

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUIZA MARIA MOREIRA VILAR

EFEITO DA CARBONATAÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM
ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO

BELO HORIZONTE

2023

LUIZA MARIA MOREIRA VILAR

**EFEITO DA CARBONATAÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM
ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO**

**Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientadora: Profa. Dra. Júnia Nunes de
Paula**

BELO HORIZONTE

2023

V697e Vilar, Luiza Maria Moreira
Efeito da carbonatação em compósitos cimentícios com adição de óxido de grafeno / Luiza Maria Moreira Vilar. – 2023.
138 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientadora: Júnia Nunes de Paula.
Bibliografia: f. 78-88.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Óxido de grafeno – Teses. 2. Sequestro de carbono – Teses. 3. Compósitos de cimento – Teses. I. Paula, Júnia Nunes de. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 620.11

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS- GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUIZA MARIA MOREIRA VILAR

EFEITO DA CARBONATAÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM
ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 14 de novembro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Júnia Nunes de Paula – Orientadora
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Péter Ludvig
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. PhD. José Márcio Fonseca Calixto
Departamento de Engenharia de Estruturas, UFMG

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela graça da vida, pela minha saúde e pela oportunidade de ampliar meu conhecimento.

Agradeço à minha mãe, irmã e ao meu noivo, por me darem todo o suporte e incentivo necessários para superar as dificuldades durante o desenvolvimento da pesquisa.

À minha orientadora, Profa. Dra. Júnia Nunes de Paula, pelo conhecimento técnico, disponibilidade, prontidão e dedicação em me auxiliar. À todos os professores que compartilharam conhecimentos e experiências, me ajudando a concluir este trabalho.

À toda equipe dos Laboratórios de Engenharia Civil e dos Laboratórios do Departamento de Engenharia de Transportes, por toda ajuda oferecida na execução dos ensaios realizados.

Agradeço à CAPES e ao CEFET-MG pelo apoio financeiro concedido e pelo incentivo ao desenvolvimento científico.

RESUMO

A pesquisa verificou a influência da incorporação de óxido de grafeno (OG) na carbonatação de compósitos cimentícios. Foram fabricadas argamassas com cimento CP V-ARI e traço de 1:3, com teores de incorporação de OG de 0%, 0,03% e 0,05% em relação à massa de cimento. As amostras foram submetidas aos ensaios de absorção de água por imersão, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e carbonatação acelerada. Realizou-se a aspersão de fenolftaleína na superfície dos corpos de prova rompidos para a obtenção da profundidade de carbonatação das argamassas fabricadas. Foi possível verificar que a carbonatação influencia a resistência mecânica dos compósitos cimentícios. Observou-se que a incorporação de OG não apresentou resultados significativos para absorção de água por imersão, mas a adição de 0,05% reduziu a resistência à compressão das argamassas submetidas à carbonatação acelerada quando comparada à referência e à amostra com adição de 0,03% de OG. Notou-se que as argamassas com adição do nanomaterial nos teores de 0,03% e 0,05% aumentaram a resistência à tração por compressão diametral das argamassas submetidas à carbonatação acelerada. A adição de 0,03% de OG ocasionou um aumento na profundidade de carbonatação em relação à referência, no entanto, exibiu resultados satisfatórios quanto a resistência mecânica dos materiais. A partir dos resultados dos ensaios, foi possível observar que adição de 0,03% de OG possui potencial para se tornar objeto de estudo para captura de CO₂ em compósitos cimentícios não armados, aumentando da profundidade de carbonatação e a resistência mecânica dos materiais. A utilização de teores maiores de OG pode colaborar com o aumento da durabilidade e da resistência mecânica dos compósitos cimentícios.

Palavras-chave: Óxido de grafeno. Carbonatação. Compósitos cimentícios.

ABSTRACT

The research verified the influence of incorporation of graphene oxide (GO) on the carbonation of cementitious composites. Mortars were fabricated with CP V-ARI cement and a ratio of 1:3, with GO incorporation levels of 0%, 0.03% and 0.05% in relation to the cement mass. The samples were subjected to water absorption tests by immersion, axial compression strength, tensile strength by diametral compression and accelerated carbonation. Phenolphthalein was sprayed on the surface of the ruptured specimens to obtain the carbonation depth of the fabricated mortars. It was possible to verify that carbonation influences the mechanical resistance of cementitious composites. It was observed that the incorporation of GO did not present significant results for water absorption by immersion, but the addition of 0.05% reduced the compressive strength of mortars subjected to accelerated carbonation when compared to the reference and the sample with addition of 0.03% GO. It was noted that mortars with the addition of nanomaterial at levels of 0.03% and 0.05% increased the tensile strength due to diametral compression of mortars subjected to accelerated carbonation. The addition of 0.03% GO caused an increase in the depth of carbonation in relation to the reference, however, it exhibited satisfactory results regarding the mechanical resistance of the materials. From the test results, it was possible to observe that the addition of 0.03% GO has the potential to become an object of study for capturing CO₂ in unreinforced cementitious composites, increasing the depth of carbonation and the mechanical resistance of the materials. The use of higher GO levels can contribute to increasing the durability and mechanical resistance of cementitious composites.

Key-Words: Graphene oxide. Carbonation. Cementitious composites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de carbonatação em concretos.	20
Figura 2: Avanço da frente de carbonatação.....	20
Figura 3: Esquema da sequência de corrosão do aço em concreto.....	21
Figura 4: Profundidade de carbonatação em função do tempo.	24
Figura 5: Umidade nos poros do concreto em função da umidade do ambiente.....	25
Figura 6: Variação do grau de carbonatação em relação à umidade do ambiente...	26
Figura 7: Concentração de CO ₂ na atmosfera ao longo dos anos.	27
Figura 8: Profundidade de carbonatação referente a diferentes concentrações de CO ₂	28
Figura 9: Profundidade de carbonatação de acordo com a relação a/c.	30
Figura 10: Método de Hummers para obtenção do óxido de grafeno e óxido de grafeno reduzido.....	37
Figura 11: Diagrama esquemático da conversão do grafite em óxido de grafeno....	38
Figura 12: Carbonatação x captura de CO ₂	42
Figura 13: Representação da frente de carbonatação em revestimentos argamassados.....	42
Figura 14: OG utilizado para produção das argamassas.	46
Figura 15: Análise Termogravimétrica do OG.	46
Figura 16: Espectroscopia Raman do OG.....	47
Figura 17: Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier do OG..	48
Figura 18: Microscopia eletrônica de transmissão do OG.	49
Figura 19: Fluxograma dos métodos desenvolvidos.	50
Figura 20: Fitas indicadoras utilizadas para medir o pH das argamassas.....	54
Figura 21: Medição do pH das argamassas com fita indicadora de pH.....	54
Figura 22: Comparação das fitas indicadoras de pH com a tabela de cores fornecida pelo fabricante.	55
Figura 23: (a) Câmara climatizada utilizada para a realização do ensaio de carbonatação acelerada e (b) amostras de argamassas acondicionadas para o ensaio de carbonatação acelerada.	57
Figura 24: Amostra de argamassa rompida pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral (a) antes e (b) depois da aspersão de fenolftaleína.	58

Figura 25: Delimitação da área carbonatada para medida da profundidade de carbonatação.....	59
Figura 26: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado nas amostras de argamassas.	60
Figura 27: Ensaio de resistência à compressão axial realizado nas amostras de argamassas.....	62
Figura 28: Absorção de água média das argamassas estudadas.....	64
Figura 29: Resistência à compressão das argamassas estudadas, após carbonatação em ambiente de laboratório e carbonatação acelerada.....	67
Figura 30: Resistência à tração das argamassas estudadas, após carbonatação em ambiente de laboratório e carbonatação acelerada.....	70
Figura 31: Profundidade de carbonatação das argamassas após 28 dias de carbonatação acelerada.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos estudos de carbonatação em argamassas realizados por diversos pesquisadores.	33
Tabela 2: Características físicas e mecânicas do cimento CP V-ARI.....	44
Tabela 3: Características químicas do cimento CP V-ARI.	45
Tabela 4: Distribuição granulométrica da areia normal brasileira.	50
Tabela 5: Dosagens das argamassas.	51
Tabela 6: pH das argamassas com e sem adição de OG.....	63
Tabela 7: Absorção de água média das argamassas estudadas.	64
Tabela 8: Resistência à compressão das argamassas após 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.	66
Tabela 9: Resistência à compressão das argamassas após 28 dias de carbonatação acelerada.....	66
Tabela 10: Resistência à tração das argamassas após 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.	69
Tabela 11: Resistência à tração das argamassas após 28 dias de carbonatação acelerada.....	69
Tabela 12: Profundidade de carbonatação das argamassas após 28 dias de carbonatação acelerada.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Água/cimento

a/ag – Água/aglomerante

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

cm – Centímetro

cm² - centímetro quadrado

CP – Corpo de prova

CP I – Cimento Portland comum

CP II-F – Cimento Portland composto com material carbonático

CP III – Cimento Portland de alto-forno

CP III-40-RS – Cimento Portland de alto-forno com resistência aos 28 dias de 40 MPa e com resistência à sulfatos

CP IV – Cimento Portland pozolânico

CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

CP V-ARI-RS-MS – Cimento Portland de alta resistência inicial com resistência à sulfatos e com sílica micro pulverizada

CTNano – Centro de Tecnologia em Nanomateriais

DTG – Termogravimetria derivada

ELS – Estado Limite de Serviço

FRX – Espectometria por fluorescência de raios-X

g – Grama

g/L – Grama por litro

h - Horas

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

kg - Quilograma

kN – Quilonewton

kPa – Quilopascal

kWh - Quilowatt-hora

m² - Metro quadrado

mg/L – Miligrama por litro

ml – Miligrama

mm – Milímetro

mmHg – Milímetro de mercúrio

μm – Micrômetro

MPa – Mega Pascal

N – Newton

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

nm – Nanômetro

OG – Óxido de grafeno

pH – Potencial hidrogeniônico

ppm – Partes por milhão

RCD – Resíduos de construção e demolição

REF – Amostra de referência

RILEM – *Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux*

t – Tonelada

T – Temperatura

TGA – Análise termogravimétrica

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UR – Umidade relativa

LISTA DE SÍMBOLOS

°C – Graus celsius

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

CaO – Óxido de cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

CO₂ – Dióxido de carbono

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

H₂O – Água

H₂SO₄ – Ácido sulfúrico

KMnO₄ – Permanganato de potássio

KOH – Hidróxido de potássio

NaOH – Hidróxido de sódio

O₂ - Oxigênio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos.....	16
1.2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	17
1.3. RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. CARBONATAÇÃO	19
2.1.1. Modelo de propagação	23
2.1.2. Parâmetros que afetam a carbonatação	25
2.1.2.1. Condições externas de exposição	25
2.1.2.2. Condições de mistura e cura	29
2.1.3. Ensaio acelerado de carbonatação	32
2.1.4. Avaliação da carbonatação.....	34
2.2. ÓXIDO DE GRAFENO	35
2.2.1. Uso do óxido de grafeno em compósitos de cimento	39
2.3. CAPTURA DE CO ₂ POR CARBONATAÇÃO	41
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1. MATERIAIS.....	44
3.1.1. Cimento.....	44
3.1.2. Óxido de Grafeno	45
3.1.3. Agregado miúdo.....	49
3.2. MÉTODOS	50
3.2.1. Dosagem das argamassas	51
3.2.2. Mistura, moldagem e cura.....	52
3.2.3. Medida do pH das argamassas.....	53
3.2.4. Absorção de água por imersão	55
3.2.5. Ensaio de carbonatação acelerada	56
3.2.6. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	59
3.2.7. Ensaio de resistência à compressão axial	61
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
4.1. MEDIDA DO pH DAS ARGAMASSAS	63

4.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	63
4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	65
4.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	69
4.5. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	72
5. CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS.....	78
APÊNDICES.....	89

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos à base de cimento são materiais de boa qualidade e de alta resistência à compressão; no entanto o principal problema desses materiais é que os mesmos apresentam defeitos estruturais como trincas, fissuras e morfologia desordenada, afetando significativamente sua resistência e durabilidade. A indústria cimenteira atualmente é considerada uma das mais poluentes na área da construção civil, visto que é responsável por cerca de 7% do total de emissões de CO₂. Consequentemente, quanto maior a produção de compósitos cimentícios, maior o consumo de cimento e maior a emissão de CO₂. Portanto, o desenvolvimento de compósitos cimentícios de alta resistência e longa durabilidade é um importante tópico de pesquisa (JOHN *et al.*, 2018; LV *et al.*, 2016).

A NBR 6118 (ABNT, 2023) relaciona a durabilidade das estruturas com sua capacidade de resistir às influências ambientais previstas e definidas no início do projeto. Segundo Neville (2016), a deterioração das estruturas por fatores externos ou internos através de ações mecânicas, físicas ou químicas afetam a durabilidade das mesmas. A carbonatação é um fenômeno que ocasiona a despassivação das armaduras contidas na matriz cimentícia, contribuindo com a diminuição da durabilidade das estruturas, e está diretamente relacionada com a concentração de CO₂ no ambiente, ou seja, ocorre com mais intensidade nos ambientes com maiores concentrações de CO₂ (NEVILLE, 2016). Estudos realizados por diversos pesquisadores demonstram que os materiais cimentícios são capazes de reabsorver, ao longo de sua vida útil, até 57% do CO₂ emitido na produção de cimento (PADE e GUIMARÃES, 2007; LEE, PARK e LEE, 2013; HASELBACH e THOMAS, 2014).

Nos últimos anos, a utilização de nanomateriais à base de carbono tem atraído a atenção de muitos pesquisadores, pois sua incorporação em compósitos cimentícios pode melhorar a estrutura da matriz para aumentar a resistência da mesma à entrada de fluidos e, consequentemente, evitar os ataques químicos que são prejudiciais à durabilidade das estruturas (MOHAMMED *et al.*, 2015, YANG *et al.*, 2017).

O óxido de grafeno (OG) é um nanomaterial composto por átomos de carbono interligados em uma rede hexagonal com orbitais sp² e sp³ hibridizados, obtido através da oxidação do grafite, esfoliação e purificação pelo método de Hummers. Este nanomaterial é considerado atraente para reforçar compósitos cimentícios por possuir

excelentes propriedades, dentre elas estão: elevada superfície específica, alta resistência à tração, elevada condutividade térmica e elétrica, alto módulo de elasticidade e boa dispersão em água. A adição de OG nos materiais compósitos à base de cimento também dificulta o transporte de agentes agressivos dentro da matriz, aumentando a resistência à carbonatação desses materiais (MOHAMMED *et al.*, 2015; PAN *et al.*, 2015; WEI e HU, 2016; HOU *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2017; ZHAO *et al.*, 2017; LU, ZHAO e LU, 2018; CHINTALAPUDI e PANNEM, 2020).

Muitos estudos têm sido realizados para avaliar o efeito da incorporação de OG no desempenho de compósitos cimentícios, mas poucos são focados no efeito produzido pela adição de OG na carbonatação desses materiais. Contudo, a utilização do OG em compósitos cimentícios ainda não foi totalmente elucidada em relação à carbonatação, devido a resultados contraditórios e inconsistências obtidas nas diversas pesquisas (LV *et al.*, 2016; LV *et al.*, 2017; LADEIRA, 2017; LONG *et al.*, 2018; MOHAMMED *et al.*, 2017; DEVI e KHAN, 2020; PRABAVATHY *et al.*, 2020; VERÇOSA, 2022).

Desta forma, buscou-se, no presente estudo, aprofundar a seguinte pergunta de pesquisa: quais são os efeitos da incorporação de óxido de grafeno sobre a carbonatação de materiais compósitos à base de cimento e, conseqüentemente, sobre a durabilidade destes materiais?

1.1. OBJETIVOS

Atribuem-se como objetivos deste estudo:

1.1.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar os efeitos relacionados à carbonatação em argamassas com incorporação de OG para utilização no setor da construção civil.

1.1.2. Objetivos Específicos

Visando alcançar o objetivo geral desta pesquisa foram definidos os seguintes

objetivos específicos:

- Avaliar a profundidade de carbonatação das argamassas com a variação da adição de OG;
- Analisar a resistência à tração e à compressão das argamassas com incorporação de diferentes teores de OG submetidas ao ensaio de carbonatação acelerada e deixadas em ambiente de laboratório;
- Investigar a porosidade das argamassas fabricadas com incorporação de diferentes teores de OG.

1.2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Durante os últimos anos, a incorporação de nanomateriais em compósitos cimentícios tem sido considerada uma das principais abordagens em trabalhos de investigação. Os avanços em relação aos nanomateriais proporcionaram oportunidades inestimáveis para modificar a microestrutura dos compósitos cimentícios em escala nanométrica e melhorar seu desempenho (MOHAMMED, AL-SAAFI e SANJAYAN, 2018; ZHAO *et al.*, 2020).

Estudos realizados mostram o potencial do OG na redução da profundidade de carbonatação de compósitos cimentícios, utilizando-se teores de adição de OG que variam entre 0,03% e 0,2% em relação à massa de cimento. Além de melhorar o comportamento estrutural a incorporação de OG também traz como consequência o aumento da durabilidade, considerando que uma matriz com menor porosidade dificulta a penetração de agentes agressivos, promovendo maior proteção à armadura contra a corrosão (LV *et al.*, 2016, 2017; LONG *et al.*, 2018; DEVI e KHAN, 2020; PRABAVATHY *et al.*, 2020).

A deterioração das estruturas de concreto armado, causada principalmente pela corrosão das armaduras, traz a necessidade da melhoria quanto à sua durabilidade. Desta forma, buscando reduzir os impactos causados pelo incremento das emissões globais de CO₂, em especial aqueles provenientes do setor da construção civil, e obter materiais com maior eficiência, esta pesquisa visa avaliar carbonatação de materiais cimentícios fabricados com OG.

As análises serão realizadas em amostras de argamassa fabricadas com OG, visto que o concreto possui uma microestrutura mais complexa devido a região

compreendida entre os agregados e a pasta de cimento, denominada zona de transição. Por este motivo, decidiu-se verificar, nesta pesquisa, a carbonatação de argamassas fabricadas com OG e posteriormente, em pesquisas futuras, a influência do OG na carbonatação de concretos pode ser analisada.

1.3. RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa possui a limitação de adição de OG nos teores de 0,03% e 0,05% em relação à massa cimentícia, bem como o uso do cimento Portland do tipo CP V-ARI. Ademais, em relação ao ensaio de carbonatação, esta pesquisa se limita à exposição dos corpos de prova em uma concentração de CO₂ de $5,0 \pm 0,1\%$, umidade relativa de $65 \pm 1\%$ e temperatura de 30 ± 2 °C. Estes valores foram determinados com base em outros estudos.

Como o ensaio de carbonatação acelerada não é normalizado, há muitas divergências entre os valores de concentração de CO₂, umidade relativa e temperatura utilizados nos estudos realizados. Sendo assim, a comparação com os resultados obtidos na literatura é dificultada ou até mesmo impossibilitada.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir, uma revisão sobre a carbonatação é apresentada, abordando seus conceitos, modelo de propagação, os parâmetros que afetam a carbonatação, ensaio acelerado de carbonatação e avaliação da mesma. Posteriormente, a fundamentação teórica foca no OG e apresenta como ele é usado em compósitos cimentícios.

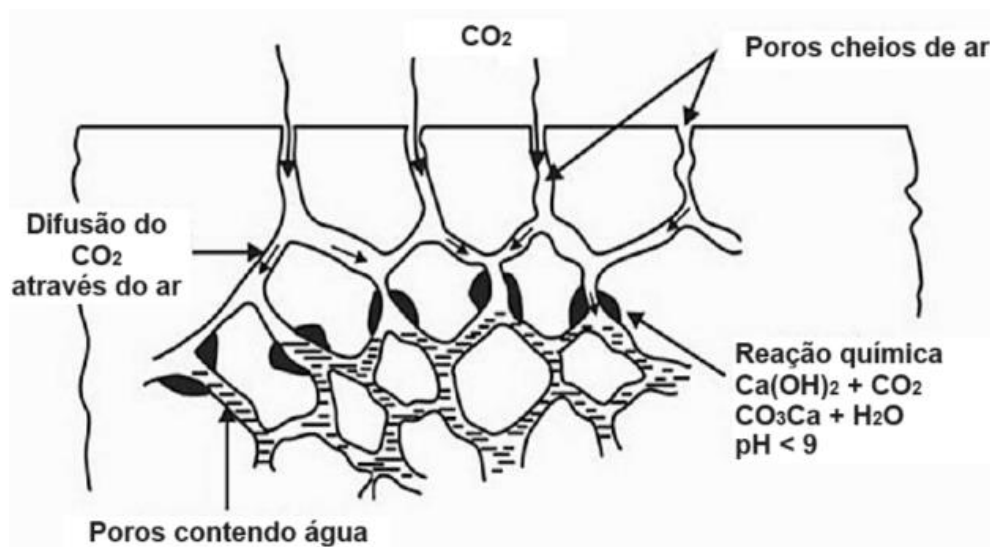
2.1. CARBONATAÇÃO

A carbonatação de materiais cimentícios tem sido um tema cada vez mais abordado nas pesquisas dos últimos anos por se tratar de uma das principais manifestações patológicas nas estruturas, afetando sua durabilidade. Este tema ganha mais notoriedade com o aumento gradual das emissões de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, uma vez que os danos das estruturas de concreto devido à carbonatação aumentam com o crescimento da concentração de CO_2 (CUI *et al.*, 2015).

De acordo com Neville (2016), o valor médio da concentração de CO_2 na atmosfera em cidades grandes é de 0,3%, podendo chegar a 1%. Porém, o autor ainda afirma que a carbonatação também pode ocorrer em ambientes com pequenas concentrações de CO_2 , como ambientes rurais, onde o teor de CO_2 é aproximadamente 0,03%.

A carbonatação é definida como um fenômeno físico-químico em que o CO_2 penetra o concreto, por difusão, e reage com os compostos hidratados do cimento, diminuindo o pH do líquido intersticial contido nos poros do material de valores superiores a 12,5 para valores inferiores a 9 (CAMPOS, 2018; LADEIRA, 2017). A Figura 1 ilustra como acontece o processo de carbonatação em concretos.

