela 18 – Resistência à compressão média formulada por Romero, Cuaya-Simbro e Morales-Maldonado

Óxido de Grafeno (%)	7 dias (MPa)	14 dias (MPa)	28 dias (MPa)
0,00	19,00	22,00	34,32
2,00	27,11	40,11	53,81
4,00	26,31	42,01	51,51
6,00	29,11	40,41	51,21

Fonte: Adaptado de Romero; Cuaya-Simbro; Morales-Maldonado (2016, p. 4328, tradução nossa).

ANEXO D - Métodos de obtenção do GO

Tabela 19 – Resumo de alguns métodos de obtenção de GO a partir da grafita

(continua)

Método	Reagentes	Proporção Grafita/Ácido Concentrado; (Tempo e Temperatura de Reação)	Informação Extra
Brodie	HNO ₃ ; NaClO ₃	10 g / 60 ml; (24 h a 60 °C).	Lavagem com HCl para remoção dos íons de manganês, filtração e secagem.
Brodie	HNO ₃ ; KClO ₃	10 g / 200 ml; (22 h a 0 °C).	Filtração até pH ≈ 7
Hummers	NaNO ₃ ; H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	100 g / 2,3 L; (35 min a 35 °C).	Filtração, centrifugação e desidratação na presença de P ₂ O ₅ 40 °C.
Hummers Modificado	H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄	5 g / 60 ml; (tempo indeterminado a 25 °C).	Filtração e centrifugação.
Hummers Modificado	NaNO ₃ ; H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	5 g / 115 ml; (4 h a 25 °C + 30 min a 35 °C).	Centrifugação e redispersão repetidas vezes e secagem a 60 °C.
Hummers Modificado	NaNO ₃ ; H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	7,5 g / 360 ml; (3 h a 35 °C).	Centrifugação e redispersão até pH ≈ 7.
Hummers Modificado	NaNO ₃ ; H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	20 g / 460 ml; (2 ha 35 °C).	Lavagem com HCl, secagem a 60 °C e redispersão para facilitar a lavagem com água, filtração até pH ≈ 7 e secagem a 60 °C.
Hummers Modificado	NaNO ₃ ; H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	1 g / 23 ml; (24 h a 35 °C).	Adição de H ₂ SO ₄ extra durante a reação, lavagem com HCl, secagem a 60 °C e redispersão; filtração e secagem a 60 °C.

Tabela 19 – Resumo de alguns métodos de obtenção de GO a partir da grafita

(conclusão)

Método	Reagentes	Proporção Grafita/Ácido Concentrado; (Tempo e Temperatura de Reação)	Informação Extra
Hummers Modificado	NaNO ₃ ; H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	2 g / 46 ml; (75 min a 25 °C).	Lavagem com HCl, filtração até pH ≈ 7, secagem a 60 °C.
Hummers Modificado	NaNO ₃ ; H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	2 g / 80 ml; (4 h a 10 °C + 4 h a 35 °C).	Lavagem com HCl, diálise até pH ≈ 7, secagem a 45 °C.
Pré-Oxidação + Hummers Modificado	NaNO ₃ ; H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	Pré-oxidação: 10 g / 30 ml (6 h a 80 °C); Oxidação: 460 ml; (2 horas a 40 °C).	Lavagem com HCl, diálise até pH ≈ 7, GO mantido em suspensão (para redução química).
Pré-Oxidação + Hummers Modificado	NaNO ₃ ; H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	Pré-oxidação: 3 g / 12 ml (4 h a 80 °C); Oxidação: 120 ml; (2 horas a 25 °C).	Lavagem com HCl, filtração até pH ≈ 7, centrifugação, liofilização e redispersão.
Pré-Oxidação + Hummers Modificado	NaNO ₃ ; H ₂ SO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	Pré-oxidação: 12 g / 50 ml; Oxidação: 460 ml. (10, 60 e 300 min a 35 °C).	Lavagem com HCl, filtração até pH ≈ 7, secagem a 30 °C e redispersão.
Staudenmaier	H ₂ SO ₄ ; HNO ₃ ; KClO ₃	3 g / 48 ml + 27 ml; (96 h a 25 °C).	Lavagem com HCl, filtração até pH ≈ 7, centrifugação e secagem a 110 °C.
Staudenmaier	H ₂ SO ₄ ; HNO ₃ ; KClO ₃	5 g / 87,5 ml + 27 ml; (96 h a 25 °C).	Lavagem com HCl, filtração até pH ≈ 7 e secagem a 60 °C.
Staudenmaier Modificado	H ₂ SO ₄ ; HNO ₃ ; KClO ₃ ; KHCO ₃	6 g / 270 ml + 130 ml; (72 h a 25 °C).	Lavagem com HCl, sólido disperso em NH ₄ OH _(sol) , centrifugação.
Tour	H ₂ SO ₄ ; H ₃ PO ₄ ; KMnO ₄ ; H ₂ O ₂	3 g / 360 ml + 40 ml; (12 h a 50 °C).	Lavagem com HCl, centrifugação e filtração.

Fonte: Negreti (2016, p. 29, 30, 31 e 32).

ANEXO E - Formulações e características de argamassas com GO

Tabela 20 – Formulação do concreto pesquisado por Fan

Nome	Peso (g)				
	Grafeno	Aditivo Redutor de Água *	Cimento	Areia	Água
N	0	0			
GC	9,2276	50			
GM	9,2276	50	9.227,6	1.6284	5.020,90
GOC	9,2258	0			
GOM	8,6491	0			

Nota: * O redutor de água foi necessário para auxiliar na dispersão do grafeno em água.

Fonte: Fan (2014, p. 21, tradução nossa).

Tabela 21 – Propriedades do compósito grafeno-cimento hidratado

Características da Mistura	Resistividade ($\Omega.m$)	Condutividade ($S.m^{-1}$)	Densidade a granel seco no forno (g/cm^3)	Densidade em Massa Encapsulada (g/cm^3)
Hidratado (100% de Cimento Portland)	112.441.765	$8,89.10^{-9}$	1,490	1,851
Hidratado (99% Cimento Portland + 1% Grafeno)	121.820	$8,21.10^{-6}$	1,481	1,847
Hidratado (95% Cimento Portland + 5% Grafeno)	94.659	$1,06.10^{-5}$	1,463	1,838
Hidratado (90% Cimento Portland + 10% Grafeno)	37	$2,70.10^{-2}$	1,436	1,827

Fonte: Sedaghat *et al.* (2014, p. 19, tradução nossa).

Tabela 22 – Proporções de mistura para as amostras

Grafeno (%)	Água / Cimento (Razão)	Cimento (g)	Água (g)	Óxido de Grafeno (g)	Areia (g)	Aditivo (g)	Total (g)	Resistência à Flexão (MPa)
0	0,4	147,56	59,02	0,00	442,68	0,74	650	2,70
0,1	0,4	147,51	59,06	0,15	442,54	0,74	650	2,76
0,3	0,4	147,42	59,14	0,44	442,26	0,74	650	3,04
0,5	0,4	147,33	59,22	0,74	441,98	0,74	650	3,43
1	0,4	147,09	59,43	1,47	441,28	0,74	650	3,75
1,5	0,4	146,86	59,62	2,20	440,58	0,73	650	3,99
2	0,4	146,63	59,82	2,93	439,88	0,73	650	2,26

Fonte: Babak *et al.* (2014, p. 5, tradução nossa).

ANEXO F - Características dos materiais utilizados na pesquisa

Tabela 23 – Características físicas e químicas do cimento CP V ARI realizados no laboratório da Holcim Brasil S/A

Características Físicas				
Tipo de Ensaio	Características		Norma	Limites
#200 (%)	≤ 6		ABNT NBR 11579/2012	-
#400 (%)	2%		Instrução de Trabalho Holcim	-
Blaine (cm ² /g)	4784		ABNT NBR 76/1998	≥ 3000
Tempos de Início	121		ABNT NBR NM 65/2003	≥ 60
Pega (min) Fim	174			≤ 600
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	29,9	ABNT NBR 7215/1997	≥ 14
	3 dias	41,4		≥ 24
	7 dias	45,2		≥ 34
	28 dias	52,9		-
Características Químicas				
Componentes	Análise Química (%)		Norma	Limites (%)
PF 500°C	0,94		Instrução de Trabalho Holcim	≤ 4,5
PF 1000°C	3,82		NBR NM 18/2012	
Resíduo Insolúvel	0,89		NBR NM 15/2012	≤ 1,0
SiO ₂	-			
Al ₂ O ₃	-			
Fe ₂ O ₃	-			
CaO	-		NBR 14656/2001	
MgO	0,73			≤ 6,5
SO ₃	2,96			≤ 3,5 (quando C3A < 8)
K ₂ O	2,79			
CO ₂	-		NBR NM 20/2012	≤ 3,0
C ₃ A (Teórico)	7,96		Equação Bogue	≤ 8

Fonte: Adaptado de Teixeira (2014, p. 47 e 48).

Tabela 24 – Caracterização do pó de quartzo segundo a beneficiadora, realizado a partir de ensaio de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) no pó moído via seca em moinho de bolas e retido entre peneiras 500 e 600 Mesh

Componente Químico	Especificação (ppm)
SiO ₂	99,77
Al	393
B	< 1
Ba	4
Ca	42
Co	<3
Cr	< 1
Cu	< 1
Fe	272
K	85
Li	3
Mg	15
Mn	10
Na	56
Ni	< 1
P	6
Sr	< 1
Ti	186
V	< 1
Zr	19

Fonte: Adaptado de BMRC (2013, n.p.).

Tabela 25 – Caracterização da sílica ativa segundo a empresa processadora

Características Físicas e Químicas		
Teste	Especificação	Unidade
Massa Específica	2220	kg/m ³
Teor de SiO ₂	> 90	%
Superfície Específica (B.E.T)	19000	m ² /kg
Formato da Partícula	Esférico	-
Diâmetro Médio da Partícula	0,20	µm
Não Densificado	< 350	kg/m ³
Densificado	> 350	kg/m ³

Fonte: Tecnosil (2012, n.p.).