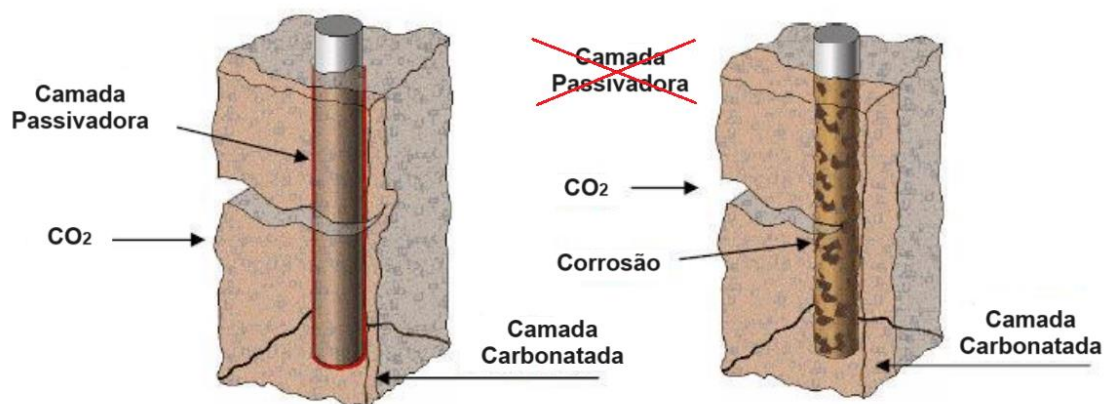
Figura 1: Processo de carbonatação em concretos.



Fonte: FUSCO, 2008.

Neville (2016) explica que a redução do pH da região próxima à armadura causa a remoção da camada passivadora de proteção da mesma, deixando-a suscetível à corrosão, desde que haja oxigênio e umidade necessários para a reação. O autor ainda denota que, devido a despassivação do aço, é importante conhecer a profundidade de carbonatação e verificar se a frente de carbonatação não atingiu a armadura. A Figura 2 mostra o avanço da frente de carbonatação até atingir a armadura e causar sua despassivação.

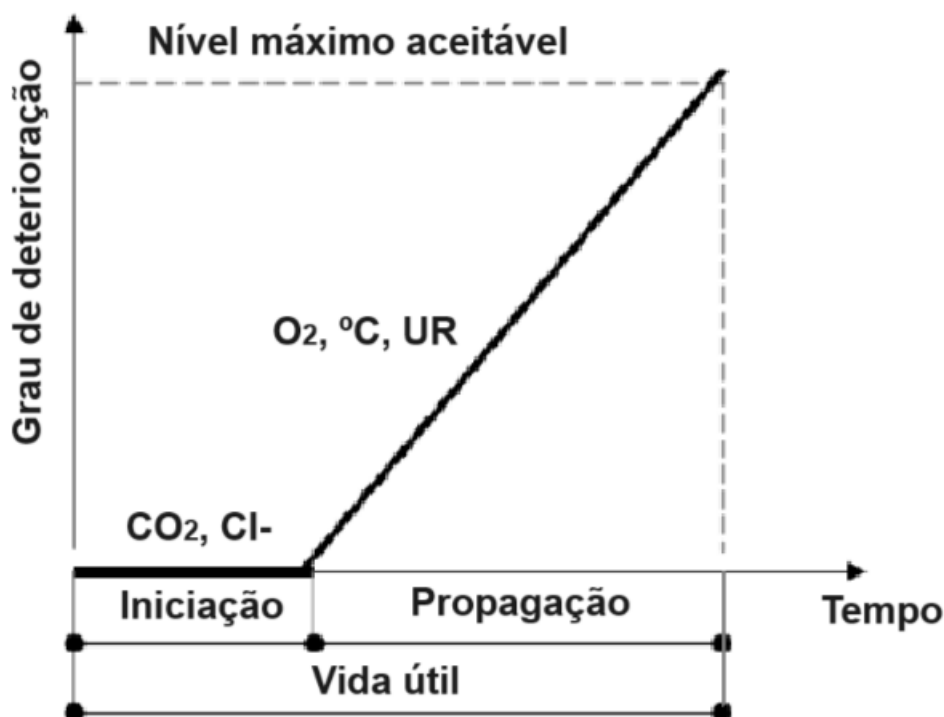
Figura 2: Avanço da frente de carbonatação.



Fonte: TULA, 2000.

Segundo Félix *et al.* (2017), a corrosão das armaduras, causada pelo fenômeno da carbonatação, pode ser dividida em duas fases, indicadas na Figura 3.

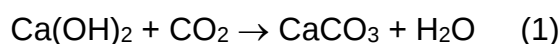
Figura 3: Esquema da sequência de corrosão do aço em concreto.



Fonte: Adaptado de TUUTTI, 1982 (*apud* CAMPOS, 2018).

Félix *et al.* (2017) relata que, na fase de iniciação os agentes agressivos penetram o concreto até atingir a armadura, causando sua despassivação devido à redução do pH da matriz. Já a fase de propagação ocorre desde a despassivação da armadura até o momento em que atinge o estado limite de serviço (ELS).

A principal reação de carbonatação está relacionada ao consumo do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que se encontra em grande quantidade nos poros da matriz cimentícia, e é representada pela Equação 1 (ISAIA, 2011).

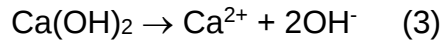


Calleja (1980), Papadakis, Vayenas e Fardis (1991) e Taylor (1997), apontam que a reação de carbonatação indicada pela Equação 1 envolve as etapas a seguir:

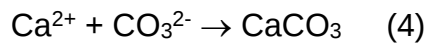
- Difusão e dissolução do dióxido de carbono (CO₂) na solução dos poros da matriz cimentícia:



- Dissolução do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) na solução dos poros e liberação de íons OH⁻ e Ca²⁺:



- Formação de carbonato de cálcio (CaCO₃):



- Formação de carbonatos por meio das reações dos compostos hidratados e do dióxido de carbono (CO₂) dissolvido;
- Precipitação do carbonato de cálcio (CaCO₃) nos poros da pasta;
- Redução no volume dos poros devido a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO₃);
- Condensação da água evaporada nas paredes dos poros, quando em equilíbrio com a umidade relativa e a temperatura ambiente.

Segundo Possan (2010), o principal composto carbonatado pelo CO₂ é o Ca(OH)₂, no entanto, o hidróxido de potássio (KOH), o hidróxido de sódio (NaOH) e os silicatos alcalinos também podem sofrer carbonatação.

Isaia (2011) destaca que é preciso considerar que a carbonatação do Ca(OH)₂ é a mais importante, pois este é o mais solúvel dentre os produtos de hidratação do cimento, bem como o que reage mais rápido com o CO₂. O autor diz que pelo menos nos estágios mais recentes da ocorrência da carbonatação, o carbonato presente é decorrente da transformação do Ca(OH)₂.

O resultado final é uma lenta e completa substituição do óxido de cálcio solúvel em carbonato de cálcio insolúvel. A transformação do Ca(OH)₂ em carbonato reduz a sua concentração na solução dos poros, acarretando na diminuição da reserva alcalina, diminuindo o pH (ISAIA 2011).

Quando sujeita à carbonatação, a microestrutura da pasta sofre alterações. A precipitação do cristal de CaCO_3 ocasiona a colmatação dos poros. Sendo assim, a carbonatação impede seu próprio avanço e faz com que a velocidade do avanço do fenômeno, que no início do processo era elevada, diminua no decorrer do tempo (LADEIRA, 2017).

2.1.1. Modelo de propagação

A entrada de agentes agressivos no concreto está relacionada com a dimensão, forma, tortuosidade e continuidade dos poros do material, ou seja, quanto maior a permeabilidade maior será a facilidade de ingresso desses agentes. Sendo assim, fatores como a dosagem do concreto e boa prática construtiva, que colaboram com a produção de uma estrutura de concreto mais durável e compacta, são essenciais para impedir ou retardar a entrada dos agentes agressivos na matriz cimentícia (TASCA, 2012; NEVILLE, 2016).

Nepomuceno (2005) destaca que os mecanismos de transporte nos materiais cimentícios possuem grande relevância no entendimento dos variados tipos de deterioração das estruturas, que ocorrem por meio da penetração de substâncias na forma de gases, vapores e líquidos através dos poros e fissuras.

Os mecanismos de transporte de fluidos que têm influência sobre a durabilidade das estruturas são: permeabilidade, difusão, absorção capilar e migração (NEPOMUCENO, 2005). Esses mecanismos ocorrem de maneira sucessiva ou simultânea ao longo do tempo e dependem das condições de exposição do ambiente (temperatura, umidade) a que as estruturas de concreto estejam submetidas (FIGUEIREDO, 2004).

Nepomuceno (2005) apresenta que a penetração do CO_2 no concreto acontece principalmente por meio do mecanismo de difusão devido à diferença de concentração desse gás no ambiente e no interior do concreto.

A difusão pode ser definida como o transporte de um gás ou vapor através do concreto que resulta em um gradiente de concentração e as difusões mais importantes são a do dióxido de carbono (CO_2) e a do oxigênio (O_2), uma vez que a primeira leva à carbonatação e a segunda possibilita a corrosão da armadura (NEVILLE, 2016).

A profundidade de carbonatação pode ser estimada a partir da 1ª Lei de difusão de Fick:

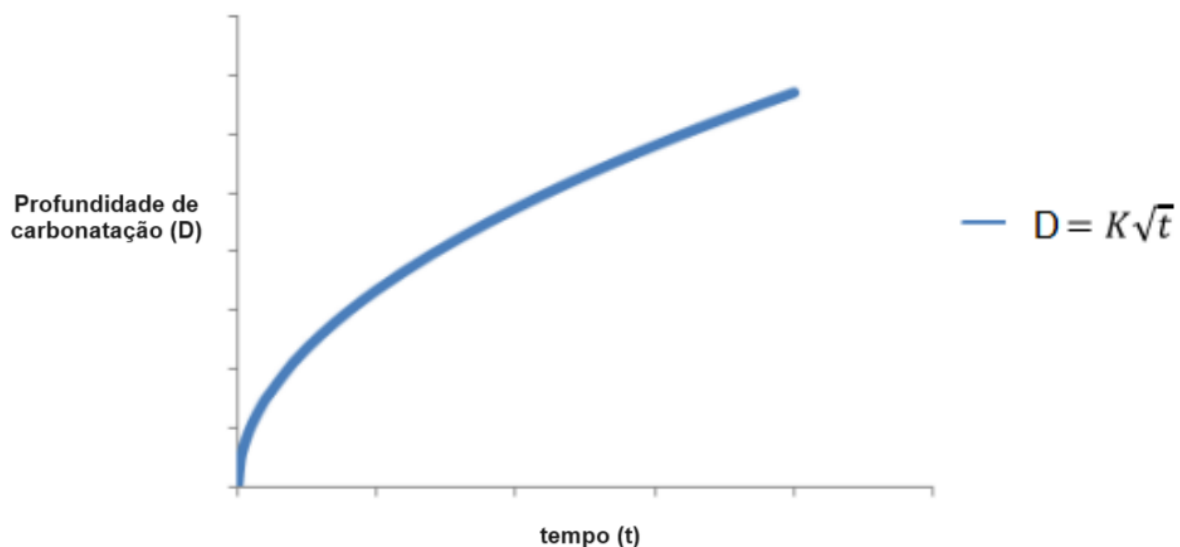
$$D = K\sqrt{t} \quad (5)$$

Onde:

- D = profundidade de carbonatação (mm);
- K = coeficiente de carbonatação (mm/tempo^{0,5});
- t = tempo de exposição.

A Equação 5 pode ser representada graficamente pela Figura 4.

Figura 4: Profundidade de carbonatação em função do tempo.



Fonte: Adaptado de SIMAS, 2007.

Segundo Medeiros, Andrade e Helene (2011) *apud* Kalsing (2020), o valor do coeficiente de carbonatação “K” é definido de acordo com as características do ambiente e do concreto da estrutura, como por exemplo, a concentração de CO₂, as condições de exposição, difusividade, permeabilidade e reserva alcalina do concreto. Nepomuceno (2005) enfatiza que a determinação do coeficiente de carbonatação “K” permite estabelecer o tempo em que a frente de carbonatação alcançará a armadura, provocando sua despassivação.

2.1.2. Parâmetros que afetam a carbonatação

De acordo com Campos (2018), a velocidade do avanço da frente de carbonatação está relacionada a fatores diretamente ligados às condições externas de exposição, à composição dos materiais, à execução e às características provenientes do concreto.

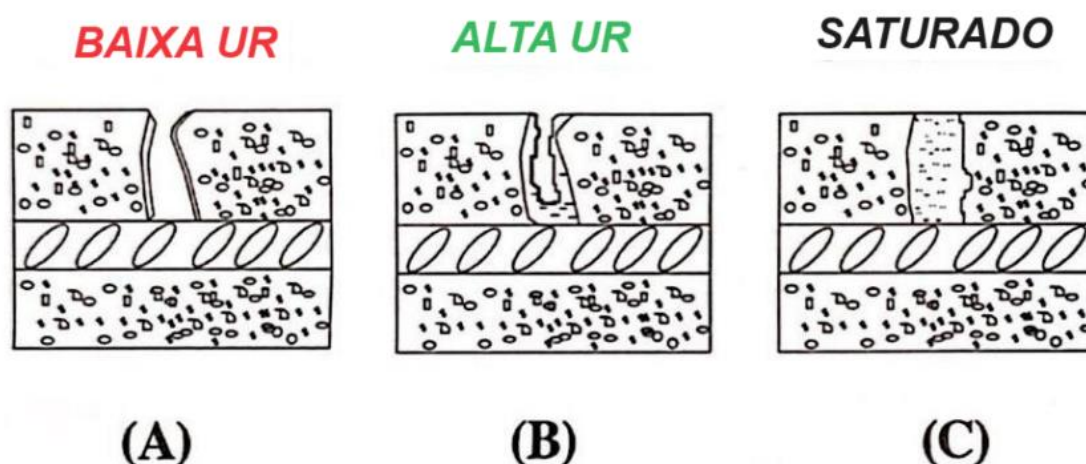
Na sequência, os principais fatores que influenciam a carbonatação dos materiais cimentícios são apresentados.

2.1.2.1. Condições externas de exposição

a) Umidade relativa do ar

Neville (2016) ressalta que a difusão do CO_2 e a carbonatação acontecem em uma determinada faixa de umidade dos poros da matriz cimentícia. O autor relata que nos casos em que os poros da pasta de cimento hidratada estejam saturados (Figura 5C) a difusão do CO_2 acontece lentamente, pois a difusão deste gás em água é bem mais lenta do que ao ar. No entanto, nos casos em que os poros da matriz se apresentam secos (Figura 5A), existirá a difusão do CO_2 e não a carbonatação, pois este fenômeno necessita de água. Por outro lado, se os poros estão preenchidos parcialmente com água (Figura 5B), a frente de carbonatação avança devido à coexistência da água e da possibilidade de difusão de CO_2 (NEPOMUCENO, 2005).

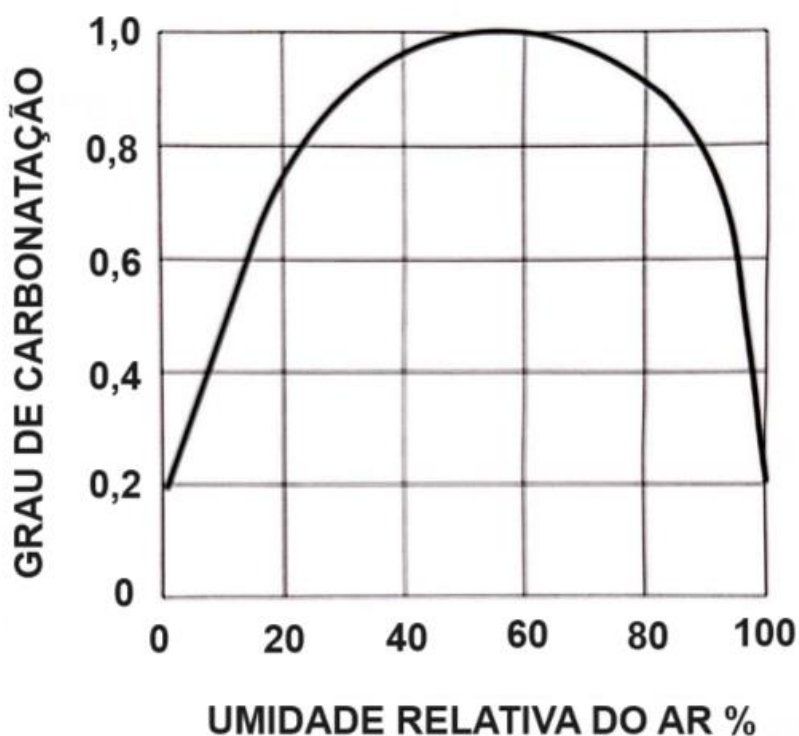
Figura 5: Umidade nos poros do concreto em função da umidade do ambiente.



Fonte: ANDRADE, 1992.

Não há um consenso quanto a um valor de umidade ideal para que ocorram as reações de carbonatação. Papadakis, Fardis e Vayenas (1992) estudaram o avanço da carbonatação em concretos com valores de umidade ambiente variando entre 40 e 80% e notaram que as profundidades de carbonatação foram maiores para umidades do ambiente entre 50 e 65%. Para Helene (1993), as maiores velocidades de carbonatação ocorrem com uma umidade relativa entre 65 e 85%. Se a umidade relativa estiver abaixo de 50% não haverá água suficiente para que ocorra as reações de carbonatação e se a umidade relativa estiver acima de 95% a difusão do CO_2 será dificultada, praticamente não havendo carbonatação. Neville (2016) aponta que a maior taxa de carbonatação ocorre com umidades relativas entre 50 e 70%. Estes valores coincidem com o gráfico apresentado por Andrade (1992), que mostra que a umidade ótima para o avanço da carbonatação se situa entre 50 e 80% de umidade relativa.

Figura 6: Variação do grau de carbonatação em relação à umidade do ambiente.

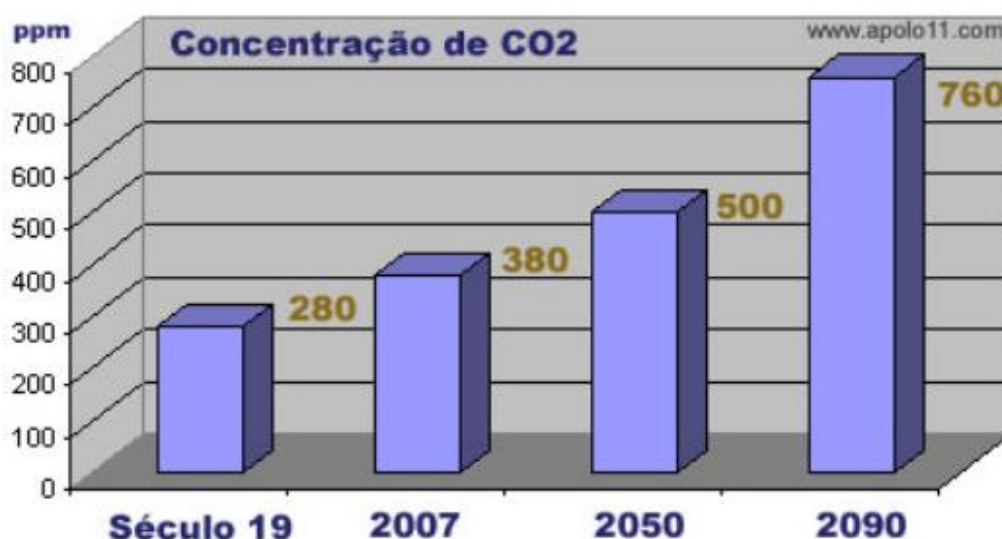


Fonte: ANDRADE, 1992.

b) Concentração de CO₂

A velocidade de carbonatação está diretamente ligada com a concentração de CO₂ no ambiente em torno das estruturas. Conforme Tasca (2012) a concentração de CO₂ tem se elevado acentuadamente ao longo dos anos, principalmente após a Revolução Industrial e por volta dos anos 1950 em decorrência do grande desenvolvimento técnico-científico que ocorreu neste período. Estudos realizados nos últimos tempos demonstram que, até o final do século, a concentração de CO₂ atingirá 760 ppm (partes por milhão), que consiste no dobro da concentração atual, como mostra a Figura 7 (CAMPOS, 2018).

Figura 7: Concentração de CO₂ na atmosfera ao longo dos anos.



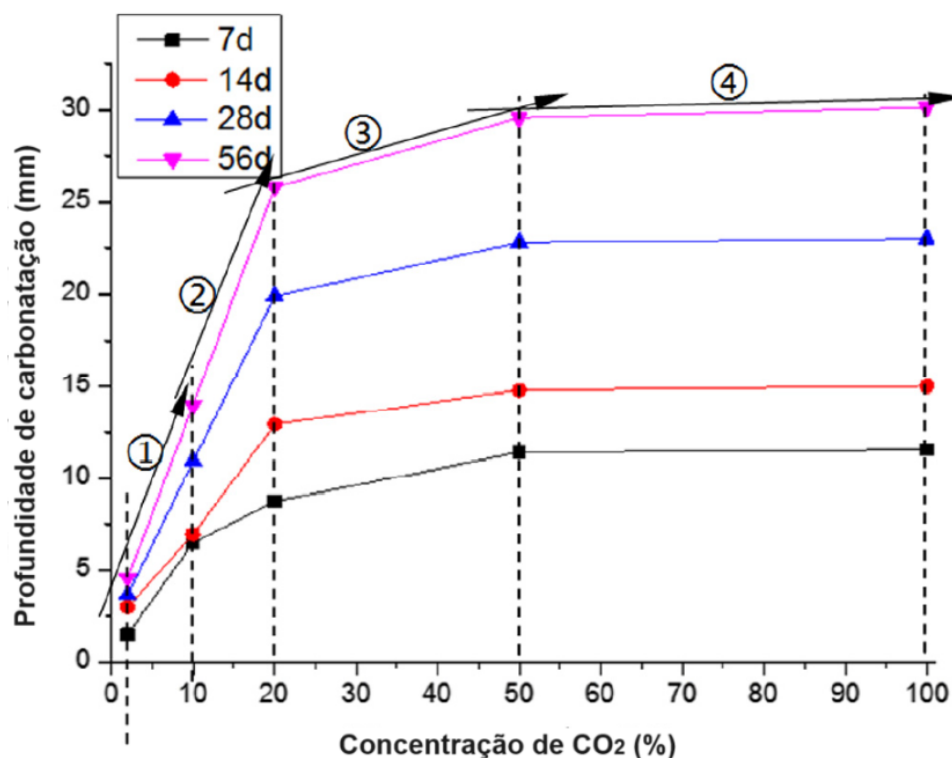
Fonte: APOLO 11. Disponível em www.apolo11.com/relogiocarbonico.php. Acesso em: 07 fev. 2023.