Tabela 26 – Caracterização do aditivo superplastificante Glenium 51[®] segundo a indústria produtora

Teste	Método BASF	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761B	Líquido branco turvo	Visual
pH	TM 112 B	5 - 7	-
Densidade	TM 103 B	1,067 - 1,107	g/cm ³
Sólidos	TM 613 B	28,5 - 31,5	%
Viscosidade	TM 117	< 150	cps
Função do Aditivo	Super plastificante de terceira geração para concreto		
Base Química	Éter policarboxílico		
Ação secundária	Redutor de água		
Solubilidade em água	Total		

Fonte: Adaptado de BASF (2015, n.p.).

Tabela 27 – Caracterização do óxido de grafeno segundo a desenvolvedora do produto

Teste	Especificações
Concentração	5 g/L
Pureza	> 90%
Número de Camadas	1 a 7
Dimensões Laterais	~ 5 µm
Grau de Oxidação	~ 40% em massa
Método de Produção	Rota de oxidação de grafite e esfoliação por ultrassom

Fonte: Adaptado de Castro *et al.* (2021, p. 18 e 19); GO (2021, n.p.).

ANEXO G - Informações para caracterização dos materiais utilizados na pesquisa

Tabela 28 – Série de peneiras normal e intermediária

Classificação do Agregado	Abertura (mm)	Série
Agregado Graúdo	75	Normal
	63	Intermediária
	50	Intermediária
	37,5	Normal
	31,5	Intermediária
	25	Intermediária
	19	Normal
	12,5	Intermediária
	9,5	Normal
	6,3	Intermediária
Agregado Miúdo	4,75	Normal
	2,36	Normal
	1,18	Normal
	0,6	Normal
	0,3	Normal
	0,15	Normal

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 17054 (2022, p. 1).

Tabela 29 – Tolerância de tempo para rompimento por compressão dos corpos de prova

Idade de ensaio	Tolerância permitida (h)
24 h	0,5
3 d	2
7 d	6
28 d	24
63 d	36
91 d	48

Para outras idades de ensaio, a tolerância deve ser obtida por interpolação.

Fonte: ABNT NBR 5739 (2018, p. 4).

Tabela 30 – Fator de correção para corpos de prova com relação altura/diâmetro menor que 1,94

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,83

Fonte: ABNT NBR 5739 (2018, p. 5).

Tabela 31 – Classificação do concreto pelo coeficiente de variação

Classe de Operação	Coeficiente de variação para diferentes padrões de controle (%)				
	Excelente	Muito Bom	Bom	Razoável	Ruim
Ensaio de obra	<7,00	7,00 - 9,00	9,00 - 11,00	11,00 - 14,00	> 14,00
Ensaio em laboratório	< 3,50	3,50 - 4,50	4,50 - 5,50	5,50 - 7,00	> 7,00

Fonte: ACI 214 (2011, p. 7, tradução nossa).

Tabela 32 – Classificação da qualidade do concreto pela absorção de água

Qualidade do Concreto	Absorção de Água
Impermeável	$\leq 4,3 \%$
Compacidade alta	$> 4,3 \%$ até $4,5 \%$
Compacidade normal	$> 4,5 \%$ até $5,0 \%$
Compacidade baixa	$> 5,0 \%$

Fonte: Adaptado de Helene (1983, p. 31, tradução nossa).

APÊNDICE A - Caracterização dos agregados finos

Tabela 33 – Distribuição granulométrica da areia

Série	Abertura (mm)	Peso (g)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
30	0,6	200,61	56,83	56,83	43,17
60	0,25	127,12	36,01	92,84	7,16
100	0,15	22,80	6,46	99,30	0,70
270	0,053	1,76	0,50	99,80	0,20
Fundo	0,00	0,70	0,20	100,00	0,00
Total (g)		352,99	100,00		
Amostra (g)				353,84	
Perda (g)				0,85	
Perda (%)				0,24	
Módulo de Finura				1,56	
Diâmetro Máximo (mm)				0,6	

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Tabela 34 – Valores da massa unitária da areia conforme a variação do teor de umidade

Teor de Água (%)	Quantidade de Água (ml)	Volume do Recipiente (cm ³)	Massa do Recipiente Vazio (g)	Massa da Amostra Umedecida (g)	Massa Unitária (g/cm ³)
0,0	0,00			3693,80	1,001
0,5	12,80			3694,00	1,001
1,0	25,60			3706,00	1,006
2,0	51,20			3728,90	1,015
4,0	102,40	2560,0	1130,60	3796,20	1,041
5,0	128,00			4929,20	1,484
7,0	179,20			4976,70	1,502
9,0	230,40			5023,70	1,521
12,0	307,20			5097,40	1,550

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 35 – Valores do inchamento da areia conforme a variação do teor de umidade

Teor de Água (%)	Volume da Capsula (cm ³)	Massa da Capsula Vazia (g)	Massa da Amostra com a Capsula (g)	Massa da Amostra Seca com a Capsula (g)	Umidade (%)	Massa Unitária do Agregado com um Determinado Teor de Umidade (g)	Massa Unitária do Agregado Seco em Estufa (g)	Inchamento
0,0		11,71	139,41	139,41	0,00	1,001		1,000
0,5		11,82	123,64	123,09	0,49	1,001		1,005
1,0		13,78	139,52	138,05	0,62	1,006		1,007
2,0		12,98	139,41	136,47	2,38	1,015		1,010
4,0	50,0	11,66	136,57	134,35	1,81	1,041	1,001	0,979
5,0		11,54	137,39	134,38	2,45	1,484		0,691
7,0		12,20	143,82	140,14	2,87	1,502		0,686
9,0		13,97	139,19	134,37	4,00	1,521		0,685
12,0		11,53	139,86	135,33	3,66	1,550		0,670

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 36 – Valores da massa unitária do pó de quartzo conforme a variação do teor de umidade

Teor de Água (%)	Quantidade de Água (ml)	Volume do Recipiente (cm ³)	Massa do Recipiente Vazio (g)	Massa da Amostra Umedecida (g)	Massa Unitária (g/cm ³)
0,0	0,00			3130,80	0,781
0,5	12,80			3142,50	0,786
1,0	25,60			3165,50	0,795
2,0	51,20			3177,40	0,800
4,0	102,40	2560,0	1130,60	3225,40	0,818
5,0	128,00			3247,80	0,827
7,0	179,20			3297,30	0,846
9,0	230,40			3346,50	0,866
12,0	307,20			3418,60	0,894

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 37 – Valores do inchamento do pó de quartzo conforme a variação do teor de umidade

Teor de Água (%)	Volume da Capsula (cm ³)	Massa da Capsula Vazia (g)	Massa da Amostra com a Capsula (g)	Massa da Amostra Seca com a Capsula (g)	Umidade (%)	Massa Unitária do Agregado com um Determinado Teor de Umidade (g)	Massa Unitária do Agregado Seco em Estufa (g)	Inchamento
0,0		6,22	29,72	29,72	0,00	0,781		1,000
0,5		6,29	29,34	29,05	1,27	0,786		1,007
1,0		6,39	28,46	27,92	2,51	0,795		1,008
2,0		6,13	25,77	25,14	3,34	0,800		1,010
4,0	20,0	6,17	29,91	29,05	3,78	0,818	0,78	0,991
5,0		5,77	31,06	30,35	2,89	0,827		0,972
7,0		6,42	32,25	31,15	4,45	0,846		0,964
9,0		6,52	30,15	28,78	6,15	0,866		0,958
12,0		5,68	32,43	30,24	8,92	0,894		0,952

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

APÊNDICE B - Ensaios de resistência à compressão para escolha da formulação

Tabela 38 – Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova que utilizaram a formulação de Cwirzen, Penttala e Vornanen

7 Dias			14 Dias			28 Dias		
Ordem de Rompimento	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Ordem de Rompimento	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Ordem de Rompimento	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)
1	86,49	44,05	1	138,37	70,47	1	195,25	99,44
2	128,07	65,23	2	145,24	73,97	2	191,52	97,54
3	110,01	56,03	3	147,30	75,02	3	205,84	104,83
4	111,21	56,64	4	143,73	73,20	4	206,53	105,18
5	101,11	51,49	5	148,47	75,62	5	181,13	92,25
6	123,17	62,73	6	157,10	80,01	6	184,56	94,00
Resistência Média (MPa)		56,03	Resistência Média (MPa)		74,71	Resistência Média (MPa)		98,87
Resistência característica estimada (MPa)		39,52	Resistência característica estimada (MPa)		69,42	Resistência característica estimada (MPa)		88,70
Desvio padrão		7,00	Desvio padrão		2,88	Desvio padrão		4,92
Coeficiente de variação (%)		12,49	Coeficiente de variação (%)		3,86	Coeficiente de variação (%)		4,97
Classificação de variação		Ruim	Classificação de variação		Muito bom	Classificação de variação		Bom

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 39 – Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova que utilizaram a formulação de Vanderlei e Giongo

7 Dias			14 Dias			28 Dias		
Ordem de Rompimento	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Ordem de Rompimento	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Ordem de Rompimento	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)
1	100,71	51,29	1	94,73	48,25	1	225,16	114,67
2	95,36	48,57	2	116,11	59,13	2	214,96	109,48
3	83,06	42,30	3	99,44	50,64	3	259,97	132,40
4	85,71	43,65	4	110,36	56,21	4	281,94	143,59
5	109,25	55,64	5	115,23	58,69	5	213,59	108,78
6	98,07	49,94	6	126,31	64,33	6	207,61	105,73
Resistência Média (MPa)		48,57	Resistência Média (MPa)		56,21	Resistência Média (MPa)		119,11
Resistência característica estimada (MPa)		37,39	Resistência característica estimada (MPa)		42,68	Resistência característica estimada (MPa)		105,03
Desvio padrão		4,52	Desvio padrão		5,40	Desvio padrão		13,99
Coeficiente de variação (%)		9,31	Coeficiente de variação (%)		9,61	Coeficiente de variação (%)		11,74
Classificação de variação		Ruim	Classificação de variação		Ruim	Classificação de variação		Ruim