Segundo Helene (1993), a concentração de CO₂ em ambientes rurais podem variar entre 0,03 e 0,05%, já em locais de tráfego pesado, como as cidades grandes, esta concentração alcança valores entre 0,1 e 1,2%. O autor ainda completa que em ambientes de atmosferas viciadas, como silos e garagens, a concentração de CO₂ pode chegar a 1,8%. Kazmierczak (1995) enfatiza que há diferença nas concentrações de CO₂ de ambientes fechados. Em ambientes fechados, o autor denota que a carbonatação é superior à que ocorre em ambientes abertos, devido a renovação constante do ar.

Uomoto e Takada (1992) analisaram o avanço da frente de carbonatação de acordo com a concentração de CO_2 . Os autores realizaram testes em espécimes de concreto com diferentes valores de relação a/c (0,50, 0,60 e 0,70), variando a concentração de CO_2 de 0,07% (ambiente natural interno), 1% e 10% (teste acelerado), sob temperatura ($T = 20^\circ\text{C}$) e umidade ($\text{UR} = 55\%$) controladas. Eles observaram que a taxa de carbonatação aumentou proporcionalmente ao acréscimo de CO_2 , principalmente nos concretos de elevada relação a/c.

CUI *et al.* (2015) estudaram a influência da concentração de CO_2 na profundidade de carbonatação. Os pesquisadores verificaram que a variação da frente de carbonatação é muito pequena em concretos submetidos a concentrações elevadas (acima de 50%) de CO_2 , em decorrência do fechamento dos poros do concreto, porém o avanço da frente de carbonatação aumenta consideravelmente quando as concentrações de CO_2 são mais baixas (entre 2 e 20%). A Figura 8 mostra o que foi descrito anteriormente.

Figura 8: Profundidade de carbonatação referente a diferentes concentrações de CO_2 .



Fonte: Adaptado de CUI *et al.*, 2015.

Para Tasca (2012), a concentração de CO₂ é um fator indispensável no estudo da carbonatação de materiais cimentícios, porém este fator sozinho não é responsável pela profundidade de carbonatação, devendo estar relacionado a outros fatores ambientais que colaboram com a difusão do CO₂ nos poros da matriz cimentícia.

c) Temperatura

Como o aumento da temperatura normalmente acelera as reações químicas, Helene (1993) salienta que em países de clima equatorial e tropical a carbonatação é mais favorável do que em países com clima temperado.

Roy, Beng e Northwood (1996) afirmam em seu estudo que a temperatura possui influência na profundidade de carbonatação. Para concretos com o mesmo nível de resistência à compressão, os autores encontraram profundidades de carbonatação em Singapura (temperatura média de 28 °C) cerca de 70% maiores do que no Reino Unido e na Europa em geral (temperatura média entre 8 e 9 °C).

Neville (2016) explicita que pequenas variações na temperatura exercem pouca influência no processo de carbonatação, porém altas temperaturas aumentam a velocidade de carbonatação, a menos que a secagem sobressaia em relação ao efeito da temperatura.

Possan (2010) relata que a temperatura exerce pouca influência em relação à velocidade de carbonatação durante o período de iniciação. Já para o período de propagação a temperatura possui importância fundamental, sendo que influencia diretamente na taxa de corrosão da armadura.

2.1.2.2. Condições de mistura e cura

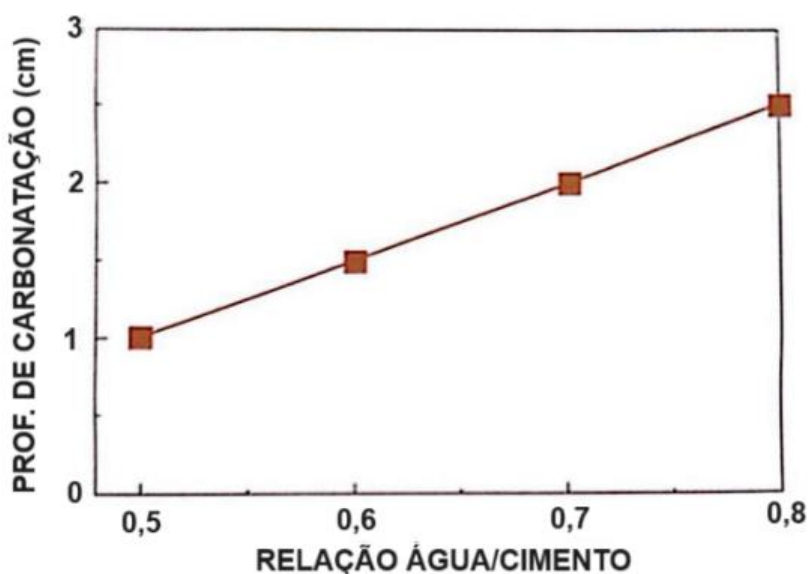
a) Condições de mistura

A relação água/cimento (a/c) tem ligação direta com a quantidade, dimensão e continuidade dos poros da matriz cimentícia do concreto endurecido. Consequentemente, quanto maior o valor da relação a/c, maior será a permeabilidade e a porosidade do concreto (SIMAS, 2007). Parrott (1990) ressalta que, o uso de uma relação a/c baixa reduz a porosidade do concreto e restringe a difusão de CO₂ na matriz cimentícia.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o volume de poros da matriz cimentícia fica cinco vezes maior quando a relação a/c aumenta de 0,4 para 0,8. Para uma variação da relação a/c na mesma proporção, Houst e Wittmann (1994) enfatizam que o coeficiente de difusão aumenta mais de dez vezes.

O gráfico da Figura 9, apresentado por Andrade (1992), mostra o efeito da relação a/c no avanço da carbonatação. Nota-se que a profundidade de carbonatação é 2,5 vezes maior para uma relação a/c igual a 0,8 do que a profundidade de carbonatação atingida com a relação a/c igual a 0,5.

Figura 9: Profundidade de carbonatação de acordo com a relação a/c.



Fonte: ANDRADE, 1992.

Li *et al.* (2013) analisaram a profundidade de carbonatação de amostras de concreto submetidas a diferentes valores de relação a/c e condições climáticas. Os autores verificaram que, as profundidades de carbonatação do concreto diminuíram com o decréscimo da relação a/c, independente das condições climáticas.

Ferreira (2013) estudou a profundidade de carbonatação de concretos com cinco tipos de adições minerais, três relações a/c (0,4, 0,55 e 0,7) e dois procedimentos diferentes de cura (úmida e seca), por um período de 10 anos. Em seu estudo, Ferreira (2013) concluiu que, apesar das adições minerais e dos diferentes tipos de cura, a profundidade de carbonatação foi maior no concreto com maior relação a/c.

Por interferir na difusão do CO₂, a relação a/c é um importante parâmetro para avaliar a profundidade de carbonatação dos materiais cimentícios. Porém, nos ensaios realizados em obras, não é possível realizar a medida dessa propriedade diretamente, portanto ela deve ser avaliada por meio de ensaios que estão relacionados com a relação a/c, como os ensaios de permeabilidade, absorção e resistência mecânica (FIGUEIREDO, 2004).

b) Cura

A cura do concreto consiste no intervalo de tempo necessário para que se produzam as reações iniciais de hidratação do cimento. Esse período é diretamente dependente de fatores como temperatura e umidade, que influenciam significativamente nas propriedades do material, sendo necessários cuidados especiais para que favoreçam física e quimicamente a constituição da matriz cimentícia. Com isso, deve-se garantir água suficiente em período adequado para as reações de hidratação, que devem ser função da composição química ou de eventuais adições ao cimento, visando que o aglomerante desenvolva resistência razoável antes que as tensões de tração se manifestem na superfície das peças (CADORE, 2008).

Para Ladeira (2017), uma boa prática de cura contribui com a obtenção de uma capa superficial compacta que protegerá a armadura e reduzirá a difusividade de CO₂. Helene (1993) ressalta que a profundidade de carbonatação depende da cura, visto que a mesma afeta as condições de hidratação nos primeiros milímetros superficiais..

Estudos realizados com períodos distintos de cura bem como com processos diferentes de cura apresentam que as condições de cura estão diretamente ligadas à resistência a carbonatação. No geral, a literatura traz que quanto maior o tempo de cura maior será o ganho das propriedades do concreto e, conseqüentemente, menor será a porosidade, diminuindo a carbonatação (CADORE, 2008).

Segundo Pauletti (2004), acerca do tipo de cura empregada, observa-se que na maioria das pesquisas os autores realizam a cura úmida ou submersa durante um período que varia entre 7 e 28 dias. Campos (2018) expõe que a cura úmida ou submersa concede melhores condições para a hidratação do cimento e fechamento dos poros.

Lo e Lee (2002) compararam em seu estudo a carbonatação de amostras de concreto submetidas à cura ao ar e cura úmida. Eles verificaram que os concretos que

passaram pela cura úmida apresentaram 72% da carbonatação dos concretos curados ao ar, depois de 3 meses de ensaio acelerado. Lo e Lee (2002) explicam que quando exposto a cura ao ar o material possui poros maiores e mais canais intercomunicáveis, favorecendo e aumento a velocidade da difusão do CO₂.

Pauletti (2004) aponta que a cura interfere, principalmente, na superfície dos compósitos cimentícios e, como a penetração de CO₂ acontece através dessa superfície, a cura possui papel fundamental na restrição da carbonatação.

2.1.3. Ensaio acelerado de carbonatação

O fenômeno da carbonatação pode ser analisado pelo processo denominado de ensaio acelerado de carbonatação. Este ensaio busca simular as condições mais propícias para o desenvolvimento das reações de carbonatação, por meio do controle de fatores que influenciam o fenômeno, gerando resultados no menor intervalo de tempo possível (PAULETTI, 2009).

Para acelerar a carbonatação, estudos são realizados em condições que oferecem teores de 1 a 100%. A umidade relativa e a temperatura também são fatores controlados no ensaio acelerado de carbonatação, pois contribuem diretamente na penetração das frentes de carbonatação. A obtenção de resultados no menor intervalo de tempo possível com o uso de ensaios acelerados permite maior controle e reduz diretamente os custos financeiros às pesquisas (LADEIRA, 2017).

Como não há a normatização dos ensaios de carbonatação, cada pesquisa adota métodos e parâmetros distintos para a realização do mesmo, dificultando ou até impossibilitando a comparação dos resultados obtidos nestas pesquisas. Com isso, verifica-se a importância da normatização dos ensaios de carbonatação, pois dentre os pesquisadores há uma grande variação nos parâmetros utilizados para ensaios acelerados (LADEIRA, 2017; PAULETTI, 2004).

Estudos realizados nos últimos 8 anos mostram os parâmetros adotados por diversos pesquisadores em ensaios acelerados de carbonatação, apresentados na Tabela 1. Nota-se que os ensaios de carbonatação acelerada em argamassas foram realizados com uma grande variação da concentração de CO₂ (entre 3 e 20%), enquanto as temperaturas situam-se entre 20 e 40 °C e as umidades relativas encontram-se no intervalo entre 40 e 70%.

Tabela 1: Características dos estudos de carbonatação em argamassas realizados por diversos pesquisadores.

Autor	Ano	Amostras forma/dim (mm)	Relação a/agl	Tipo/tempo de cura (dias)	Sazonamento tempo/local	UR (%)	T (°C)	CO ₂ (%)	Tempo de exposição (dias)
Pham	2014	Cilindro 40x60	0,5	Úmida 90	7 dias -	65	20	20	7, 14 e 32
You, Jeong e Hyung	2014	Cilindro 100x200	0,55	Submersa 28	-	40	25	15	14
Lacerda	2016	Cilindros 50x100 20x40	0,48 e 0,70	Úmida 28 dias	8 horas Laboratório	65 ± 1	28 ± 1	5,0 ± 0,1	7, 14, 21, 28 e 56
Campos	2018	Primas 50x100 Cilindros 50x100	0,55 e 0,65	Submersa 28	-	65 ± 5	27 ± 2	3,0 ± 0,5	28, 56, 70 e 98
Coelho, Rocha e Ludvig	2018	Cilindro 50x100	0,55	Úmida 28	14 dias Laboratório	65	20	5	30 e 90
Cordeiro	2018	Cilindros 50x100	0,44, 0,45, 0,47 e 0,48	Submersa 28 Úmida -	-	65 ± 5	27 ± 2	3,0 ± 0,5	14, 28, 42, 56, 70, 98 e 126
Santana <i>et al.</i>	2018	Cilindros 50x100	0,51, 0,53 e 0,54	Submersa 28	14 dias -	Entre 50 e 70	Entre 20 e 40	Entre 10 e 15	20
Abedi <i>et al.</i>	2020	Prisma 40x40x160	0,5	Submersa 7 e 28	-	55 ± 5	20 ± 2	4 ± 0,5	1, 4, 7, 14, 30, 60 e 90
Carasek <i>et al.</i>	2020	Prisma 40x40x160	0,55	Submersa 3, 9 e 28	-	70 ± 5	20 ± 1	10	7
Bui <i>et al.</i>	2021	Prisma 40x40x160	0,5	- 14	-	65	20	4	84

Fonte: A própria autora, 2022.

A concentração de CO₂ diz respeito à quantidade (em volume) do gás que é introduzido na câmara do ensaio. É recomendado que os testes de carbonatação acelerada sejam realizados com teores de concentração de CO₂ abaixo de 20%, com intuito de evitar coeficientes de carbonatação irreais encontrados em níveis mais altos. Elevadas concentrações de CO₂ causam alterações da microestrutura da pasta de cimento que não seriam desenvolvidas em condições naturais (NEVILLE, 2016; PAULETTI, 2004; SANJUÁN; DEL OLMO, 2001).

Para diferentes pesquisadores a umidade relativa ideal para que aconteçam as reações de carbonatação está entre 50 e 80%. Esse valor está relacionado com a umidade relativa dos poros do material (PAULETTI, 2004).

Quanto a temperatura, temperaturas usuais entre 20 e 40 °C não influenciam significativamente a carbonatação, entretanto é um fator importante no processo de corrosão de armaduras e não pode ser desprezado (PAULETTI, 2004).

O tipo e o tempo de cura também são fatores que influenciam a carbonatação e, quando não variam, normalmente são empregadas curas por 7 e 28 dias em câmara úmida ou cura submersa (PAULETTI, 2004).

O sazonalamento consiste na etapa entre a cura das amostras e o início do ensaio de carbonatação, que garante uma pré-secagem das amostras e o equilíbrio da umidade interna das mesmas com a do ambiente. Durante esta etapa as amostras desenvolvem algumas propriedades que influenciam nos resultados dos ensaios que serão obtidos. Contudo, apesar do método de sazonalamento interferir na profundidade de carbonatação, a maioria dos estudos realizados não enfatizam e nem descreve a realização do mesmo (PAULETTI, 2004; LADEIRA, 2017).

Mesmo que as condições ambientais e os procedimentos sejam constantes nas pesquisas realizadas, ainda há muita diversidade nos fatores independentes. Mediante a normalização dos ensaios de carbonatação, a comparação entre os resultados de diferentes pesquisas será facilitada e a adoção de parâmetros que favoreça o distanciamento entre o processo acelerado e o fenômeno natural será evitada (PAULETTI, 2004; ISAIA, 2011).

2.1.4. Avaliação da carbonatação

Diversos métodos de ensaio permitem medir a profundidade de frentes de carbonatação, dentre eles está a aspersão de indicadores de pH. Este método distingue a região carbonatada da não carbonatada e é o método mais comum devido a facilidade de aplicação e baixo custo. Como indicador de pH pode-se utilizar soluções de fenolftaleína, timolftaleína e amarelo de alizarina. Essas substâncias apresentam uma coloração específica de acordo com o pH da superfície em contato. A solução de fenolftaleína é a mais utilizada à 1% dissolvida em álcool etílico e

apresenta uma coloração vermelho-carmim para pH superiores a 9,8 e permanecendo incolor para pH inferiores a 9 (LADEIRA, 2017; TASCA, 2012).

Mesmo que os indicadores de pH não consigam mostrar com precisão onde se encontra a frente de carbonatação, os mesmos são capazes de identificar a região em que houve alteração de pH dentro de uma determinada faixa, que é o que comanda a despassivação do aço (PAULETTI, 2009).

O procedimento para o ensaio de medida da carbonatação por fenolftaleína é descrito pela RILEM (1988), sob a designação CPC-18. Deve-se realizar a aspersão do indicador de pH, em forma de névoa, na superfície recém fraturada do corpo de prova antes que a face exposta pela fratura comece a carbonatar ao reagir com o CO₂ presente na atmosfera. A região não carbonatada apresentará uma coloração vermelho-carmim enquanto a região carbonatada permanece incolor. Quando o indicador de pH estiver seco, pode-se aplicar uma resina incolor, sem brilho, para fixação da cor. A RILEM (1988) indica que a medição da profundidade de carbonatação seja realizada 24 horas após a aspersão do indicador de pH, que é quando o limite entre as faces carbonatadas e não carbonatadas fica mais evidente. A precisão das medidas deve ser de 0,5 mm e valores de carbonatação inferiores não devem ser considerados.

Kazmierczak e Zara (1996) *apud* Tasca (2012), ressaltam alguns cuidados que devem ser tomados no processo de execução da fratura e mensuração da profundidade de carbonatação. Os autores comentam que a superfície não deve ser serrada, molhada ou apresentar excesso de pó, uma vez que esses fatores prejudicam a visualização e podem interferir nos resultados. Sendo assim, eles recomendam que seja realizada uma limpeza com pincel ou jato de ar comprimido na superfície fraturada e que a aspersão do indicador seja feita em um período inferior a um minuto após a fratura.

2.2. ÓXIDO DE GRAFENO

Inicialmente, o OG foi preparado pela primeira vez no ano de 1895 pelo químico britânico Brodie, porém o processo de preparação era considerado bastante perigoso e o produto final obtido não apresentava boa qualidade. Anos depois, após Staudenmaier e Hummers desenvolverem métodos mais seguros e eficientes para a

obtenção de OG com uma qualidade elevada, diversos pesquisadores utilizavam cada vez mais este nanomaterial para incorporação em materiais cimentícios. Atualmente, o OG se tornou um nano *filler* bastante aplicado em materiais compósitos à base de cimento, fornecendo resultados satisfatórios (ZHENG *et al.*, 2017).

O óxido de grafeno (OG) é um nanomaterial derivado do grafeno, composto por uma rede hexagonal de átomos de carbono com orbitais hibridizados sp^2 e sp^3 . Devido à presença de grupos funcionais contendo oxigênio (como hidroxila, carbonila e carboxila) no plano basal e bordas da estrutura molecular, o OG se mostra um excelente material hidrofílico (MOHAMMED *et al.*, 2015; LU *et al.*, 2016; ZHAO *et al.*, 2020a).

Além da boa dispersão em água, o OG apresenta elevada superfície específica, elevada condutividade térmica, elétrica, alto módulo de elasticidade, alta resistência à tração e tem a capacidade de diminuir a porosidade dos compósitos cimentícios, aumentando a resistência à permeabilidade dos mesmos (PAN *et al.*, 2015; LIN, WEI e HU, 2016; HOU *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2017; ZHAO *et al.*, 2017).

Existem três métodos para a obtenção do óxido de grafeno. O primeiro é conhecido como micro esfoliação mecânica, que consiste na utilização de fitas adesivas para retirada de camadas do grafite. O segundo é referente à deposição química a vapor, em altas temperaturas, sobre substratos metálicos. O terceiro é o mais utilizado, denominado de microesfoliação química, proposto por Hummers e Hoffman em 1958 (OLIVEIRA, POLETO e SEVERO, 2018).

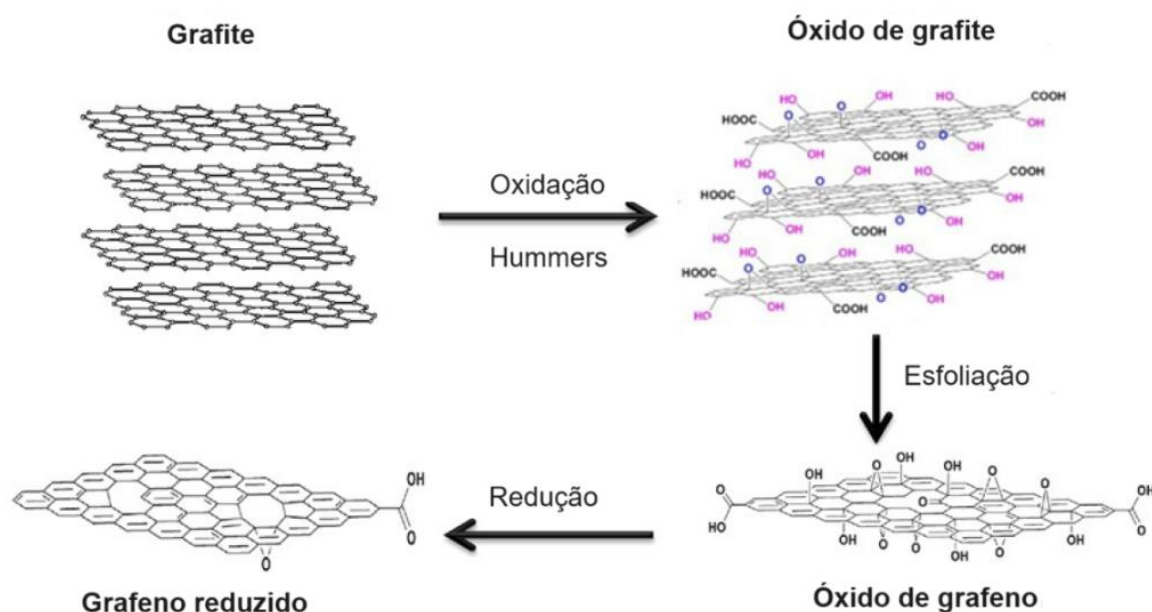
Pan *et al.* (2015) descrevem as etapas realizadas no método de Hummers, da seguinte forma:

- 1) Oxidação: o grafite passa por oxidação através de agentes químicos oxidantes em meio ácido ($KMnO_4$ e H_2SO_4). Nesta etapa, os grupos funcionais contendo oxigênio são inseridos na estrutura molecular do grafite transformando-o em óxido de grafite. A inserção dos grupos funcionais proporciona o distanciamento entre as folhas de grafeno e enfraquece as ligações intermoleculares, tornando o óxido de grafite um material com boa dispersão em meio aquoso.
- 2) Esfoliação: a solução de óxido de grafite passa pelo processo de ultrassonificação para que ocorra a esfoliação e obtenção de camadas singulares, produzindo a solução de OG.