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 40 – Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova que utilizaram a formulação de Reis utilizada por Oliveira

7 Dias			14 Dias			28 Dias		
Ordem de Rompimento	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Ordem de Rompimento	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Ordem de Rompimento	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)
1	82,28	41,90	1	129,51	65,96	1	199,57	101,64
2	120,52	61,38	2	147,00	74,87	2	167,50	85,31
3	84,53	43,05	3	129,64	66,03	3	189,37	96,44
4	96,89	49,35	4	123,17	62,73	4	167,89	85,51
5	100,13	50,99	5	137,98	70,27	5	183,68	93,55
6	96,99	49,40	6	109,74	55,89	6	178,97	91,15
Resistência Média (MPa)		49,35	Resistência Média (MPa)		65,96	Resistência Média (MPa)		92,26
Resistência característica estimada (MPa)		35,61	Resistência característica estimada (MPa)		52,66	Resistência característica estimada (MPa)		79,66
Desvio padrão		6,36	Desvio padrão		5,91	Desvio padrão		5,81
Coeficiente de variação (%)		12,89	Coeficiente de variação (%)		8,97	Coeficiente de variação (%)		6,29
Classificação de variação		Ruim	Classificação de variação		Ruim	Classificação de variação		Razoável

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

APÊNDICE C - Testes com o concreto no estado endurecido

Tabela 41 – Retração hidráulica do CPR aos 7, 14 e 28 dias com teores de 0%, 0,025% e 0,05% de GO

Taxa de GO	Idade (Dias)	Altura do Corpo de Prova 1 (mm)	Altura do Corpo de Prova 2 (mm)	Altura do Corpo de Prova Médio (mm)	Variação (%)
0,00%	1	100,3	97,4	98,85	-
	7	100,2	97,3	98,75	0,10%
	14	100	97,3	98,65	0,20%
	28	99,7	97,1	98,4	0,45%
0,03%	1	96,1	101,8	98,95	-
	7	95,9	101,6	98,75	0,20%
	14	95,9	101,5	98,7	0,25%
	28	95,6	101,3	98,45	0,50%
0,05%	1	99,4	96,3	97,85	-
	7	99,3	95,6	97,45	0,40%
	14	98,8	95,4	97,1	0,75%
	28	98,5	95,4	96,95	0,90%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

APÊNDICE D - Ensaios de resistência mecânica do CPR com 0%; 0,025% e 0,05% de GO

Tabela 42 – Resultados do ensaio de resistência à compressão com 7 dias de idade

0,00 % de GO			0,025 % de GO			0,05 % de GO		
Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)
CP 1 - 0,00	86,49	44,05	CP 1 - 0,025	118,27	60,23	CP 1 - 0,05	116,21	59,18
CP 2 - 0,00	128,07	65,23	CP 2 - 0,025	112,58	57,34	CP 2 - 0,05	181,82	92,60
CP 3 - 0,00	101,11	51,49	CP 3 - 0,025	106,40	54,19	CP 3 - 0,05	168,28	85,71
CP 4 - 0,00	111,21	56,64	CP 4 - 0,025	129,06	65,73	CP 4 - 0,05	158,12	80,53
CP 5 - 0,00	123,17	62,73	CP 5 - 0,025	115,13	58,64	CP 5 - 0,05	197,70	100,69
CP 6 - 0,00	110,01	56,03	CP 6 - 0,025	110,79	56,43	CP 6 - 0,05	126,60	64,48
Resistência Média (MPa)		56,03	Resistência Média (MPa)		58,76	Resistência Média (MPa)		80,53
Resistência média aparada (MPa)		54,72	Resistência média aparada (MPa)		58,76	Resistência média aparada (MPa)		89,88
Desvio padrão		7,00	Desvio padrão		3,63	Desvio padrão		14,67
Desvio padrão da média aparada		2,29	Desvio padrão da média aparada		3,63	Desvio padrão da média aparada		7,57
Erro Padrão		2,86	Erro Padrão		1,48	Erro Padrão		5,99
Erro padrão da média aparada		1,32	Erro padrão da média aparada		1,48	Erro padrão da média aparada		3,78

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 43 – Resultados do ensaio de resistência à compressão com 14 dias de idade