- 3) Purificação: os íons remanescentes do ácido e dos agentes oxidantes são removidos da solução de OG com o uso de água destilada e filtragem a vácuo.
- 4) Redução: agentes químicos redutores são empregados para converter o PG em óxido de grafeno reduzido.

A Figura 10 mostra o esquema para obtenção do OG por meio do método de Hummers.

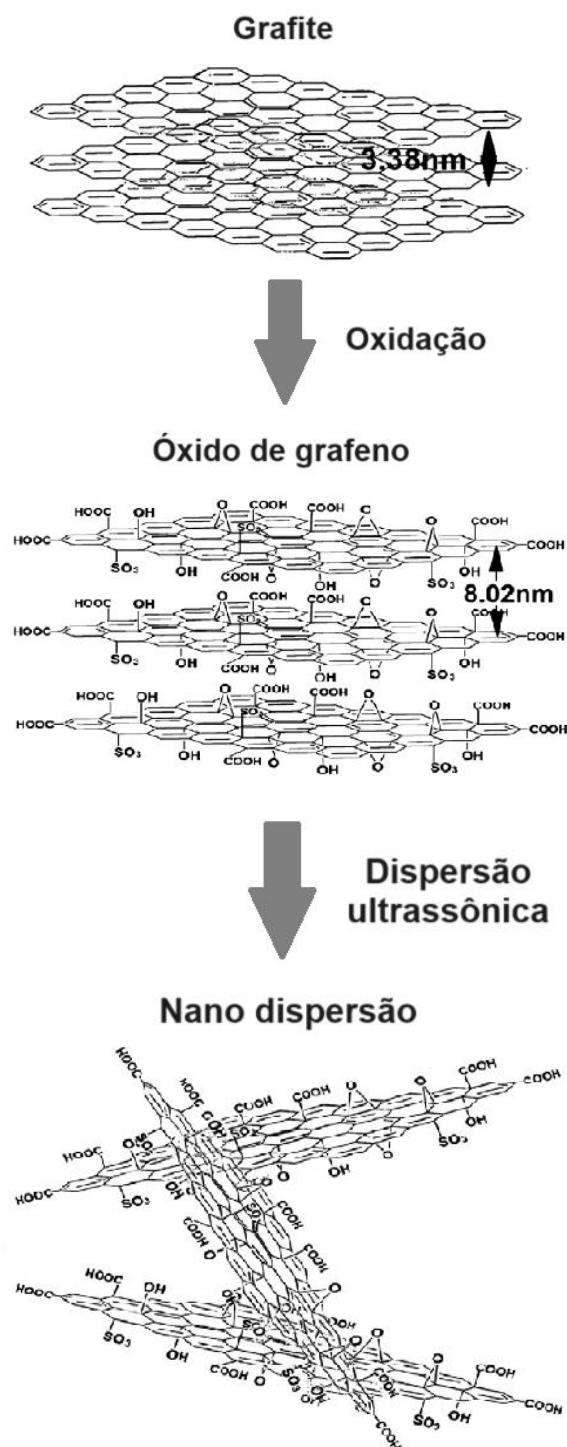
Figura 10: Método de Hummers para obtenção do óxido de grafeno e óxido de grafeno reduzido.



Fonte: ZARBIN e OLIVEIRA, 2013.

Horta (2020) comenta que as transformações da conversão do grafite em OG acontecem em nível molecular e podem ser observadas na Figura 11. Horta (2020) ainda explica que a oxidação do grafite provoca um distanciamento entre as camadas do nanomaterial e as ligações intermoleculares são enfraquecidas. O autor enfatiza que o processo de dispersão, realizado por ultrassonificação, centrifugação ou aplicação de aditivos químicos, visa separar as camadas para que o óxido de grafeno fique disperso na solução.

Figura 11: Diagrama esquemático da conversão do grafite em óxido de grafeno.



Fonte: Adaptado de LV et al., 2013.

2.2.1. Uso do óxido de grafeno em compósitos de cimento

Os principais problemas dos materiais cimentícios estão relacionados aos defeitos estruturais e à morfologia desordenada que os mesmos apresentam, afetando significativamente sua resistência e durabilidade. O OG é um nanomaterial que apresenta um grande potencial e pode promover um elevado nível de reforço à matriz dos materiais cimentícios, devido à sua boa dispersão em água e excelentes propriedades mecânicas (HORTA, 2020; LV *et al.*, 2016; PAN *et al.*, 2015).

A elevada superfície específica do OG melhora a interação com os produtos de hidratação do cimento e, por possuir comportamento catalítico, o OG pode acelerar esta reação de hidratação. Os grupos funcionais de oxigênio contidos na estrutura molecular do OG atuam como sítios de adsorção para moléculas de água e para os componentes do cimento favorecendo a reação de hidratação e a nucleação de cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). No mais, o mecanismo de adsorção de água na superfície das moléculas de OG reduz o conteúdo de água livre, proporcionando a redução da porosidade e aumento da resistência mecânica (LIN, WEI e HU, 2016).

O aumento da resistência mecânica e da durabilidade de um material cimentício, ocasionado pela incorporação de OG, relaciona-se com as excelentes propriedades mecânicas que o OG apresenta e com a capacidade de preenchimento de poros de maior dimensão que o mesmo possui, deixando a estrutura do material cimentício mais densa e com menos defeitos (LI *et al.*, 2017; MOHAMMED *et al.*, 2015).

Com a morfologia rugosa, o OG também pode propiciar o intertravamento da matriz cimentícia. A elevada resistência à tração e o elevado módulo de elasticidade que o nanomaterial possui são propriedades que o tornam capaz de restringir a iniciação e propagação de fissuras no compósito cimentício, em uma escala nanométrica, diminuindo a possibilidade de ruptura do material (PAN *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2017).

Lv *et al.* (2013) avaliaram em seu estudo o efeito do OG na microestrutura e nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios. Os autores realizaram testes de resistência mecânica em argamassas com teores de OG variando entre 0,01 e 0,05% em relação à massa de cimento, 0,2% de superplastificante PC também em relação à massa de cimento e relação a/c igual a 0,37. Os resultados obtidos por Lv

et al. (2013) indicaram que a resistência à tração e à tração na flexão aumentou de acordo com a dosagem de OG, até o teor de 0,03%. Para o teor de 0,03% de OG, a argamassa apresentou notável aumento na resistência à tração (78,6%), resistência à tração na flexão (60,7%) e resistência à compressão (38,9%) em relação ao traço utilizado como referência.

Long *et al.* (2018) realizaram testes de porosimetria por intrusão de mercúrio em argamassas produzidas com areia reciclada, teores de 0,05%, 0,1% e 0,2% de OG em relação à massa de cimento, relação a/c igual a 0,66 e superplastificante com massa 30% maior que o peso de OG adicionado. A adição de OG reduziu a porosidade total e o diâmetro dos poros em comparação à argamassa sem OG. A argamassa com teor de 0,2% apresentou a menor porosidade, cerca de metade da porosidade da argamassa de referência. Long *et al.* (2017) concluíram que a redução da porosidade relaciona-se com a hidratação do cimento promovida pelo OG.

Mohammed *et al.* (2018) comentam que a redução da porosidade dos materiais cimentícios causada pela incorporação de OG, reduz a taxa de carbonatação restringindo o movimento de moléculas de CO₂ na microestrutura dos materiais cimentícios. Lv *et al.* (2017) analisaram a carbonatação em compósitos cimentícios (pasta de cimento e argamassa) com teores de 0,03%, 0,05% e 0,07% de OG em relação à massa de cimento, relação a/c igual a 0,2 e 0,6% de superplastificante PC em relação à massa de cimento. Os autores submeteram as amostras ao ensaio de carbonatação acelerada e mediram as profundidades de carbonatação aos 7 e 28 dias. Lv *et al.* (2017) notaram que a profundidade de carbonatação aumentou ao longo do tempo, porém diminuiu conforme o aumento do teor de OG adicionado. As pastas de cimento apresentaram uma diminuição na profundidade de carbonatação aos 28 dias de 34,62% para o teor de 0,03% de OG, 62,75% para o teor de 0,05% de OG e 72,67% para o teor de 0,07% em comparação com a referência. Para as argamassas, o único teor utilizado pelos autores na preparação de amostras foi de 0,05%, que apresentou diminuição de 55,06% da profundidade de carbonatação aos 28 dias em comparação à amostra de referência.

Ademais de todas as propriedades descritas anteriormente, a facilidade de obtenção do OG também é um fator que favorece sua utilização, visto que ele é obtido através da esfoliação do grafite, que pode ser encontrado em pó ou em flocos na natureza (PAN *et al.*, 2015).

2.3. CAPTURA DE CO₂ POR CARBONATAÇÃO

As emissões gasosas derivadas do processo produtivo do cimento têm chamado a atenção, uma vez que este processo é responsável por cerca de 5 a 7% das emissões globais de CO₂. A redução das emissões associadas à produção do cimento é um grande desafio frente ao crescente consumo mundial de concreto e ao fato de que a maior parte das emissões originam-se na principal matéria-prima utilizada (calcário) que pode ser substituída apenas em quantidades muito reduzidas. Com isso, uma abordagem de captura de CO₂ se mostra como uma alternativa viável para compensar parcialmente o impacto destas emissões. (SNIC, 2020; ALI, SAIDUR e HOSSAIN, 2011; SKOCEK, ZAJAC e BEN HAHA, 2020).

São reconhecidos dois tipos de sequestro de CO₂: o direto e o indireto. O processo direto consiste na captura de CO₂ proveniente de processos industriais e da queima de combustíveis fósseis antes que ele alcance a atmosfera, neste caso o CO₂ deve ser separado dos efluentes gasosos e deve ser transportado e injetado diretamente nos oceanos e/ou em formações geológicas. No sequestro indireto, o CO₂ é extraído naturalmente e incorporado em reações químicas que contenham o mesmo em sua composição, como exemplo tem-se as reações de fotossíntese e as reações de carbonatação de materiais cimentícios (COSTA, 2009; YANG *et al.*, 2008).

De maneira geral, o processo de captura de CO₂ pela carbonatação de materiais cimentícios é esquematizado como mostra a Figura 12 (FELIX e POSSAN, 2018). O balanço das emissões pode ser obtido de acordo com a diferença entre o total de CO₂ gerado pela produção de cimento e a quantidade de CO₂ capturado pelas reações químicas de carbonatação ao longo do ciclo de vida da estrutura e no período de pós-demolição da mesma (MAZURANA, 2019).

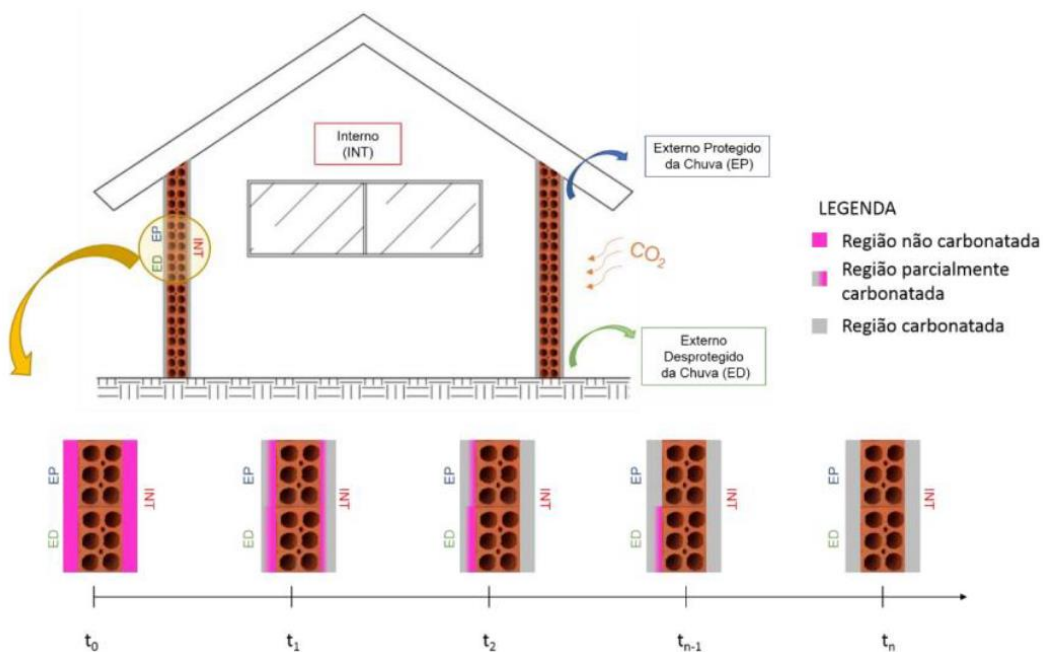
As estruturas não armadas, como artefatos de concreto e revestimentos argamassados, não possuem vergalhões para serem corroídos, portanto neste tipo de estrutura a carbonatação pode ser considerada um efeito benéfico. Isto se deve ao fato de que a reação de carbonatação reduz a porosidade do material cimentício, aumentando a resistência do mesmo e, ao mesmo tempo, capturando CO₂, processo reverso ao da fabricação de cimento (FELIX e POSSAN, 2018; PADE e GUIMARAES, 2007; POSSAN *et al.*, 2017). A Figura 13 demonstra o avanço da frente de carbonatação em revestimentos argamassados aplicados em uma edificação.

Figura 12: Carbonatação x captura de CO₂.



Fonte: FELIX e POSSAN, 2014.

Figura 13: Representação da frente de carbonatação em revestimentos argamassados.



Fonte: ANTONIO, 2018.

Antonio (2018) verificou a capacidade de captura de CO₂ por meio da carbonatação de argamassas de revestimento produzidas com RCD. A autora analisou dois traços em sua pesquisa, sendo um à base de cimento e outro misto com

cal. Nestes traços também ocorreu a substituição do agregado natural pelo agregado de RCD, em massa, com porcentagens de 50 e 100%. Antonio (2018) observou que, após a carbonatação total ser atingida, as argamassas de revestimento podem absorver entre 46 e 59% do CO₂ emitido em seu processo de produção, dependendo da presença ou não de cal e da quantidade de clínquer na composição do cimento.

Mazurana (2019) analisou em seu estudo a captura de CO₂ em argamassas de revestimento através da carbonatação natural. A autora utilizou três diferentes traços de argamassas, sendo um apenas com cimento (1:6 em massa) e dois traços mistos com cimento e cal (1:1:6 e 1:2:6 em massa). Para todos os traços também foram avaliados cinco teores de substituição de agregado natural por RCD, em massa, nos teores de 25, 50, 75 e 100%. Mazurana (2019) concluiu que as argamassas em estudo são capazes de absorver entre 36,5 e 53,8% do CO₂ emitido em sua produção, a absorção depende da presença de cal hidratada e da quantidade de RCD utilizada na fabricação das argamassas.

Os estudos de captura de CO₂ por carbonatação em materiais cimentícios são majoritariamente voltados ao concreto pelo fato de que a influência da carbonatação está associada ao processo de corrosão das armaduras. Com isso, as pesquisas realizadas voltadas à carbonatação e captura de CO₂ em argamassas ainda são escassas (ANTONIO, 2018).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Abaixo estão descritos os materiais utilizados e os métodos desenvolvidos nesta pesquisa.

3.1. MATERIAIS

Para a produção das argamassas foram utilizados cimento Portland CP V-ARI, óxido de grafeno disperso em solução aquosa, areia normal brasileira e água.

3.1.1. Cimento

Neste trabalho, foi utilizado o cimento CP V-ARI para a elaboração das argamassas com e sem adição de OG, que é um cimento com composição de 90 a 100% de clínquer conforme NBR 16697 (ABNT, 2018). Por ser o cimento com o maior teor de clínquer comercialmente encontrado, o CP V-ARI foi utilizado para verificar o efeito das adições de OG nas argamassas. O cimento utilizado era da marca Cimento Nacional e foi adquirido por meio da empresa Tecfer.

A Tabela 2 e a Tabela 3 abaixo apresentam características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP V-ARI fornecidas pelo fabricante, bem como os limites definidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Nota-se que as características do cimento encontram-se dentro das especificações definidas pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 2: Características físicas e mecânicas do cimento CP V-ARI.

Teste	Norma	Unidade	Resultados fornecidos	Limites da Norma
Área específica (Baine)	-	cm ² /g	4896	-
Resíduo na peneira 75 µm	NBR 16697 (ABNT, 2018)	%	0,90	≤ 6,0
Expansibilidade a quente	NBR 16697 (ABNT, 2018)	mm	0	≤ 5,0

Continua

Teste		Norma	Unidade	Resultados fornecidos	Limites da Norma
Tempo de pega	Início	NBR 16697	min	163	≥ 60
	Fim	(ABNT, 2018)		194	≤ 600
Resistência à compressão	1 dia		MPa	27,4	$\geq 14,0$
	3 dias	NBR 16697		38,8	$\geq 24,0$
	7 dias	(ABNT, 2018)		43,5	$\geq 34,0$
	28 dias			50,6	-

Fonte: Cimento Nacional, 2023; NBR 16697, 2018.

Tabela 3: Características químicas do cimento CP V-ARI.

Teste	Norma	Unidade	Resultados fornecidos	Limites da norma
MgO	NBR 16697 (ABNT, 2018)	%	0,5	$\leq 6,5$
SO ₃	NBR 16697 (ABNT, 2018)	%	3,1	$\leq 4,5$
NA ₂ O	-	%	0,05	-
K ₂ O	-	%	0,74	-
NA ₂ O _{eq}	-	%	0,54	-
Perda ao fogo	NBR 16697 (ABNT, 2018)	%	3,8	$\leq 6,5$
Resíduo insolúvel	NBR 16697 (ABNT, 2018)	%	0,6	$\leq 3,5$

Fonte: Cimento Nacional, 2023; NBR 16697, 2018.

3.1.2. Óxido de Grafeno

O OG utilizado neste trabalho para adição em argamassas foi adquirido junto à empresa NanoView Nanotecnologia. O nanomaterial foi adquirido em suspensão aquosa na concentração de 5,0 g/L, produzida pelo método de Hummers e Hoffman

e apresenta entre 1 e 10 camadas com dimensões laterais de aproximadamente 5 μm e grau de oxidação de cerca de 40% em massa.

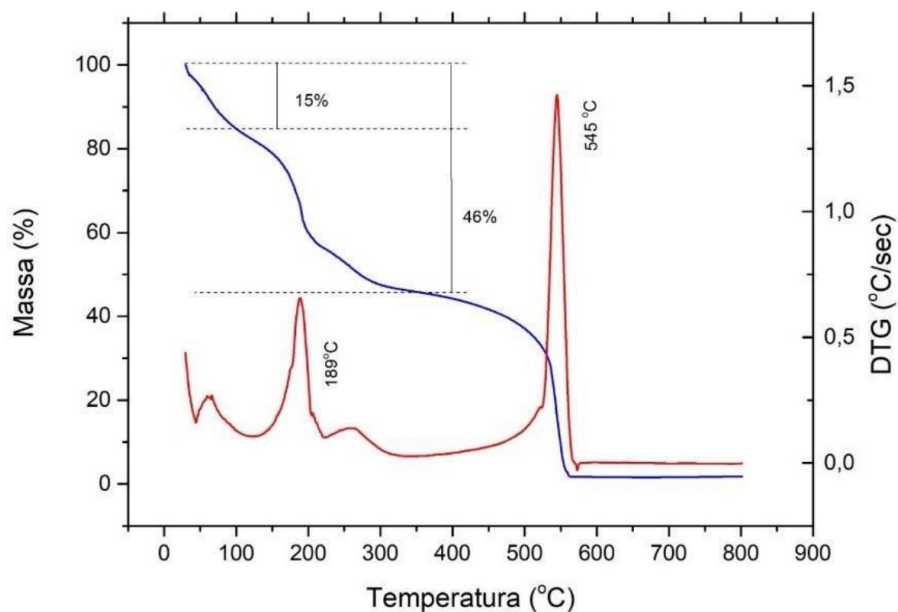
Figura 14: OG utilizado para produção das argamassas.



Fonte: A própria autora, 2023.

A caracterização do OG foi fornecida pela empresa NanoView Nanotecnologia e os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

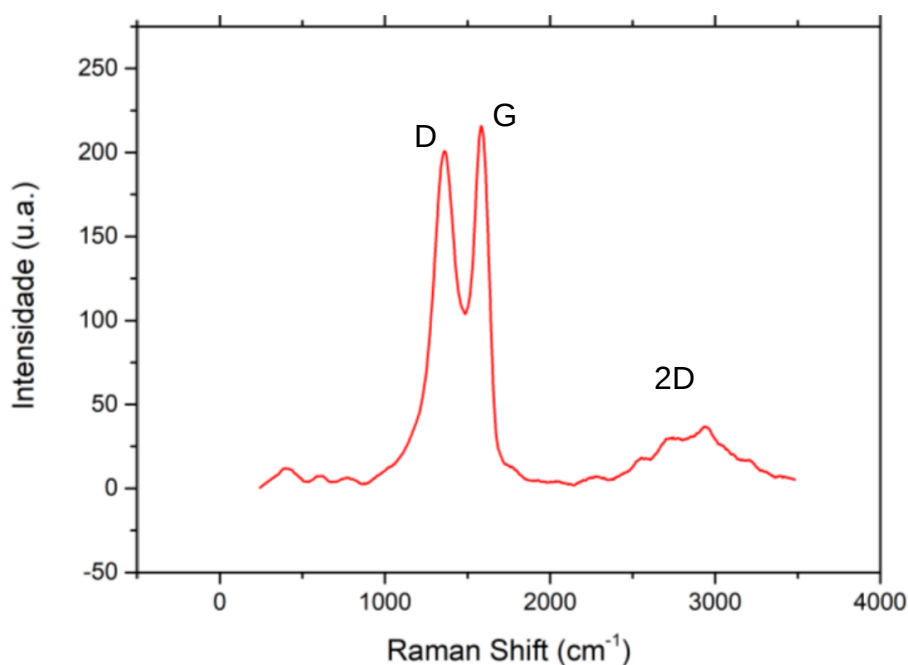
Figura 15: Análise Termogravimétrica do OG.



Fonte: NanoView Nanotecnologia, 2023.

A Figura 15 mostra a curva termogravimétrica do OG. Nota-se, na curva termogravimétrica, estágios bem definidos de perda de massa com o aumento da temperatura. É possível observar que a degradação do OG se inicia antes de 100 °C, essa perda de massa pode ser atribuída à remoção de água adsorvida. Em seguida, verifica-se uma perda em torno de 189 °C, que pode ser relacionada à eliminação de produtos oxigenados contidos no OG. A última perda de massa acontece na temperatura de 545 °C e está relacionada com a pirólise do esqueleto de carbono do OG (PEREIRA, 2019).

Figura 16: Espectroscopia Raman do OG.

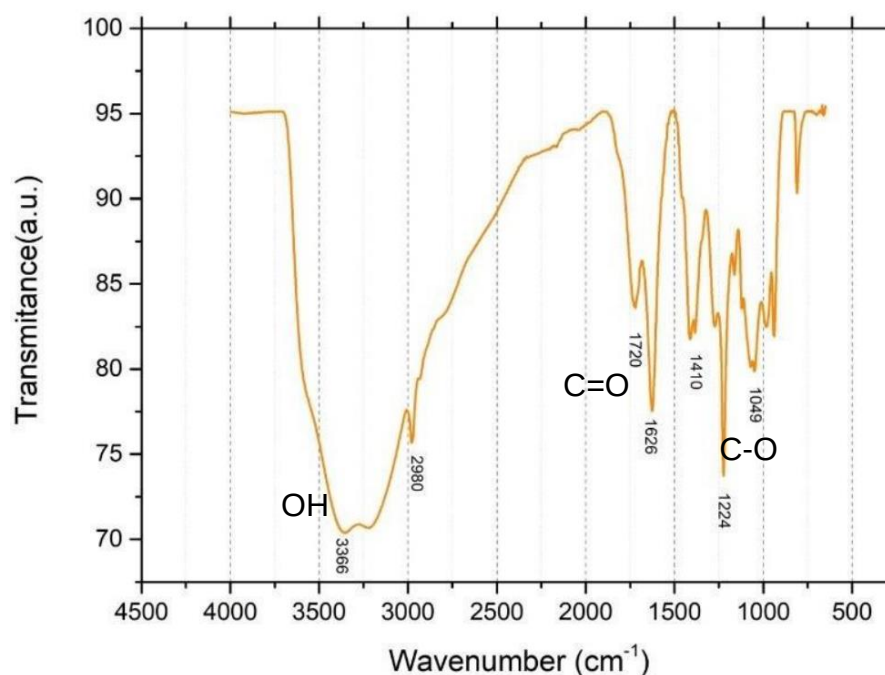


Fonte: NanoView Nanotecnologia, 2023.

A caracterização do OG obtida por meio do ensaio de Espectroscopia Raman é mostrada na Figura 16 e apresenta claramente as bandas D e G. A banda D está relacionada à desordem do material e refere-se à perda de simetria dos anéis aromáticos da estrutura, dessa forma o aumento da desordem do OG provoca um deslocamento da banda D. Já o deslocamento da banda G está associado à vibração no plano dos átomos de carbono sp² (CANÇADO *et al.*, 2011; ALBUQUERQUE, 2021). O resultado da análise, apresentado na Figura 16, demonstra uma predominância das bandas D e G em função da introdução de grupos oxigenados na rede cristalina, confirmando o processo de oxidação e indicando que o material

analisado realmente trata-se do OG (RUMMELI *et al.*, 2010; LIU, HUANG e WANG, 2013; GOMES, MATSUSHIMA e BALDAN, 2016). A banda 2D, indicada na Figura 16, refere-se ao número de camadas do material analisado (GOMES, MATSUSHIMA e BALDAN, 2016; ALMEIDA, SANTOS e EDWARDS, 2021).

Figura 17: Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier do OG.



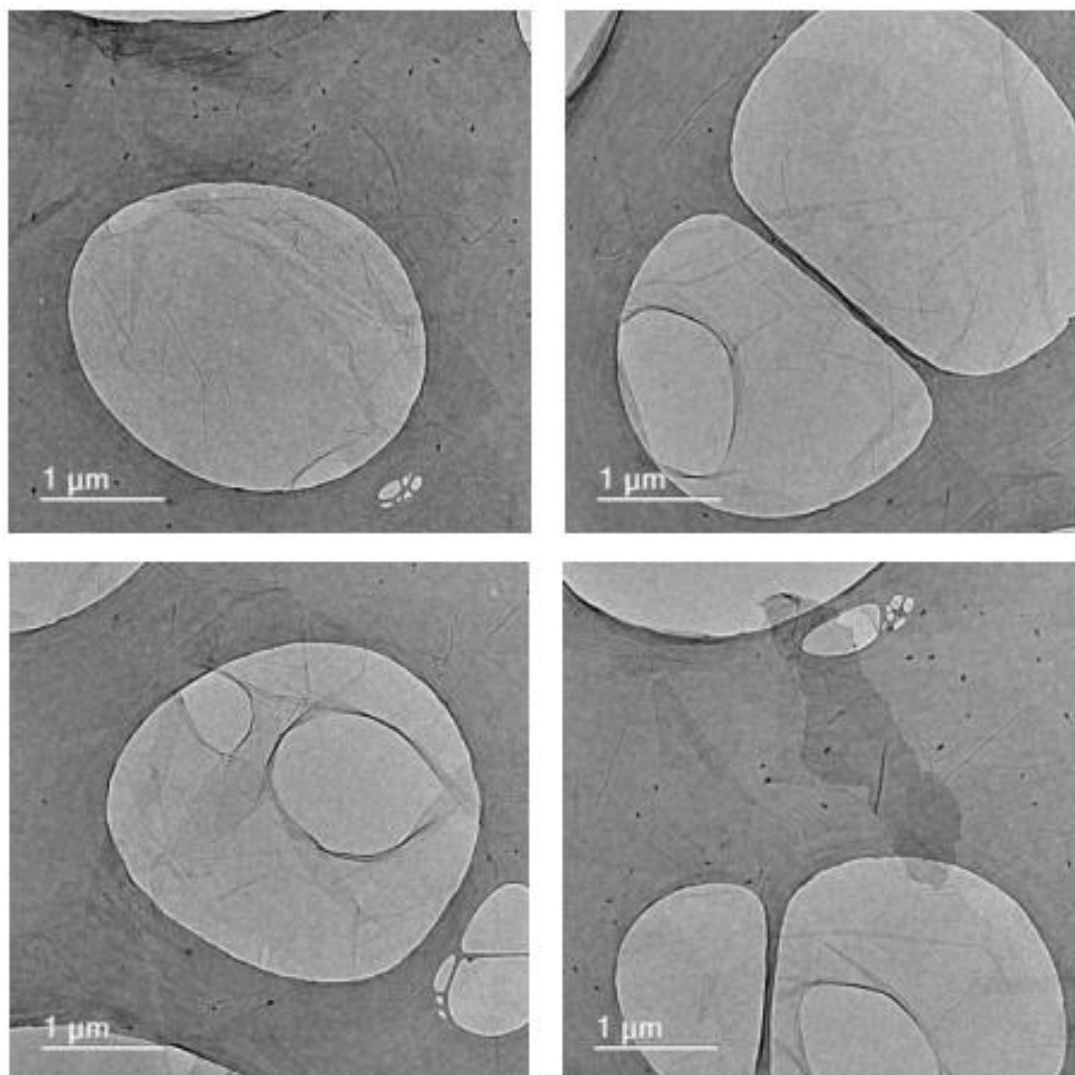
Fonte: NanoView Nanotecnologia, 2023.

A análise do OG por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier é apresentada na Figura 17. Por meio da Figura 17, notou-se a presença de bandas nas regiões de aproximadamente 3500 a 2900 cm^{-1} , que são características de grupos oxigenados como hidroxila (OH). Já na região entre 1800 e 1500 cm^{-1} , foi possível observar bandas referentes aos grupos de carbonila (C=O). Por último, na região entre 1400 e 1000 cm^{-1} , encontra-se as bandas relacionadas a possíveis grupos epóxi (C-O).

Fica evidente na Figura 17 a introdução dos novos grupos funcionais, confirmando a ocorrência do processo de oxidação, e a grande intensidade da banda tocante à ligação OH sugere a presença de umidade na amostra do material (PEREIRA, 2019; ALMEIDA, SANTOS e EDWARDS, 2021).

O fabricante do OG também forneceu as imagens obtidas a partir do ensaio de Microscopia Eletrônica de Transmissão. O resultado é apresentado na Figura 18 e mostra a estrutura de múltiplas camadas do OG.

Figura 18: Microscopia eletrônica de transmissão do OG.



Fonte: NanoView Nanotecnologia, 2023.

3.1.3. Agregado miúdo

A areia utilizada para a fabricação das argamassas, com e sem OG, é conhecida como “areia normal brasileira” e foi obtida no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de acordo com a NBR 7214 (ABNT, 2015). Esta areia é padrão para utilização em laboratórios para ensaios de resistência à compressão, conforme

exigido pela NBR 7215 (ABNT, 2019). A granulometria da areia normal brasileira deve se enquadrar nas faixas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Distribuição granulométrica da areia normal brasileira.

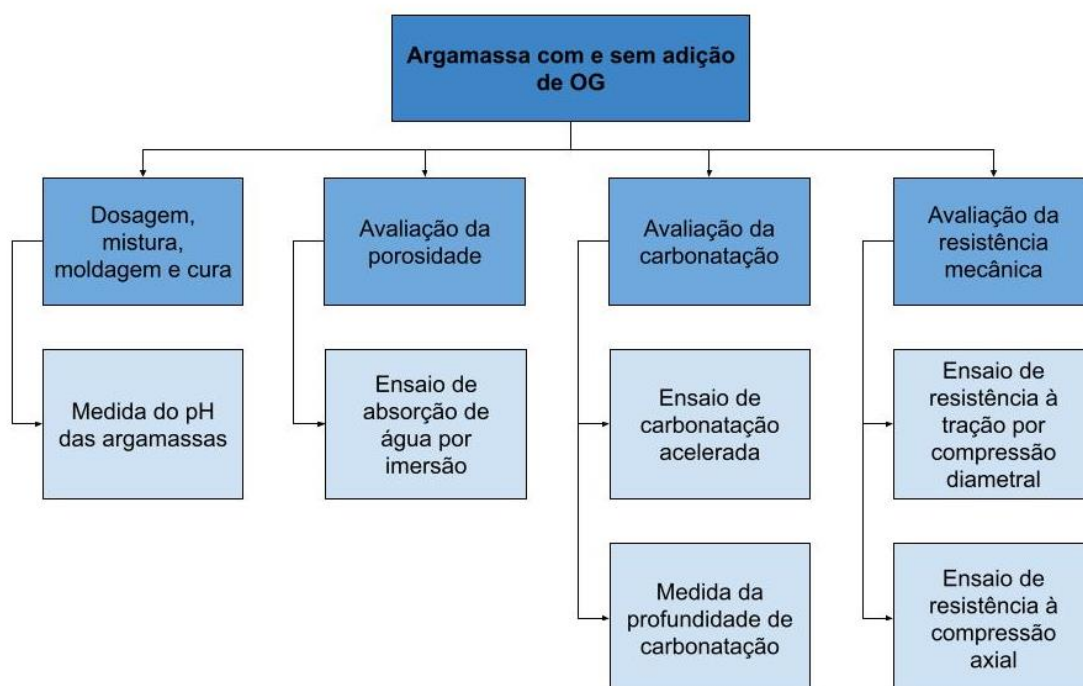
Material retido entre as peneiras de abertura nominal de	Denominação
2,4 mm e 1,2 mm	Grossa
1,2 mm e 0,6 mm	Média grossa
0,6 mm e 0,3 mm	Média fina
0,3 mm e 0,15 mm	Fina

Fonte: NBR 7214 (ABNT, 2015).

3.2. MÉTODOS

Os métodos desenvolvidos nesta pesquisa são descritos a seguir. A Figura 19 apresenta um resumo dos principais procedimentos que foram realizados.

Figura 19: Fluxograma dos métodos desenvolvidos.



Fonte: A própria autora, 2023.

3.2.1. Dosagem das argamassas

Os teores de OG utilizados neste estudo foram: 0%, 0,03% e 0,05% em relação à massa de cimento, visto que, de acordo com Chintalapudi e Pannem (2020), a adição de OG em teores acima de 0,03% pode promover modificações nas propriedades dos materiais cimentícios. Ademais, alguns estudos (LV *et al.*, 2017; DEVI e KHAN, 2020; SANTOS, 2022; TATIENI e PUTTA, 2022; VERÇOSA, 2022) mostram que as adições de OG nos teores de 0,03% e 0,05% apresentam resultados satisfatórios em relação às propriedades mecânicas e de durabilidade dos compósitos cimentícios. O traço utilizado para a produção das argamassas, com relação a/c de 0,48, é indicado pela NBR 7215 (ABNT, 2019) e o uso de aditivos plastificantes foi evitado com o intuito de minimizar o número de variáveis que podem influenciar o resultado final.

Com isso, foram moldados três traços diferentes de argamassa, sendo: um traço de referência (REF) sem adição de OG, ou seja, com 0% de OG; um traço com adição de 0,03% de OG em relação à massa de cimento (0,03%OG); e um traço com adição de 0,05% de OG em relação à massa de cimento (0,05%OG). Devido ao OG estar disperso em uma solução aquosa, parte da quantidade de água determinada para cada traço de argamassa foi substituída pelo volume de solução aquosa de OG adicionada, mantendo a quantidade de água determinada em todas as misturas para que não houvesse excesso de água.

As dosagens das argamassas que foram fabricadas neste trabalho estão descritas a seguir, na Tabela 5.

Tabela 5: Dosagens das argamassas.

Identificação	Cimento (g)	Areia normal (g)	Solução com 5,0 g/L de OG (mL)	Água (g)
REF	624	1872	0	300
0,03%OG	624	1872	37,44	262,56
0,05%OG	624	1872	62,40	236,60

Fonte: A própria autora, 2023.

3.2.2. Mistura, moldagem e cura

Inicialmente, as argamassas foram fabricadas conforme o que está descrito na NBR 7215 (ABNT, 2019), com traço 1:3 (uma parte de cimento para três de areia) e relação água cimento de 0,48. O cimento utilizado foi o CP V-ARI, a areia utilizada foi a “areia normal brasileira” e os teores de OG adicionados foram de 0,03% e 0,05% em relação à massa de cimento.

Os materiais foram colocados na seguinte ordem: água, solução de óxido de grafeno, cimento e areia. A elaboração das argamassas aconteceu de acordo com os passos descritos a seguir:

- Inicialmente a quantidade necessária de água para cada traço foi colocada na cuba da argamassadeira da marca Pavitest com capacidade de 5 litros. Logo depois, foi adicionada a solução de 5,0 g/L de óxido de grafeno na quantidade especificada para cada traço;
- O cimento foi inserido de maneira gradual durante 30 segundos, ao mesmo tempo em que a argamassadeira trabalhava com o misturador na velocidade baixa;
- Após o cimento, a areia foi adicionada sem que a operação parasse, no período de 30 segundos;
- Quando a areia foi totalmente adicionada, todos os materiais foram misturados na cuba durante 30 segundos na velocidade alta. Em seguida, desligou-se o misturador por 90 segundos. Nos 30 segundos iniciais, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba foi retirada com auxílio de uma espátula metálica, nos 60 segundos restantes a argamassa ficou em repouso na cuba.
- Posteriormente, para finalizar o processo de fabricação das argamassas, o misturador foi ligado novamente, em velocidade alta, por mais 60 segundos.

Imediatamente após a realização das misturas dos traços de argamassas, os corpos de prova foram moldados. A moldagem foi realizada de acordo com o estabelecido pela NBR 7215 (ABNT, 2019).

Colocou-se as argamassas em moldes cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, com o interior revestido por óleo para impedir a aderência entre o molde e o material. A colocação da argamassa nos moldes cilíndricos foi realizada em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais e cada camada foi adensada com 30 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos com soquete padrão. Após o

adensamento da última camada, um excesso de argamassa foi deixado acima da borda do molde cilíndrico para que o arrasamento do corpo de prova fosse feito, com o auxílio de uma espátula metálica, deixando a superfície nivelada.

No total foram moldados 60 corpos de prova, sendo 20 corpos de provas para cada traço. Para o ensaio de absorção de água por imersão, utilizou-se 4 corpos de prova de cada traço. Dos 16 corpos de prova restantes de cada traço, 8 foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada e, após 28 dias expostos na câmara de carbonatação, rompeu-se 4 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão axial e 4 corpos de prova para ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Os outros 8 corpos de prova, não foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada e permaneceram em ambiente de laboratório pelo período em que o ensaio de carbonatação acelerada foi desenvolvido (28 dias), após este período também foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, sendo 4 corpos de prova para cada ensaio de resistência mecânica.

O procedimento de cura dos corpos de prova foi realizado seguindo o que foi definido pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Após a moldagem, os corpos de prova ainda dentro dos moldes foram conservados em ambiente de laboratório por 24 horas com a face superior protegida. Depois das 24 horas de cura inicial, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e colocados no tanque de cura, onde ficaram imersos em água saturada de cal e permaneceram até o momento de realização dos ensaios.

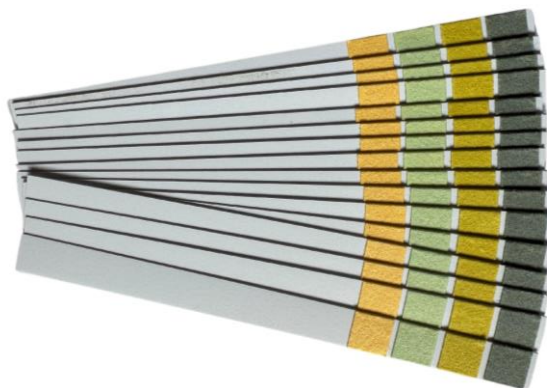
3.2.3. Medida do pH das argamassas

Nesta pesquisa realizou-se a medição do potencial hidrogeniônico (pH) das argamassas com e sem adição de OG, conforme método indicado por Polito (2013) e Araújo (2019), com o intuito de verificar se o nanomaterial interfere drasticamente na alcalinidade da mistura.

Sendo assim, para realizar tal medição utilizou-se a fita de pH, que é considerada um indicador universal (Figura 20). As fitas de pH consistem em pequenas tiras de papel compostas por diversos indicadores que, quando emergidas em uma substância de pH desconhecido, modificam sua coloração para a cor que

indica o seu pH. Com o auxílio de uma tabela de cores correspondente aos diversos valores de pH na escala de 0 a 14, é possível realizar a comparação das cores obtidas nas fitas de pH emergidas na substância e mensurar o valor do seu pH.

Figura 20: Fitas indicadoras utilizadas para medir o pH das argamassas.



Fonte: A própria autora, 2023.

Figura 21: Medição do pH das argamassas com fita indicadora de pH.



Fonte: A própria autora, 2023.

A medição foi realizada nas argamassas com teores de incorporação de 0%, 0,03% e 0,05% de OG, em relação à massa de cimento. Após a produção das argamassas, de acordo com o explicitado no item 3.2.2, com os determinados teores

de OG, a fita indicadora de pH foi colocada na superfície da mistura durante 5 segundos (Figura 21) e logo depois foi retirada da superfície do material e comparada com a tabela de cores (Figura 22). Realizou-se a medição do pH na mistura de argamassa nos intervalos de tempo de 0, 15, 30, 45 e 60 minutos após sua preparação.

Figura 22: Comparação das fitas indicadoras de pH com a tabela de cores fornecida pelo fabricante.



Fonte: A própria autora, 2023.

Este procedimento é amplamente utilizado para verificações rápidas e pontuais, mas não é possível obter valores totalmente precisos para o nível de pH. No entanto, como o objetivo é identificar a ocorrência de variações drásticas no valor de pH das misturas, o método é considerado suficiente.

3.2.4. Absorção de água por imersão

A obtenção da absorção de água por imersão foi realizada de acordo com o que está explicitado na NBR 9778 (ABNT, 2005). Foram produzidos 4 corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para cada traço, que foram ensaiados logo após o período de 35 dias de cura submersa, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019).

Os processos descritos abaixo foram realizados para o desenvolvimento do ensaio:

- Após o período de cura, os corpos de prova foram mantidos em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C até que sua massa permanecesse constante. Com a massa constante, realizou-se a pesagem do corpo de prova e sua massa foi registrada (m_s);
- Após a secagem, os corpos de prova foram imersos totalmente em água à temperatura de 23 ± 2 °C e mantidos nessa condição até que sua massa permanecesse constante;
- Por fim, a amostra foi retirada da água, enxugada com um pano úmido e em seguida registrou-se sua massa (m_{sat}).