0,00 % de GO			0,025 % de GO			0,05 % de GO		
Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)
CP 1 - 0,00	148,47	75,62	CP 1 - 0,025	106,01	53,99	CP 1 - 0,05	115,91	59,03
CP 2 - 0,00	138,37	70,47	CP 2 - 0,025	211,92	107,93	CP 2 - 0,05	141,02	71,82
CP 3 - 0,00	157,10	80,01	CP 3 - 0,025	149,94	76,37	CP 3 - 0,05	167,69	85,41
CP 4 - 0,00	145,24	73,97	CP 4 - 0,025	157,23	80,07	CP 4 - 0,05	166,69	84,89
CP 5 - 0,00	147,30	75,02	CP 5 - 0,025	149,26	76,02	CP 5 - 0,05	186,42	94,95
CP 6 - 0,00	137,33	69,94	CP 6 - 0,025	117,78	59,98	CP 6 - 0,05	171,62	87,40
Resistência Média (MPa)		74,17	Resistência Média (MPa)		75,73	Resistência Média (MPa)		80,58
Resistência média aparada (MPa)		74,17	Resistência média aparada (MPa)		77,49	Resistência média aparada (MPa)		88,16
Desvio padrão		3,38	Desvio padrão		17,21	Desvio padrão		11,80
Desvio padrão da média aparada		3,38	Desvio padrão da média aparada		1,84	Desvio padrão da média aparada		4,03
Erro Padrão		1,38	Erro Padrão		7,03	Erro Padrão		4,82
Erro padrão da média aparada		1,38	Erro padrão da média aparada		1,06	Erro padrão da média aparada		2,01

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 44 – Resultados do ensaio de resistência à compressão com 28 dias de idade

0,00 % de GO			0,025 % de GO			0,05 % de GO		
Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)
CP 1 - 0,00	181,13	92,25	CP 1 - 0,025	190,48	97,12	CP 1 - 0,05	246,77	125,68
CP 2 - 0,00	184,56	94,00	CP 2 - 0,025	199,57	101,64	CP 2 - 0,05	219,43	111,75
CP 3 - 0,00	191,52	97,54	CP 3 - 0,025	167,92	85,52	CP 3 - 0,05	196,13	99,89
CP 4 - 0,00	195,25	99,44	CP 4 - 0,025	211,56	107,75	CP 4 - 0,05	255,62	130,19
CP 5 - 0,00	205,84	104,83	CP 5 - 0,025	216,27	110,15	CP 5 - 0,05	228,04	116,14
CP 6 - 0,00	206,53	105,18	CP 6 - 0,025	196,70	100,18	CP 6 - 0,05	241,66	123,08
Resistência Média (MPa)		98,87	Resistência Média (MPa)		100,37	Resistência Média (MPa)		117,79
Resistência média aparada (MPa)		98,87	Resistência média aparada (MPa)		103,34	Resistência média aparada (MPa)		123,77
Desvio padrão		4,92	Desvio padrão		7,99	Desvio padrão		10,03
Desvio padrão da média aparada		4,92	Desvio padrão da média aparada		4,87	Desvio padrão da média aparada		5,09
Erro Padrão		2,01	Erro Padrão		3,26	Erro Padrão		4,09
Erro padrão da média aparada		2,01	Erro padrão da média aparada		2,18	Erro padrão da média aparada		2,54

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 45 – Resultados do ensaio de resistência à flexão com 7 dias de idade

0,00 % de GO			0,025 % de GO			0,05 % de GO		
Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)
CP 1 - 0,00	2,15	3,70	CP 1 - 0,025	2,90	4,98	CP 1 - 0,05	5,40	9,29
CP 2 - 0,00	3,08	5,30	CP 2 - 0,025	2,96	5,09	CP 2 - 0,05	4,69	8,07
CP 3 - 0,00	2,66	4,57	CP 3 - 0,025	3,12	5,36	CP 3 - 0,05	5,52	9,49
Resistência Média (MPa)		4,52	Resistência Média (MPa)		5,14	Resistência Média (MPa)		8,95
Desvio Padrão		0,65	Desvio Padrão		0,16	Desvio Padrão		0,63
Erro Padrão		0,27	Erro Padrão		0,06	Erro Padrão		0,26

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 46 – Resultados do ensaio de resistência à flexão com 14 dias de idade

0,00 % de GO			0,025 % de GO			0,05 % de GO		
Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)
CP 1 - 0,00	5,95	10,23	CP 1 - 0,025	6,70	11,51	CP 1 - 0,05	6,52	11,21
CP 2 - 0,00	6,19	10,64	CP 2 - 0,025	6,90	11,85	CP 2 - 0,05	6,32	10,86
CP 3 - 0,00	5,08	8,72	CP 3 - 0,025	6,57	11,30	CP 3 - 0,05	6,20	10,66
Resistência Média (MPa)		9,86	Resistência Média (MPa)		11,55	Resistência Média (MPa)		10,91
Desvio Padrão		0,82	Desvio Padrão		0,23	Desvio Padrão		0,22
Erro Padrão		0,34	Erro Padrão		0,09	Erro Padrão		0,09

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 47 – Resultados do ensaio de resistência à flexão com 28 dias de idade