Desta forma, calculou-se a absorção de água por imersão das argamassas conforme a Equação 6 abaixo.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

- m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão (g);
- m_s = massa da amostra seca em estufa (g).

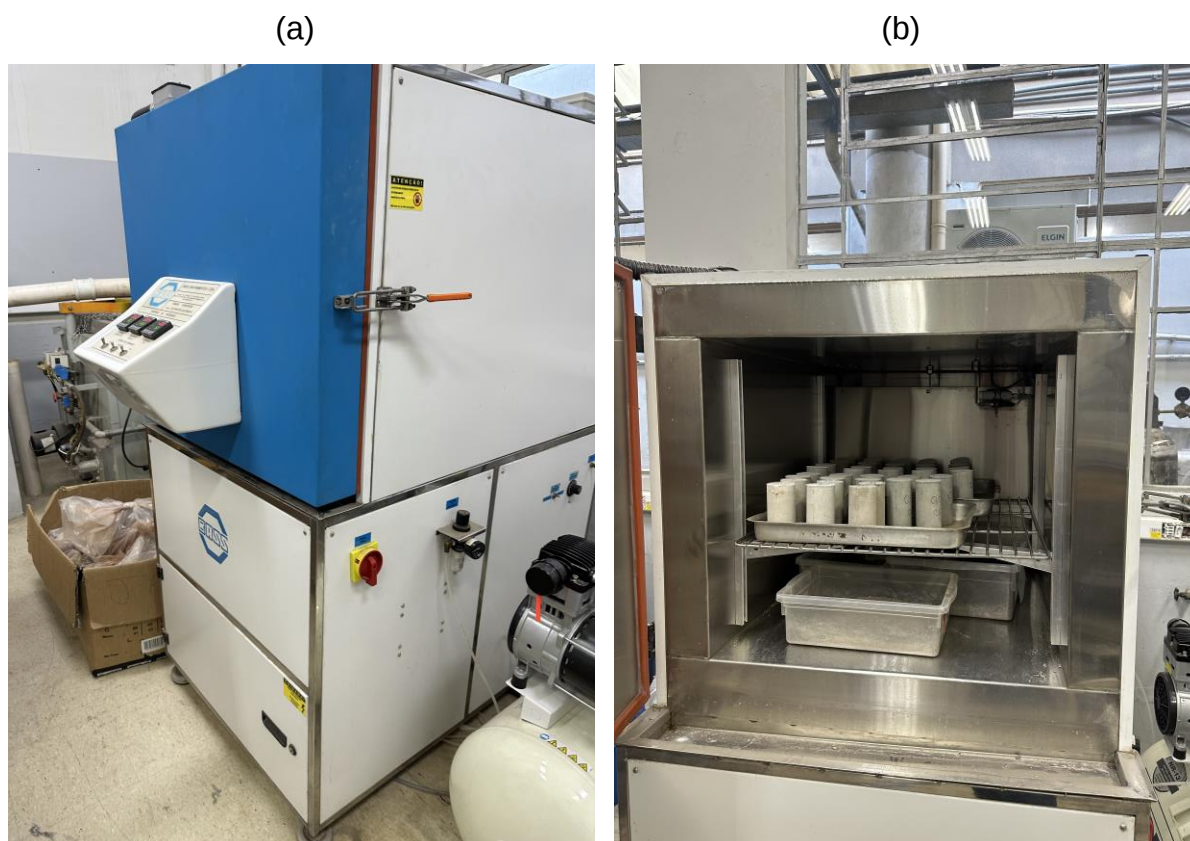
3.2.5. Ensaio de carbonatação acelerada

No total, 8 corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, para cada traço de argamassa, foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada após 35 dias de cura submersa.

Após o período de cura, os corpos de prova de argamassa passaram por uma etapa de sazonalamento, na qual ficaram expostos em ambiente de laboratório por 24 horas até serem inseridos na câmara de carbonatação, com base no que foi realizado no estudo de Ladeira (2017), buscando diminuir o teor de umidade das amostras que se encontravam saturadas devido à cura submersa. Para a realização do ensaio de carbonatação acelerada, utilizou-se a câmara climatizada, da marca Bass, disponível no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais do CEFET – MG. A mesma foi configurada com concentração de CO₂ de $5,0 \pm 0,1\%$, umidade relativa de $65 \pm 1\%$

e temperatura de 30 ± 2 °C. Os valores determinados para os parâmetros da câmara de carbonatação foram propostos e adotados por diversos pesquisadores (PAPADAKIS *et al.* 1992; MONTEIRO, 1996; ROY *et al.*, 1996; SANJUÁN e OLMO, 2001; PAULETTI, 2004; LONG *et al.*, 2018; SANTOS, 2022).

Figura 23: (a) Câmara climatizada utilizada para a realização do ensaio de carbonatação acelerada e (b) amostras de argamassas acondicionadas para o ensaio de carbonatação acelerada.



Fonte: A própria autora, 2023.

Depois de 28 dias na câmara de carbonatação, retirou-se as amostras de argamassas e as mesmas foram submetidas aos ensaios de resistência mecânica. Em seguida, nas amostras rompidas pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral, realizou-se a aspersão de fenolftaleína nas faces das amostras com o intuito de aferir a frente de carbonatação (Figura 24), seguindo o que é indicado pelo documento CPC-18 (RILEM, 1988).

Figura 24: Amostra de argamassa rompida pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral (a) antes e (b) depois da aspersão de fenolftaleína.

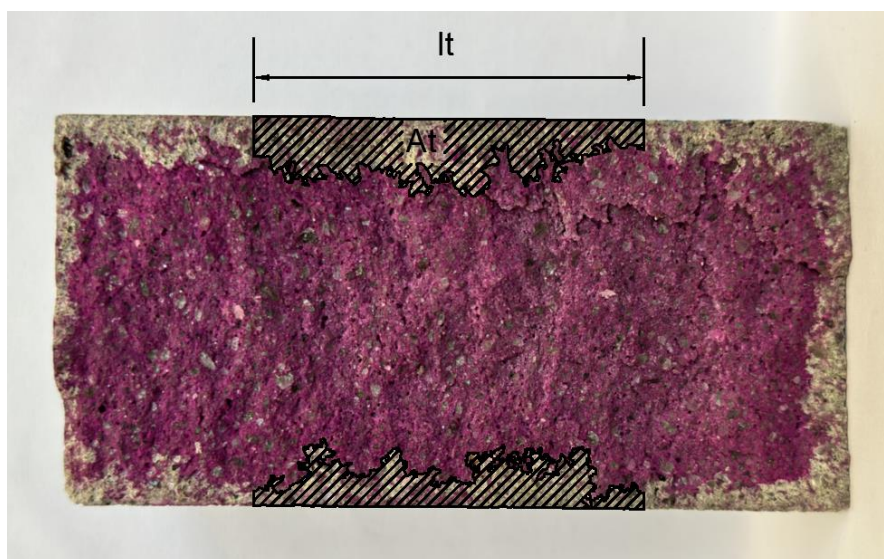


Fonte: A própria autora, 2023.

Cerca de 12 horas após a aspersão de fenolftaleína, com as amostras secas, foram tiradas fotografias para a medição da área carbonatada. O método utilizado para a medição foi o mesmo realizado por Hoppe Filho (2008) e Ladeira (2017). As fotografias foram inseridas no programa AutoCad e as escalas foram ajustadas para o tamanho real, com isso foi possível delimitar e determinar a área incolor que indica a área carbonatada. Dividiu-se a área total da área incolor (A_t) pelo comprimento da mesma (l_t), deste modo obteve-se a profundidade média de penetração da carbonatação (l_c).

As medidas da profundidade de carbonatação foram realizadas nos 5 cm centrais dos CPs com o intuito de excluir qualquer efeito de frentes de carbonatação das extremidades dos CPs (Figura 25). De acordo com Ladeira (2017), este método garante uma medida confiável da profundidade de carbonatação dos corpos de prova.

Figura 25: Delimitação da área carbonatada para medida da profundidade de carbonatação.



Fonte: A própria autora, 2023.

3.2.6. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Realizou-se o ensaio de resistência à tração por compressão diametral seguindo o que está disposto na NBR 7222 (ABNT, 2011). Foram ensaiados 8 corpos de prova cilíndricos de cada traço de argamassa. Após a cura submersa de 35 dias e 24 horas de sazramento, 4 corpos de prova foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada durante 28 dias e em seguida foram rompidos pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Os outros 4 corpos de prova permaneceram em ambiente de laboratório por 28 dias após a cura submersa e sazramento, quando também foram rompidos pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Para isso, foi utilizada a Máquina Universal de Ensaio Eletromecânica da marca EMIC, modelo DL-30.000, com capacidade igual a 300 kN, disponível no Laboratório de Engenharia Civil do CEFET – MG.

Considerando que pequenas diferenças nas medidas dos corpos de prova podem influenciar no cálculo da tensão admissível, o diâmetro foi determinado pela média entre duas medições, com exatidão de 0,1 mm, e a altura também foi determinada pelo mesmo método.

Para garantir a uniforme distribuição de tensões, colocou-se os corpos de prova horizontalmente em um molde de aço, que permite a centralização, uniformização e transferência adequada da carga ao corpo de prova ensaiado (Figura 26). Após o início do ensaio, a carga foi aplicada continuamente com um acréscimo constante de tração igual a 0,05 MPa/segundo, até que o corpo de prova rompesse.

A partir dos resultados obtidos pelo ensaio, realizou-se o cálculo da resistência à tração por compressão diametral (F_t) a partir da Equação 7, estabelecida pela NBR 7222 (ABNT, 2011).

$$F_t = \frac{2F_{m\acute{a}x}}{\pi ld} \quad (7)$$

Sendo:

- F_t = resistência à tração por compressão diametral (MPa);
- $F_{m\acute{a}x}$ = força máxima suportada pelo corpo de prova;
- l = comprimento do corpo de prova (mm);
- d = diâmetro do corpo de prova (mm);

Figura 26: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado nas amostras de argamassas.



Fonte: A própria autora, 2023.

3.2.7. Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado conforme o que preconiza a NBR 7215 (ABNT, 2019). Para cada traço de argamassa foram ensaiados 8 corpos de prova cilíndricos. Do total, 4 corpos de prova foram submetidos ao ensaio após 35 dias de cura submersa, 24 h de sazonalização e 28 dias expostos ao ensaio de carbonatação acelerada. Os outros 4 corpos de prova foram submetidos ao ensaio após permanecerem 28 dias em ambiente de laboratório, sem carbonatação acelerada, depois do período de cura submersa e sazonalização. Utilizou-se a mesma Máquina Universal de Ensaio Eletromecânica do ensaio anteriormente descrito, da marca EMIC, modelo DL-30.000 com capacidade de 300 kN, disponível no Laboratório de Engenharia Civil do CEFET – MG.

Os corpos de prova foram posicionados verticalmente no prato inferior da prensa, em seguida ajustou-se o prato superior de modo que o mesmo ficasse o mais próximo possível da amostra, porém sem encostá-la para que o corpo de prova não sofresse tensões até o ensaio ser iniciado. Com o início do ensaio, aplicou-se uma carga contínua com acréscimo de 0,20 MPa/segundo até o rompimento do corpo de prova (Figura 27).

Com os resultados obtidos a partir do ensaio, foi possível calcular a resistência à tração dos corpos de prova pela Equação 8, contida na NBR 7215 (ABNT, 2019).

$$F_{cj} = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (8)$$

Em que:

- F_{cj} = resistência à compressão axial (MPa);
- F = carga de ruptura do corpo de prova (N);
- D = diâmetro médio do corpo de prova (mm);

Figura 27: Ensaio de resistência à compressão axial realizado nas amostras de argamassas.



Fonte: A própria autora, 2023.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir serão apresentados e analisados os resultados obtidos neste estudo.

4.1. MEDIDA DO PH DAS ARGAMASSAS

Os resultados obtidos para o pH das argamassas REF, 0,03%OG e 0,05%OG, a partir das medições realizadas com as fitas indicadoras de pH, em cinco tempos diferentes após o início de sua preparação, são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: pH das argamassas com e sem adição de OG.

Traços	Tempo de medição (min)				
	0	15	30	45	60
REF	11	11	11	11	11
0,03%OG	11	11	11	11	11
0,05%OG	11	11	11	11	11

Fonte: A própria autora, 2023.

Observa-se que a incorporação de OG não gerou mudanças significativas no pH das argamassas. De acordo com Verçosa (2022), este resultado está relacionado com a adição de OG em volume reduzido nas argamassas, sendo assim, apesar de possuir acidez, o OG não promove redução notável no pH das misturas. Com isso, não houve a necessidade de ajustar o pH da solução de OG utilizada.

4.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

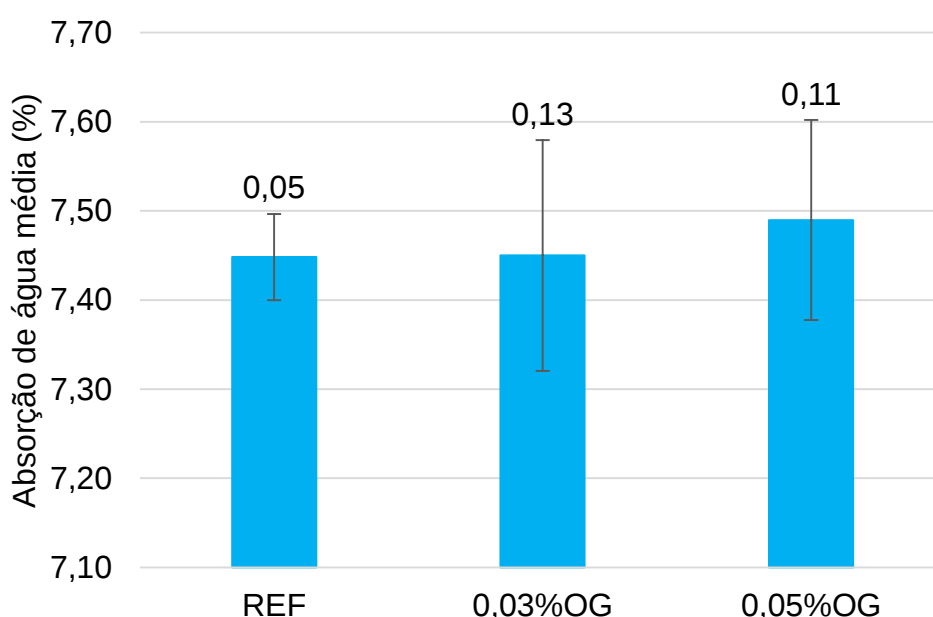
Na Tabela 7 e na Figura 28, estão representados os resultados obtidos para absorção de água por imersão para as argamassas com adição de 0%, 0,03% e 0,05% de OG.

Tabela 7: Absorção de água média das argamassas estudadas.

Parâmetros	Traços		
	REF	0,03%OG	0,05%OG
Absorção de água média (%)	7,45	7,45	7,49
Desvio Padrão (%)	0,05	0,13	0,11
Diferença em relação à referência (%)	-	0,00%	+0,56%

Fonte: A própria autora, 2023.

Figura 28: Absorção de água média das argamassas estudadas.



Fonte: A própria autora, 2023.

A partir dos resultados notou-se que a adição de 0,05% de OG na argamassa apresentou um pequeno aumento na absorção de água quando comparada à argamassa de referência. No entanto, por meio de uma análise estatística realizada (teste de t-Student com nível de confiança de 95%) com as médias das amostras, foi possível observar que não houve diferença significativa entre as médias. Este resultado pode estar relacionado à uma quantidade insuficiente de OG adicionado às argamassas, evitando a formação de pontos de nucleação que preencham os poros da matriz cimentícia. O resultado obtido também pode estar atrelado à uma distribuição não uniforme do OG na matriz cimentícia, ocasionando aglomerações que

dificultam o preenchimento dos poros, deixando-os vazios, e, desta forma, influenciando a absorção de água das argamassas. Sendo assim, a incorporação de teores maiores de OG e a aplicação de diferentes métodos de dispersão do OG nas argamassas podem promover resultados mais expressivos em relação à absorção de água.

Roy *et al.* (2018) explicitam que a adição de OG pode promover a formação de pontos de nucleação que diminuem os poros da matriz cimentícia, reduzindo sua capacidade de absorção de água. No entanto, Carneiro, Poggiali e Ludvig (2022) sugerem que parece haver uma quantidade ideal de OG a ser adicionada em compósitos cimentícios para que o nanomaterial possa atuar como agente de nucleação para os produtos de hidratação, formando grandes cristais semelhantes a flores que preencham os poros maiores, transformando-os em poros menores, afetando diretamente a absorção de água dos compósitos cimentícios.

A dispersão não uniforme do OG pode ser observada no estudo realizado por Lv *et al.* (2016), onde os autores investigaram a dispersão de OG em pastas de cimento. Imagens obtidas e analisadas pelos autores em microscópio eletrônico de varredura, mostraram que a adição de 0,03% de OG leva à formação de cristais semelhantes a flores cada vez maiores. Contudo, a adição de OG no teor de 0,04% provoca a aglomeração das folhas no nanomaterial, que assume a forma de cristais poliédricos. Já para a adição de 0,05% de OG, os resultados indicaram um grande número de cristais poliédricos, sugerindo uma distribuição não uniforme.

4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de compressão foram realizados conforme descrito na metodologia deste trabalho e os resultados obtidos a partir deles encontram-se no Apêndice C. A Tabela 8, a Tabela 9 e a Figura 29 apresentam os resultados de maneira resumida.

Tabela 8: Resistência à compressão das argamassas após 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

Parâmetros	Traços		
	REF	0,03%OG	0,05%OG
Resistência à compressão axial média (MPa)	51,20	50,40	51,34
Desvio Padrão (MPa)	2,38	1,57	1,38
Diferença em relação à referência (%)	-	-1,56%	+0,27%

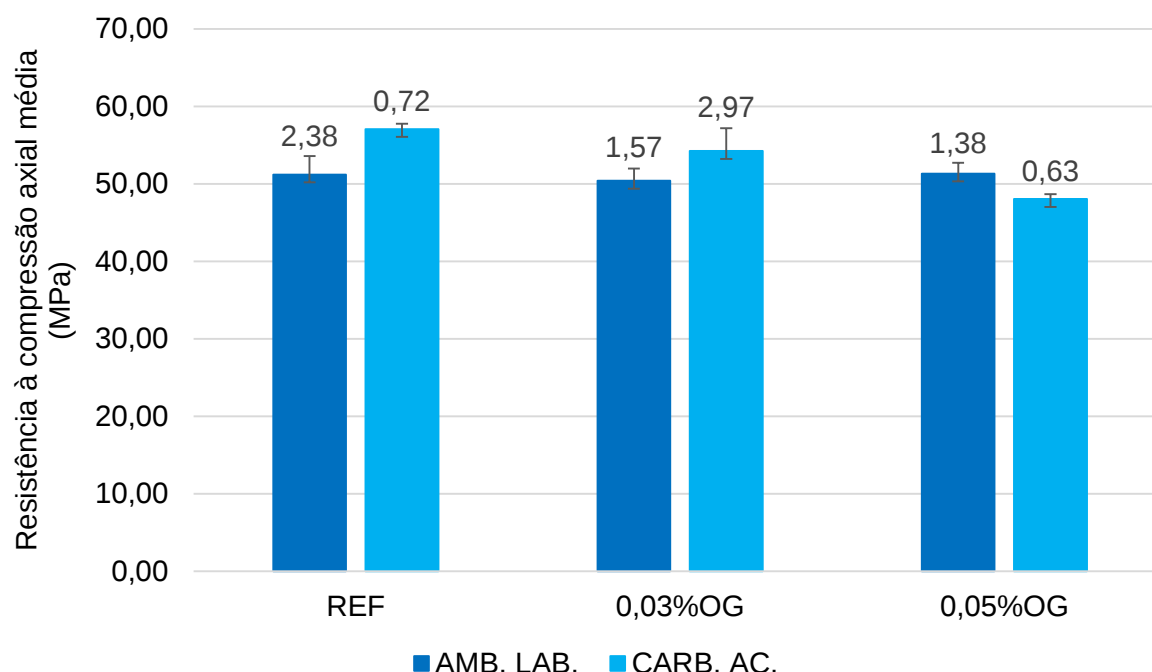
Fonte: A própria autora, 2023.

Tabela 9: Resistência à compressão das argamassas após 28 dias de carbonatação acelerada.

Parâmetros	Traços		
	REF	0,03%OG	0,05%OG
Resistência à compressão axial média (MPa)	57,06	54,24	48,04
Desvio Padrão (MPa)	0,72	2,97	0,63
Diferença em relação à referência (%)	-	-4,95%	-15,81%
Diferença em relação às amostras carbonatadas em ambiente de laboratório (%)	+11,45%	+7,62%	-6,87%

Fonte: A própria autora, 2023.

Figura 29: Resistência à compressão das argamassas estudadas, após carbonatação em ambiente de laboratório e carbonatação acelerada.



Fonte: A própria autora, 2023.

A Tabela 8 traz os resultados alcançados a partir da carbonatação das amostras durante 28 dias em ambiente de laboratório. Por meio de uma análise estatística (teste de t-Student) com nível de confiança de 95%, para verificação de diferenças entre as médias, notou-se que a adição de OG não interferiu significativamente na resistência à compressão das argamassas. Este resultado está relacionado ao resultados obtidos por meio do ensaio de absorção de água. Como não houve diferença significativa entre os valores de absorção de água das argamassas com e sem adição de OG, era esperado que a resistência à compressão axial das argamassas não apresentasse variações expressivas.

Na Tabela 9 foram mostrados os resultados encontrados a partir da carbonatação das amostras durante 28 dias de carbonatação acelerada. Foi possível observar que a resistência à compressão das argamassas diminuiu com o aumento do teor de OG. O estudo estatístico realizado através do teste de t-Student, com nível de confiança de 95%, aponta que a diminuição na resistência causada pela adição de 0,03% de OG não foi significativa. Entretanto, a adição de 0,05% de OG reduziu significativamente a resistência à compressão da argamassa em 15,81% e 11,43%

quando comparada à referência e à argamassa com adição de 0,03% de OG, respectivamente. Em um panorama geral, notou-se que, estatisticamente, a argamassa 0,03%OG apresentou desempenho igual à argamassa REF.

Para Verçosa (2022), a tendência de uma discreta redução na resistência à compressão pode estar relacionada à adsorção de parte da água livre pela superfície do OG, que contém grande quantidade de grupos funcionais hidrofílicos, deixando menos água livre e ocasionando maior dificuldade para o escape de bolhas de ar incorporadas na mistura. Verçosa (2022) também atribui esse resultado a uma dispersão ineficiente do OG na matriz, em que o efeito de adsorção prejudicaria a hidratação do cimento causando a diminuição da resistência das amostras.

A Tabela 9 e a Figura 29 evidenciam a diferença entre as resistências à compressão obtidas para cada traço de argamassa em relação à carbonatação em ambiente de laboratório e à carbonatação acelerada. A análise estatística realizada indica que as amostras de argamassa de referência submetidas à carbonatação acelerada apresentaram resistência à compressão significativamente maior quando comparadas às amostras carbonatadas em ambiente de laboratório, sendo que o aumento na resistência à compressão de uma para a outra foi de aproximadamente 11,45%. O mesmo ocorre para as amostras com adição de 0,03% de OG submetidas à carbonatação acelerada, que também apresentaram um aumento de aproximadamente 7,62% na resistência à compressão em relação às amostras carbonatadas em ambiente de laboratório com o mesmo teor de OG, no entanto, o teste de t-Student realizado demonstra que esta diferença não foi significativa. Já as argamassas com adição de 0,05% de OG revelaram um comportamento diferente dos traços anteriores, visto que as amostras com esse teor submetidas à carbonatação acelerada apresentaram resistência à compressão cerca de 6,87% menor do que as amostras carbonatadas em ambiente de laboratório, a análise estatística realizada com nível de confiança de 95% indica que a diminuição da resistência foi significativa.

Silva (2002) e Fan *et al.* (2023) atribuem o aumento da resistência à compressão após exposição ao meio ambiente agressivo à reação química ocorrida no processo de carbonatação. Os autores denotam que a reação de carbonatação promove a formação de partículas de CaCO_3 que preenchem os poros da matriz cimentícia, deixando-a mais compacta e consequentemente mais resistente.

Scheeren (2020) associa a diminuição da resistência à compressão axial à retração do material que ocorre durante o processo de carbonatação acelerada, ocasionada pela reação entre os compostos da matriz cimentícia hidratada, em especial a portlandita, que pode provocar a formação de microfissuras na superfície carbonatada e afetar a resistência à compressão axial do compósito cimentício.

4.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram desenvolvidos de acordo com a metodologia do presente trabalho. Os resultados obtidos estão no Apêndice I e se encontram resumidos na Tabela 10, na Tabela 11 e na Figura 30.

Tabela 10: Resistência à tração das argamassas após 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

Parâmetros	Traços		
	REF	0,03%OG	0,05%OG
Resistência à tração por compressão diametral média (MPa)	5,29	5,21	4,91
Desvio Padrão (MPa)	0,11	0,20	0,38
Diferença em relação à referência (%)	-	-1,51%	-7,18%

Fonte: A própria autora, 2023.

Tabela 11: Resistência à tração das argamassas após 28 dias de carbonatação acelerada.

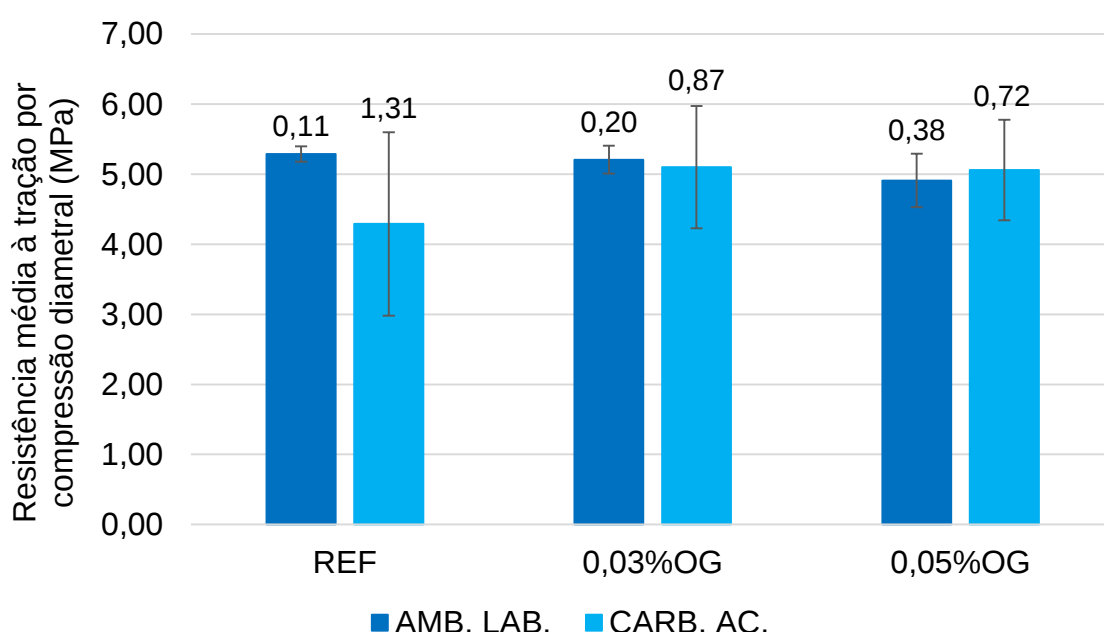
Parâmetros	Traços		
	REF	0,03%OG	0,05%OG
Resistência à compressão axial média (MPa)	4,29	5,10	5,06
Desvio Padrão (MPa)	1,31	0,87	0,72
Diferença em relação à referência (%)	-	+18,88%	+17,95%

Continua

Parâmetros	Traços		
	REF	0,03%OG	0,05%OG
Diferença em relação às amostras carbonatadas em ambiente de laboratório (%)	-18,90%	-2,11%	+3,05%

Fonte: A própria autora, 2023.

Figura 30: Resistência à tração das argamassas estudadas, após carbonatação em ambiente de laboratório e carbonatação acelerada.



Fonte: A própria autora, 2023.

A Tabela 10 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral alcançados para as argamassas de referência e com adição de 0,03% e 0,05% de OG, após 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório. A partir dela, foi possível observar que as argamassas com adição de OG apresentaram um pequeno decréscimo na resistência à tração, sendo que a argamassa 0,03%OG reduziu a resistência cerca de 1,51% e a argamassa 0,05%OG reduziu a resistência cerca de 7,18%. Contudo, o estudo estatístico (realizado por meio do teste de t-Student com nível de confiança de 95%) indica que a diferença entre as médias de

resistência à tração por compressão diametral, para as argamassas carbonatadas em ambiente de laboratório, não é significativa.

Verçosa (2023) analisou a resistência à tração por compressão diametral de argamassas de reparo estrutural não carbonatadas com adição de 0%, 0,03% e 0,1% de OG. A autora verificou que as argamassas com adição de 0,1% de OG também apresentaram uma queda na resistência à tração quando comparadas à argamassa de referência. Verçosa (2023) ressalta que o decréscimo da resistência à tração pode ser consequência da pequena amostragem utilizada, uma vez que foi utilizado o cimento CP V-ARI (o mesmo utilizado nesta pesquisa), que promove ganho progressivo de resistência, para fabricação das argamassas. Ademais, Verçosa (2023) ainda salienta que a redução de resistência pode estar relacionada a um possível efeito de retenção de água por parte do OG. A autora explicita que o efeito hidrofílico do OG pode ser prejudicial à moldagem dos CPs, causando segregação e ar incorporado, bem como uma distribuição heterogênea deste nanomaterial na matriz cimentícia acarretaria uma hidratação deficiente do cimento nos pontos em que o OG se concentra.

O resultados de resistência à tração por compressão diametral das argamassas submetidas à carbonatação acelerada durante 28 dias são mostrados na Tabela 11. Neste caso, verificou-se que as argamassas com adição de 0,03% e 0,05% de OG ganharam resistência quando comparadas as amostras de referência. Os acréscimos na resistência à tração por compressão diametral, em relação à referência, foram de 18,88% e 17,95% para as argamassas com adição de 0,03% e 0,05% de OG, respectivamente. A análise estatística realizada com o teste de t-Student e nível de confiança de 95%, denota que o ganho de resistência à tração das argamassas com OG em relação à referência, para as amostras submetidas à carbonatação acelerada, não foi significativo.

Verçosa (2023) atingiu resultados parecidos com os deste estudo, visto que, nas amostras carbonatadas, as argamassas com adição de 0,03% e 0,1% de OG apresentaram um ganho na resistência à tração quando comparadas às amostras de controle. Para a autora, a adição de OG tem seus efeitos mais significativos na resistência à tração, considerando que a grande área superficial das folhas de OG e sua boa resistência à tração, além do efeito fíler, contribuem com o aumento da resistência à tração reduzindo a propagação de fissuras. Verçosa (2023) destaca que

as argamassas carbonatadas com OG podem ter se tornado mais resistentes à tração em função das pontes de transferência de tensões entre microfissuras, que levam ao reforço do C-S-H. A autora comenta que a redução na porosidade das amostras, ocasionada pelas reações de carbonatação, aumenta a quantidade de pontes de transferência e evidencia o efeito positivo do OG nos compósitos cimentícios.

4.5. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

As profundidades de carbonatação foram medidas em 4 amostras de cada traço de argamassa (REF, 0,03%OG, 0,05%OG), que foram submetidas à carbonatação durante 28 dias em ambiente de laboratório e durante 28 dias em condições aceleradas. As fotografias das amostras após a aspersão de fenolftaleína encontram-se no Apêndice O, bem como os resultados obtidos após medição da profundidade de carbonatação. A influência do OG na profundidade de carbonatação foi analisada apenas para as amostras submetidas à carbonatação acelerada, visto que as amostras carbonatadas em ambiente de laboratório não evidenciaram profundidade de carbonatação ao longo dos 5 cm centrais dos CPs após os 28 dias de ensaio.

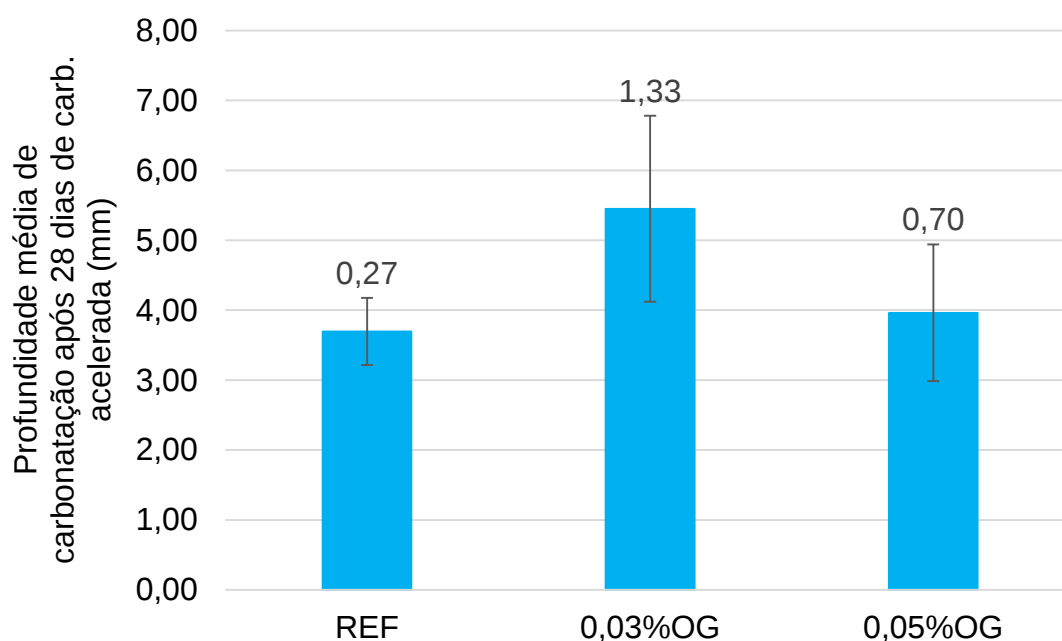
A Tabela 12 e Figura 31 trazem a síntese dos resultados obtidos para profundidade de carbonatação das argamassas e o coeficiente de carbonatação K ($\text{mm}/\sqrt{\text{ano}}$), calculado de acordo com a Equação 5.

Tabela 12: Profundidade de carbonatação das argamassas após 28 dias de carbonatação acelerada.

Parâmetros	Traços		
	REF	0,03%OG	0,05%OG
Profundidade média de carbonatação (mm)	3,64	5,45	3,70
Coeficiente de carbonatação ($\text{mm}/\text{ano}^{0,5}$)	13,15	19,68	13,36
Desvio Padrão (mm)	0,27	1,33	0,70
Diferença em relação à referência (%)	-	+49,73%	+1,65%

Fonte: A própria autora, 2023.

Figura 31: Profundidade de carbonatação das argamassas após 28 dias de carbonatação acelerada.



Fonte: A própria autora, 2023.

Considerando os resultados da análise estatística, realizada com o teste t-Student e nível de confiança igual a 95%, notou-se que a profundidade de carbonatação foi 49,73% maior para o traço 0,03%OG e 1,65% maior para o traço 0,05%OG em relação à referência, indicando uma maior penetração de CO₂ em suas matrizes. Analisando apenas as argamassas com OG, verificou-se que a profundidade carbonatada diminui com o aumento do teor de OG incorporado.

O valor elevado da profundidade de carbonatação das argamassas com adição de 0,03% de OG pode estar relacionado ao ganho de resistência à tração, em comparação à amostra de referência, observado nas amostras desse traço submetidas à carbonatação acelerada, pois a carbonatação promove a densificação da matriz dos compósitos cimentícios. Dessa maneira, é possível observar que, mesmo com o aumento da profundidade de carbonatação em relação à referência, a argamassa com traço 0,03%OG exibe resultados satisfatórios, uma vez que possui desempenho estatisticamente igual à referência em relação à resistência à compressão e apresenta um ganho de resistência à tração quando comparada às amostras sem adição de OG.

Pela Figura 31 percebe-se que o aumento da frente de carbonatação da argamassa com adição de 0,05% de OG, em relação à argamassa referência, não foi tão expressivo. O aumento da profundidade carbonatada dessas amostras pode ter contribuído com o ganho de resistência à tração apresentado pelas amostras desse traço submetidas à carbonatação acelerada, em comparação às amostras de referência. No entanto, apesar do pequeno aumento da profundidade carbonatada e do ganho na resistência à tração, a adição de 0,05% de OG reduziu significativamente a resistência à compressão da argamassa, quando comparada à argamassa sem adição de OG.

A penetração da frente de carbonatação está diretamente ligada à permeabilidade do material. A partir da análise dos resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por imersão, verificou-se que não há diferença significativa em relação à porosidade das argamassas estudadas. Contudo, por meio da Tabela 12 e da Figura 31, observa-se que a permeabilidade da amostra 0,03%OG é mais expressiva em relação às demais, já que apresentou maior profundidade de carbonatação. Assim, constata-se que as amostras de referência e com adição de 0,05% OG possuem comportamentos parecidos para porosidade e permeabilidade, enquanto a argamassa com adição de 0,03% de OG apresenta um comportamento diferente, demonstrando uma maior conectividade entre os poros e facilitando a entrada de agente agressivos na matriz dos compósitos cimentícios.

Em um panorama geral, constatou-se que a adição de 0,03% de OG foi benéfica para a resistência mecânica da argamassa, mas prejudicou a durabilidade da mesma. Já a adição de 0,05% de OG não apresentou diferença expressiva na durabilidade da argamassa, mas causou prejuízos à resistência à compressão do material.

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo, os resultados alcançados nesta pesquisa foram analisados, buscando esclarecer a influência da adição de OG nos compósitos cimentícios quanto à carbonatação desses materiais. Foram realizados ensaios para a avaliação da porosidade, carbonatação e resistência mecânica de argamassas com e sem incorporação de OG.

A partir do ensaio de absorção de água por imersão, foi observado que a adição de 0,03% de OG na argamassa não apresentou diferença em comparação às amostras de referência, no entanto, a adição de 0,05% OG de OG apresentou um leve acréscimo de 0,56% na absorção de água em relação às amostras de referência, que pode ter sido ocasionado pela dispersão não uniforme do OG, deixando poros vazios e aumentando a absorção de água das argamassas.

Em relação à resistência à compressão das argamassas, não foi constatada diferença significativa de resistência à compressão entre as amostras carbonatadas em ambiente de laboratório por 28 dias. Entretanto, para as amostras submetidas à carbonatação acelerada durante 28 dias, foi apurado que os teores de adição de 0,03% e 0,05% diminuíram a resistência à compressão das argamassas cerca 4,95% e 15,81%, respectivamente. Este resultado pode ser atribuído à capacidade de adsorção de água do OG, promovendo uma moldagem menos homogênea das amostras que dificulta a saída de bolhas de ar incorporadas na matriz. Ademais, este resultado também pode estar atrelado a uma dispersão ineficiente de OG nas amostras, originando regiões com maior concentração de OG em que o efeito de adsorção prejudicaria a hidratação do cimento e diminuiria a resistência das argamassas.

Também foi verificado que as argamassas REF e 0,03%OG submetidas à carbonatação acelerada apresentaram valores de resistência à compressão 11,45% e 7,62% maiores do que as amostras de mesmo traço carbonatadas em ambiente de laboratório. Isso ocorre pois a reação química de carbonatação promove a formação de partículas que deixam a matriz cimentícia mais compacta e resistente. Já as argamassas com adição de 0,05% de OG submetidas à carbonatação acelerada revelaram um comportamento diferente dos traços anteriores e apresentaram resistência à compressão cerca de 6,87% menor do que as amostras carbonatadas em ambiente de laboratório. Este resultado pode estar ligado à formação de

microfissuras na superfície carbonatada, causadas pela retração do material que ocorre durante o processo de carbonatação acelerada. No geral, para a resistência à compressão axial, percebeu-se que a argamassa 0,03%OG apresentou desempenho muito semelhante à argamassa REF.

Na resistência à tração por compressão diametral, os resultados das argamassas carbonatadas em ambiente de laboratório demonstram que houve um pequeno decréscimo de 1,51% e 7,18% para as argamassas com 0,03% e 0,05% de OG, respectivamente, em relação à referência. A redução na resistência à tração por compressão diametral pode ser consequência da pequena amostragem utilizada (4 CPs para cada traço) ou pode estar relacionada ao efeito de retenção de água do OG, prejudicando a moldagem das amostras e ocasionando segregação, ar incorporado e uma distribuição homogênea dentro da matriz cimentícia. Por outro lado, as argamassas com 0,03% e 0,05% de OG submetidas à carbonatação acelerada, ganharam resistência à tração quando comparadas com a argamassa REF. Os acréscimos na resistência à tração por compressão diametral foram de 18,88% e 17,95% para as argamassas com adição de 0,03% e 0,05% de OG respectivamente, e estão relacionados às pontes de transferência de tensões entre microfissuras promovidas pelo OG, que levam ao reforço do C-S-H.

As amostras carbonatadas em ambiente de laboratório apresentaram profundidade de carbonatação igual a 0 mm em todos os traços, portanto, a análise foi da penetração da frente de carbonatação foi realizada apenas para as amostras submetidas à carbonatação acelerada. Com isso, verificou-se que a adição de 0,03% de OG na argamassa apresentou um aumento de 49,73% na profundidade de carbonatação em relação à argamassa de referência. Apesar do aumento da profundidade carbonatada, a argamassa com incorporação de 0,03% de OG apresentou resultados satisfatórios em relação à resistência mecânica, demonstrando um melhor desempenho em relação ao traço 0,05%OG, quando comparados ao traço de referência. O resultados obtidos em relação à profundidade de carbonatação também mostra que a argamassa com 0,03% de OG possui maior permeabilidade quando comparada às demais argamassas estudadas.

Assim sendo, foi possível concluir que a carbonatação influencia a resistência mecânica dos compósitos cimentícios. A adição de OG também pode proporcionar melhorias aos compósitos cimentícios que podem contribuir para o aumento da

resistência à tração. Todavia, a incorporação deste nanomaterial na matriz cimentícia também pode gerar efeitos negativos. Com isso, deve-se destacar que o processo de mistura e moldagem dos compósitos cimentícios deve ser realizado com o maior cuidado, buscando evitar a formação de bolhas de ar, segregação de materiais e dispersão heterogênea do OG. Observa-se que adição de 0,03% de OG possui potencial para se tornar objeto de estudo para captura de CO₂ em compósitos cimentícios não armados, visto que, ao mesmo tempo que apresenta o aumento da profundidade de carbonatação, também demonstra um ganho na resistência mecânica. Verificou-se que a profundidade de carbonatação e, conseqüentemente, a permeabilidade das argamassas diminuíram com o aumento do teor de OG, portanto a utilização de teores maiores de OG pode colaborar com o aumento da durabilidade e da resistência mecânica dos compósitos cimentícios.

De acordo com os resultados alcançados nesta pesquisa, é possível sugerir os seguintes estudos para pesquisas futuras em compósitos cimentícios com adição de OG:

- Avaliar a capacidade de captura de CO₂ em compósitos cimentícios com diferentes teores de OG;
- Explorar a influência de diferentes métodos de dispersão do OG na matriz cimentícia, que colaborem com a diminuição da profundidade de carbonatação dos compósitos cimentícios;
- Analisar a influência da adição de OG na carbonatação de compósitos cimentícios fabricados com diferentes tipos de cimento, buscando verificar se os resultados obtidos nesta pesquisa são específicos do cimento CP V-ARI.
- Avaliar a influência do OG na carbonatação natural a longo prazo de compósitos cimentícios.
- Verificar o comportamento da penetração de CO₂ em compósitos cimentícios com adição de OG combinado com outros materiais.