0,00 % de GO			0,025 % de GO			0,05 % de GO		
Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)	Corpo de Prova	Força Aplicada (kN)	Resistência (MPa)
CP 1 - 0,00	6,60	11,35	CP 1 - 0,025	6,77	11,64	CP 1 - 0,05	6,41	11,01
CP 2 - 0,00	5,69	9,77	CP 2 - 0,025	6,74	11,59	CP 2 - 0,05	6,71	11,54
CP 3 - 0,00	5,77	9,91	CP 3 - 0,025	6,67	11,46	CP 3 - 0,05	6,36	10,93
Resistência Média (MPa)		10,34	Resistência Média (MPa)		11,56	Resistência Média (MPa)		11,16
Desvio Padrão		0,71	Desvio Padrão		0,08	Desvio Padrão		0,27
Erro Padrão		0,29	Erro Padrão		0,03	Erro Padrão		0,11

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

APÊNDICE E - Análise estatística dos ensaios de resistência mecânica do CPR

Tabela 48 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão do CPR considerando a formulação

	Referências	SS	df	MS	F	F (Fisher-Snedecor)	Valor de ρ	α
Sem GO	Entre Grupos	5550,09	2,00	2775,05				
	Dentro dos Grupos	507,56	15,00	33,84	82,01	3,682	$8,39 \cdot 10^{-9}$	0,05
	Total	6057,65	17,00	356,33				
0,025% de GO	Entre Grupos	5259,29	2,00	2629,65				
	Dentro dos Grupos	2238,79	15,00	149,25	17,62	3,682	$1,16 \cdot 10^{-4}$	0,05
	Total	7498,08	17,00	441,06				
0,05% de GO	Entre Grupos	5544,55	2,00	2772,27				
	Dentro dos Grupos	2732,03	15,00	182,14	15,22	3,682	$2,45 \cdot 10^{-4}$	0,05
	Total	8276,58	17,00	486,86				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 49 – Teste de Tukey dos resultados de resistência à compressão do CPR considerando a formulação

	Grupo 1	Grupo 2	Valor de ρ	α
Sem GO	7 Dias	14 Dias	$2,04 \cdot 10^{-4}$	
	7 Dias	28 Dias	$5,36 \cdot 10^{-9}$	0,05
	14 Dias	28 Dias	$6,77 \cdot 10^{-6}$	
0,025% de GO	7 Dias	14 Dias	$7,15 \cdot 10^{-2}$	
	7 Dias	28 Dias	$8,14 \cdot 10^{-5}$	0,05
	14 Dias	28 Dias	$8,56 \cdot 10^{-3}$	
0,05% de GO	7 Dias	14 Dias	1,00	
	7 Dias	28 Dias	$6,68 \cdot 10^{-4}$	0,05
	14 Dias	28 Dias	$6,77 \cdot 10^{-4}$	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 50 – ANOVA dos resultados de resistência à compressão do CPR considerando os dias de cura

	Referências	SS	df	MS	F	F (Fisher-Snedecor)	Valor de ρ	α
7 Dias	Entre Grupos	2163,76	2,00	1081,88				
	Dentro dos Grupos	1665,49	15,00	111,03	9,74	3,682	$1,94.10^{-3}$	0,05
	Total	3829,25	17,00	225,25				
14 Dias	Entre Grupos	134,23	2,00	67,11				
	Dentro dos Grupos	2681,47	15,00	178,76	0,38	3,682	$6,93.10^{-1}$	0,05
	Total	2815,70	17,00	165,63				
28 Dias	Entre Grupos	1325,35	2,00	662,67				
	Dentro dos Grupos	1131,43	15,00	75,43	8,79	3,682	$2,98.10^{-3}$	0,05
	Total	2456,77	17,00	144,52				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 51 – Teste de Tukey dos resultados de resistência à compressão do CPR considerando os dias de cura

	Grupo 1	Grupo 2	Valor de ρ	α
7 Dias	(Sem GO)	(0,025% de GO)	$8,96.10^{-1}$	
	(Sem GO)	(0,05% de GO)	$3,00.10^{-3}$	0,05
	(0,025% de GO)	(0,05% de GO)	$7,30.10^{-3}$	
14 Dias	(Sem GO)	(0,025% de GO)	$9,78.10^{-1}$	
	(Sem GO)	(0,05% de GO)	$6,90.10^{-1}$	0,05
	(0,025% de GO)	(0,05% de GO)	$8,07.10^{-1}$	
28 Dias	(Sem GO)	(0,025% de GO)	$9,51.10^{-1}$	
	(Sem GO)	(0,05% de GO)	$4,90.10^{-3}$	0,05
	(0,025% de GO)	(0,05% de GO)	$9,10.10^{-3}$	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 52 – ANOVA dos resultados de resistência à flexão do CPR considerando a formulação

	Referências	SS	df	MS	F	F (Fisher-Snedecor)	Valor de ρ	α
Sem GO	Entre Grupos	62,62	2,00	31,31				
	Dentro dos Grupos	4,86	6,00	0,81	38,67	5,14	$3,73.10^{-4}$	0,05
	Total	67,48	8,00	8,43				
0,025% de GO	Entre Grupos	82,30	2,00	41,15				
	Dentro dos Grupos	0,25	6,00	0,04	996,42	5,14	$2,70.10^{-8}$	0,05
	Total	82,55	8,00	10,32				
0,05% de GO	Entre Grupos	8,79	2,00	4,39				
	Dentro dos Grupos	1,56	6,00	0,26	16,94	5,14	$3,41.10^{-3}$	0,05
	Total	10,34	8,00	1,29				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 53 – Teste de Tukey dos resultados de resistência à flexão do CPR considerando a formulação

	Grupo 1	Grupo 2	Valor de ρ	α
Sem GO	7 Dias	14 Dias	$8,43.10^{-4}$	
	7 Dias	28 Dias	$5,26.10^{-4}$	0,05
	14 Dias	28 Dias	$7,97.10^{-1}$	
0,025% de GO	7 Dias	14 Dias	$8,47.10^{-8}$	
	7 Dias	28 Dias	$8,40.10^{-8}$	0,05
	14 Dias	28 Dias	$9,98.10^{-1}$	
0,05% de GO	7 Dias	14 Dias	$7,83.10^{-3}$	
	7 Dias	28 Dias	$4,34.10^{-3}$	0,05
	14 Dias	28 Dias	$8,25.10^{-1}$	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 54 – ANOVA dos resultados de resistência à flexão do CPR considerando os dias de cura

	Referências	SS	df	MS	F	F (Fisher-Snedecor)	Valor de ρ	α
7 Dias	Entre Grupos	34,47	2,00	17,24				
	Dentro dos Grupos	2,54	6,00	0,42	40,69	5,14	$3,24 \cdot 10^{-4}$	0,05
	Total	37,01	8,00	4,63				
14 Dias	Entre Grupos	4,37	2,00	2,18				
	Dentro dos Grupos	2,35	6,00	0,39	5,56	5,14	$4,30 \cdot 10^{-2}$	0,05
	Total	6,72	8,00	0,84				
28 Dias	Entre Grupos	2,32	2,00	1,16				
	Dentro dos Grupos	1,77	6,00	0,29	3,94	5,14	$8,09 \cdot 10^{-2}$	0,05
	Total	4,08	8,00	0,51				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 55 – Teste de Tukey dos resultados de resistência à flexão do CPR considerando os dias de cura

	Grupo 1	Grupo 2	Valor de ρ	α
7 Dias	(Sem GO)	(0,025% de GO)	$5,13 \cdot 10^{-1}$	
	(Sem GO)	(0,05% de GO)	$3,99 \cdot 10^{-4}$	0,05
	(0,025% de GO)	(0,05% de GO)	$9,12 \cdot 10^{-4}$	
14 Dias	(Sem GO)	(0,025% de GO)	$3,75 \cdot 10^{-2}$	
	(Sem GO)	(0,05% de GO)	$1,82 \cdot 10^{-1}$	0,05
	(0,025% de GO)	(0,05% de GO)	$4,66 \cdot 10^{-1}$	
28 Dias	(Sem GO)	(0,025% de GO)	$7,40 \cdot 10^{-2}$	
	(Sem GO)	(0,05% de GO)	$2,35 \cdot 10^{-1}$	0,05
	(0,025% de GO)	(0,05% de GO)	$6,54 \cdot 10^{-1}$	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 56 – ANOVA dos resultados de retração hidráulica do CPR considerando a formulação

	Referências	SS	df	MS	F	F (Fisher-Snedecor)	Valor de ρ	α
Sem GO	Entre Grupos	0,22	3,00	0,07				
	Dentro dos Grupos	15,44	4,00	3,86	0,02	6,59	$9,96.10^{-1}$	0,05
	Total	15,66	7,00	2,24				
0,025% de GO	Entre Grupos	0,25	3,00	0,08				
	Dentro dos Grupos	64,41	4,00	16,10	0,01	6,59	$9,99.10^{-1}$	0,05
	Total	64,67	7,00	9,24				
0,05% de GO	Entre Grupos	0,96	3,00	0,32				
	Dentro dos Grupos	22,24	4,00	5,56	0,06	6,59	$9,79.10^{-1}$	0,05
	Total	23,20	7,00	3,31				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 57 – ANOVA dos resultados de retração hidráulica do CPR considerando os dias de cura

	Referências	SS	df	MS	F	F (Fisher-Snedecor)	Valor de ρ	α
1 Dia	Entre Grupos	1,48	2,00	0,74				
	Dentro dos Grupos	25,26	3,00	8,42	0,09	9,55	$9,18.10^{-1}$	0,05
	Total	26,735	5,00	5,35				
7 Dias	Entre Grupos	2,25	2,00	1,13				
	Dentro dos Grupos	27,30	3,00	9,10	0,12	9,55	$8,88.10^{-1}$	0,05
	Total	29,55	5,00	5,91				
14 Dias	Entre Grupos	3,31	2,00	1,66				
	Dentro dos Grupos	25,10	3,00	8,37	0,20	9,55	$8,30.10^{-1}$	0,05
	Total	28,41	5,00	5,68				
28 Dias	Entre Grupos	2,90	2,00	1,45				
	Dentro dos Grupos	24,43	3,00	8,14	0,18	9,55	$8,45.10^{-1}$	0,05
	Total	27,33	5,00	5,47				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.