REFERÊNCIAS

ABEDI, M. *et al.* Evaluation of CNT/GNP's synergic effects on the mechanical, microstructural, and durability properties of a cementitious composite by the novel dispersion. **Construction and Building Materials**, v. 260, 2020.

ALBUQUERQUE, A. G. M. dos R de. **Síntese de óxido de grafeno reduzido para incorporação em matriz epóxi**. 2021. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais do Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2252–2261, 2011.

ALMEIDA, E. C.; SANTOS, R. N.; EDWARDS, E. R. Síntese e caracterização de óxido de grafeno para uso em capacitor eletroquímico. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 7, n. 7, p. 30-42, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1621 - 22**: Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry. ASTM International, 2022. 9 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4404 - 18**: Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. ASTM International, 2018. 8 p.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação: Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Pini, 1992.104 p.

ANDRADE, C.; SANJUÁN, M. Á. Updating carbon storage capacity of Spanish cements. **Sustainability**, v. 10, n. 12, p. 1–15, 2018.

ANTONIO, I. de O. **Avaliação da captura de CO₂ devido à carbonatação de argamassas de revestimento produzidas com RCD**. 2018. 59 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2018.

ARAÚJO, M. C. de L. **Uso popular do açúcar cristal como retardador do tempo de início de pega e sua influência em pastas de cimento Portland**. 2019. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ABNT 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023. 242 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ABNT 7214**: Areia

normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ABNT 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2015. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ABNT 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ABNT 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ABNT 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 16 p.

AUROY, M. *et al.* Impact of carbonation on unsaturated water transport properties of cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 74, p. 44-58, 2015.

BARBUDO, M. Á. S. **Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón**. 2002. 396 f. Tese (Doutorado em ciências químicas) - Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2002.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações. **Fator médio - Inventários corporativos**, 2021.

BUI, H. *et al.* Evaluation of the influence of accelerated carbonation on the microstructure and mechanical characteristics of coconut fibre-reinforced cementitious matrix. **Journal of Building Engineering**, v. 39, 2021.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal**. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CARASEK, H. *et al.* Effect of carbonation in mortars with different types of metakaolin and curing procedures. In: International Conference on Durability of Building Materials and Components, 15., 2020. **Anais...** Barcelona, 2020.

CALLEJA, J. **Durability**. In: 7th Internacional Congress on the Chemistry of Cement. Paris, 1980. Vol.1, VII 2/1 – 2/48.

CAMPOS, C. A. **Estudo Da Carbonatação Em Compósitos Cimentícios Produzidos Com O Emprego De Aditivos Redutores De Permeabilidade Por Cristalização Capilar**. 2018. 158 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

CANÇADO, L. G. *et al.* Quantifying Defects in Graphene via Raman Spectroscopy at

Different Excitation Energies. **Nano Lett**, v. 11, n. 8, p. 3190-3196, 2011.

CARNEIRO, L. R. S.; POGGIALI, F. S. J.; LUDVIG, P. Effects of Graphene Oxide Addition on the Durability of Cementitious Composites. **International Journal of Science and Engineering Investigations**, v. 11, n. 121, p. 28-34, 2022.

CHINTALAPUDI, K.; PANNEM, R. M. R. An intense review on the performance of Graphene Oxide and reduced Graphene Oxide in an admixed cement system. **Construction and Building Materials**, v. 259, 2020.

COELHO, I. D.; ROCHA, V. V.; LUDVIG, P. Estudo da durabilidade de argamassa de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 23., 2018. **Anais...** Foz do Iguaçu, p. 3351-3362, 2018.

CORDEIRO, P. C. **Estudo do avanço da frente de carbonatação em compósitos cimentícios produzidos com baixos teores de aditivos incorporadores de ar**. 2018. 163 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

COSTA, I. V. L. da. **Análise do potencial técnico do sequestro geológico de CO₂ no setor petróleo no Brasil**. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

COSTA, B. L. de C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CUI, H. *et al.* Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 522–527, 2015.

CUNHA, I. B. da. **Quantificação das emissões de CO₂ na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DEVI, S. C.; KHAN, R. A. Influence of graphene oxide on sulfate attack and carbonation of concrete containing recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 250, 2020.

FAN, W. *et al.* Effects of carbonation on mechanical properties of CAC-GGBFS blended strain hardening cementitious composites. **Low-carbon Materials and Green Construction**, v. 1, n. 2, 2023.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Balance emissions and CO₂ uptake in concrete structures:

simulation based on the cement content and type. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p. 135–162, 2018.

FELIX, E.; POSSAN, E. Sequestro de CO₂ em estruturas de concreto em uma perspectiva de 100 anos. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto, 2014. **Anais...** Natal, 2014.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília - avaliação de pilares**. 2004. 240 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**: tópicos aplicados. 1ª ed. São Paulo: Pini, 2008.

GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V.; ALCALÁ, J. Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 1, p. 3–12, 2014.

GOMES, M. L. M.; MATSUSHIMA, J. T.; BALDAN, M. R. **Síntese e caracterização de óxido de grafeno e/ou grafeno pelo método de oxidação química da grafite visando suas aplicações como materiais nanoestruturados em capacitores eletroquímicos**. INPE, 2016. 47 f.

GRUYAERT, E.; VAN DEN HEEDDE, P.; BELIE, N. de. Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient - Effect of carbonation on the pore structure. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, p. 39–48, 2013.

HASELBACH, L.; THOMAS, A. Carbon sequestration in concrete sidewalk samples. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 47-52, 2014.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 1993. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986. 47p.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HORTA, R. A. dos S. **Avaliação das propriedades mecânicas e reológicas de pastas decimento com adição de óxido de grafeno**. 2020. 117 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

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

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 1990, p. 1165–1176, 1994.

HUIJGEN, W. J. J.; COMANS, R. N. J. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. **Environmental science & technology**, v. 43, n. 6, p. 1986–92, 2003.

ISAIA, G. C. **Carbonatação do concreto: uma revisão**. Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

ISAIA, G. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, v. I, 2011. 1926 p

ISHIDA, T.; MAEKAWA, K. Modeling of Ph Profile in Pore Water Based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory. **Doboku Gakkai Ronbunshu**, v. 2000, n. 648, p. 203–215, 2000.

JOHN, V. M. *et al.* Potencial de mitigação de CO₂ de materiais cimentícios na fase de uso. **Anais do Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 1–8, 2018.

JOHN, V. M.; OLIVEIRA, D. P.; LIMA, J. A. R. de. **Levantamento do estado da arte: Seleção de materiais**. São Paulo, 2007. 58 p.

KALSING, F. S. **Causas e efeitos da carbonatação na durabilidade do concreto armado**. 2020. 52 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. 1995. 168f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LACERDA, E. **Contribuição ao estudo do efeito do uso de aditivos incorporadores de ar no avanço da frente de carbonatação em compósitos de matriz cimentícia**. 2016. 164 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade

Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

LADEIRA, L. O. **Resistência à tração e à carbonatação de argamassas fabricadas com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre clínquer**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

LEE, S.; PARK, W.; LEE, H. Life cycle CO₂ assessment method for concrete using CO₂ balance and suggestion to decrease LCCO₂ of concrete in South-Korean apartment. **Energy and Buildings**, v. 58, p. 93-102, 2013.

LI, G. *et al.* Determination of the apparent activation energy of concrete carbonation. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, v. 28, n. 5, p. 944–949, 2013.

LI, X. *et al.* Effects of graphene oxide agglomerates on workability, hydration, microstructure and compressive strength of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 402–410, 2017.

LIN, C.; WEI, W.; HU, Y. H. Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 89, p. 128–133, 2016.

LO, Y.; LEE, H. M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. **Building and Environment**, v. 37, n. 5, p. 507–514, 2002.

LONG, W. J. *et al.* Dynamic mechanical properties and microstructure of graphene oxide nanosheets reinforced cement composites. **Nanomaterials**, v. 7, n. 12, 2017.

LONG, W. J. *et al.* Enhanced dynamic mechanical properties of cement paste modified with graphene oxide nanosheets and its reinforcing mechanism. **Cement and Concrete Composites**, v. 93, p. 127–139, 1 out. 2018.

LU, C. *et al.* Effect of graphene oxide on the mechanical behavior of strain hardening cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 457–464, 2016.

LU, L.; ZHAO, P.; LU, Z. A short discussion on how to effectively use graphene oxide to reinforce cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 33–41, 2018.

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

LV, S. *et al.* Preparation of cement composites with ordered microstructures via doping with graphene oxide nanosheets and an investigation of their strength and durability. **Materials**, v. 9, n. 11, 2016.

LV, S. *et al.* Fabrication of polycarboxylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v.66, p. 1-9, 2016.

LV, S. *et al.* Fabrication of GO/cement composites by incorporation of few-layered GO nanosheets and characterization of their crystal/chemical structure and properties. **Nanomaterials**, v. 7, n. 12, 2017.

LV, S. *et al.* Structure, performances, and formation mechanism of cement composites with large-scale regular microstructure by distributing uniformly few-layered graphene oxide in cement matrix. **Structural Concrete**, v. 20, p. 471-482, 2017.

MARTINELLI JÚNIOR, L. A. **Carbontação natural de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz**. 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MAZURANA, L. **Captura de CO₂ em argamassas de revestimento através da carbonatação natural**. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 685 p.

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

MOHAMMED, A. *et al.* The role of graphene oxide in limited long-term carbonation of cement-based matrix. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 858–866, 2018.

MOHAMMED, A.; AL-SAAD, N. T. K.; SANJAYAN, J. Inclusion of graphene oxide in cementitious composites: state-of-the-art review. **Australian Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 2, p. 81-95, 2018.

MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloreto**. 1996. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.

NSAMBU, R. **Avaliação do desempenho de argamassas de reparação para betão armado**. 2007. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Superior técnico, Lisboa, 2007.

NUNES, D. G. **Carbonatação acelerada em concretos compostos com cinza de**

casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico. 2014. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

NUNES, F. L.; HELENE, P. R. do L. **Influência da Dosagem na Carbonatação de Concretos.** São Paulo: EPUSP, 1998. 21 p.

OLIVEIRA, M. de; POLETTO, M.; SEVERO, T. C. Rota Química para Produção de Óxido de Grafeno a Partir de Oxidação do Grafite Comercial. **RICA - Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada**, v. 3, p. 2–6, 2018.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1348–1356, 2007.

PAN, Z. et al. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite. **Cement and Concrete Composites**, v. 58, p. 140–147, 2015.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Hydration and carbonation of pozzolanic cements. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 2, p. 119–130, 1992.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 4, p. 363–373, 1991.

PARROTT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete.** London: Cement and Concrete Association, Building Research Station, 1987. 126 p.

PARROTT, L. J. Damage caused by carbonation of reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 23, n. 3, p. 230–234, 1990.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação.** 2004. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição.** 2009. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PEREIRA, N. G. A. **Síntese, modificação química e caracterização de óxido de grafeno preparado via eletroquímica.** 2019. 67 f. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

PHAM, S. T. Effects of carbonation on the microporosity and macro properties of Portland cement mortar CEM I. **Journal of Materials Science and Chemical Engineering**, v. 2, p. 40-52, 2014.

PINA, F. B. C. **Resistência à carbonatação de argamassas de reparação para**

estruturas em betão armado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

POLITO, G. **Avaliação do perfil de penetração dos compostos hidratados do aglomerante de argamassas aplicadas sobre bloco cerâmico através de análises químicas, microestruturais, mineralógicas e de resistência de aderência.** 2013. 198 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

POSSAN, E. *et al.* CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 6, p. 147–161, 2017.

POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. Metodologia para estimativa da captura de CO₂ devido à carbonatação do concreto. **Estudos Ambientais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, v. 4, 2017. p. 17-29.

PRABAVATHY, S. *et al.* Enhancement in behavioral properties of cement mortar cubes admixed with reduced graphene oxide. **Journal of Building Engineering**, v. 28, 2020.

Relógio Carbônico CO₂. **Apolo 11**. Disponível em: <https://www.apolo11.com/relogiocarbonico.php>. Acesso em: 12 de mar. de 2022.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. **CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth.** (RILEM Recommendations CPC-18). Materials and Structures, [s. n.], p. 453-455, 1988

RIGO, E. **Avaliação do potencial de captura de CO₂ de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação.** 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

ROY, R. *et al.* Effect of Graphene Oxide Nanosheets dispersion in cement mortar composites incorporating Metakaolin and Silica Fume. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 514-524, 2018.

ROY, S. K.; BENG, P. K.; NORTHWOOD, D. O. The carbonation of concrete structures in the tropical environment of Singapore and a comparison with published data for temperate climates. **Magazine of Concrete Research**, v. 48, n. 4, p. 293–300, 1996.

RUMMELI, M. H. *et al.* Direct Low-Temperature Nanographene CVD Synthesis over a Dielectric Insulator. **ACS Nano**, v. 4, n. 7, p. 4206-4210, 2010.

SANJUÁN, M. A.; DEL OLMO, C. Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating. **Building and Environment**, v. 36, n. 8, p. 949–953, 2001.

SANTANA, H. A. *et al.* Influência da composição granulométrica na carbonatação de matrizes cimentícia. In: Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 22., 2018. **Anais...** São José dos Campos, 2018.

SCHEEREN, E. **Estudo do comportamento da carbonatação em concreto com adição de fibras de polipropileno**. 2020. 117 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2020.

SCHRÖDER, F.; SMOLCZYK, H. G. Carbonation and protection against steel corrosion. In.: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5th., 1968, Tokyo. **Proceedings** ... Tokyo:1969. 4v., v.4, p.188-198. (Part IV).

SILVA, V. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa**. 2002. 187 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Área de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SIMAS, M. da S. L. **Sistemas de protecção do betão face à carbonatação**. 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa 2007.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual de 2020**, 2020.

SKOCEK, J.; ZAJAC, M.; BEN HAHA, M. Carbon Capture and Utilization by mineralization of cement pastes derived from recycled concrete. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2020.

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2 ed. United Kingdom: Thomas Telford, 1997. 459 p.

TULA, L. S. **Contribuição ao estudo da resistência a corrosão de armaduras de aço inoxidável**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 469 p.

UOMOTO, T.; TAKADA, Y. Factors affecting concrete carbonation ratio. **Doboku Gakkai Ronbunshu**, v. 451, p. 119–128, 1992.

VERÇOSA, L. O. **Efeitos da adição de óxido de grafeno em argamassas de reparo estrutural submetidas à carbonatação**. 2022. 131 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

WBCDS. GNR Project Reporting CO₂. **Gross CO₂ emissions - Weighted average excluding CO₂ from on-site power generation - Grey clinker**, 2019a.

WBCDS. GNR Project Reporting CO₂. **Cement plant power consumption - Weighted average Grey and white cement**, 2019b.

XU, Y. *et al.* A holistic review of cement composites reinforced with graphene oxide. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 291–302, 20 maio 2018.

YANG, H. *et al.* Progress in carbon dioxide separation and capture: A review. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, n. 1, p. 14–27, 2008.

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

YOU, K.; JEONG, H.; HYUNG, W. Effects of accelerated carbonation on physical properties of mortar. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 13:1, p. 217–221, 2014.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo vadis? **Química Nova**, v. 36, p. 1533–1539, 2013.

ZHAO, L. *et al.* Mechanical behavior and toughening mechanism of polycarboxylate superplasticizer modified graphene oxide reinforced cement composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 113, p. 308–316, 2017.

ZHAO, L. *et al.* An intensive review on the role of graphene oxide in cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 241, 30 abr. 2020a.

ZHAO, L. *et al.* Deep research about the mechanisms of graphene oxide (GO) aggregation in alkaline cement pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 247, 30 jun. 2020b.

ZHENG, Q. *et al.* Graphene-engineered cementitious composites: Small makes a big impact. **Nanomaterials and Nanotechnology**, v. 7, p. 1–18, 2017.

APÊNDICES

Apêndice A – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão.

Absorção após 35 dias de cura - REF			
CP	m_s (g)	m_{sat} (g)	Abs (%)
1	413,70	445,40	7,66
2	410,10	440,80	7,49
3	412,60	443,40	7,46
4	409,80	440,10	7,39
RESUMO – 3 CPs			
Média		7,45	
Desvio Padrão		0,05	
Coef. de variação		0,6%	

Absorção após 35 dias de cura - 0,03% OG			
CP	m_s (g)	m_{sat} (g)	Abs (%)
1	409,30	440,40	7,60
2	417,10	447,80	7,36
3	414,00	444,60	7,39
4	414,20	445,80	7,63
RESUMO – 3 CPs			
Média		7,45	
Desvio Padrão		0,13	
Coef. de variação		1,7%	

Absorção após 35 dias de cura - 0,05% OG			
CP	m_s (g)	m_{sat} (g)	Abs (%)
1	420,00	451,00	7,38
2	419,60	451,00	7,48
3	416,80	449,00	7,73
4	414,20	445,70	7,61
RESUMO – 3 CPs			
Média		7,49	
Desvio Padrão		0,11	
Coef. de variação		1,5%	

Apêndice B – Análise estatística dos resultados do ensaio de absorção de água por imersão.

- 1º passo – Verificação da existência de outliers

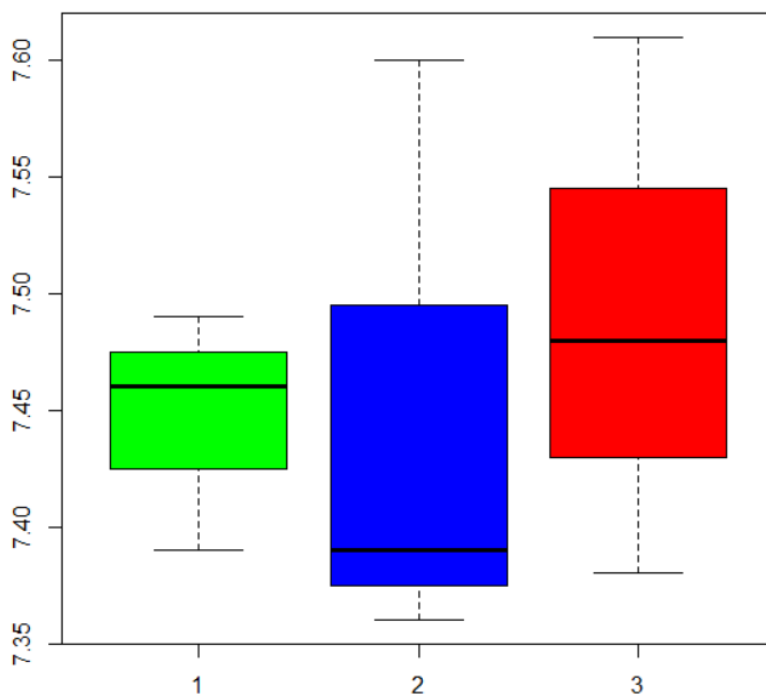
A: absorção de água por imersão para as 3 amostras de REF.

B: absorção de água por imersão para as 3 amostras de 0,03%OG.

C: absorção de água por imersão para as 3 amostras de 0,05%OG.

```
> A<-c(7.49,7.46,7.39)
> B<-c(7.60,7.36,7.39)
> C<-c(7.38,7.48,7.61)

> boxplot(A,B,C,col=c("green","blue","red"))
```



Não há outliers nos grupos A, B e C.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```
> shapiro.test(A)

Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.94937, p-value = 0.5665
```

```
> shapiro.test(B)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.84211, p-value = 0.2196

> shapiro.test(C)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  C
W = 0.99436, p-value = 0.8564
```

Como $p\text{-value} > 0,05$, então os grupos A, B e C seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

H_0 (hipótese nula) $p\text{-value} > 0,05$: Não existem diferenças na absorção de água por imersão.

H_1 (hipótese alternativa) $p\text{-value} < 0,05$: Existem diferenças na absorção de água por imersão.

```
> var.test(A,B)

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 0.154, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.2669
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.003948618 6.005847953
sample estimates:
ratio of variances
      0.1539961
```

Como $p\text{-value} = 0,2669$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância A = variância B.

```
> t.test(A,B,var.equal=TRUE)

      Two Sample t-test

data:  A and B
t = -0.0411, df = 4, p-value = 0.9692
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.2285128  0.2218461
sample estimates:
mean of x mean of y
 7.446667  7.450000
```

Como p-value = 0,9692 e p-value > 0,05, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na absorção de água por imersão quando comparamos as amostras A e B.

```
> var.test(A,C)
```

```
      F test to compare two variances

data:  A and C
F = 0.19799, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.3305
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.005076795 7.721804511
sample estimates:
ratio of variances
      0.197995
```

Como p-value = 0,3305, então p-value > 0,05 e variância A = variância C.

```
> t.test(A,C,var.equal=TRUE)
```

```
      Two Sample t-test

data:  A and C
t = -0.59461, df = 4, p-value = 0.5841
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.2456734  0.1590067
sample estimates:
mean of x mean of y
 7.446667  7.490000
```

Como p-value = 0,5841 e p-value > 0,05, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na absorção de água por imersão quando comparamos as amostras A e C.

```
> var.test(B,C)
```

```
      F test to compare two variances

data:  B and C
F = 1.2857, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.875
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.03296703 50.14285714
sample estimates:
ratio of variances
      1.285714
```

Como p-value = 0,875, então p-value > 0,01 e variância B = variância C.

```
> t.test(B,C,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: B and C
```

```
t = -0.39736, df = 4, p-value = 0.7114
```

```
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
-0.3194893  0.2394893
```

```
sample estimates:
```

```
mean of x mean of y
```

```
7.45      7.49
```

Como $p\text{-value} = 0,7114$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à compressão quando comparamos as amostras A e C.

Apêndice C – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial.

Ensaio de resistência à compressão axial - REF – após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.					
CP	Diâmetro (mm)		Média (mm)	Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	F (kN)	σ (MPa)
1	49,98	50,02	50,00	101,71	51,80
2	50,09	50,27	50,18	96,07	48,58
3	49,97	50,06	50,02	111,72	56,85
4	50,02	50,08	50,05	104,70	53,22
RESUMO – 3 CPs					
Média		51,20			
Desvio Padrão		2,38			
Coef. de variação		4,6%			

Ensaio de resistência à compressão axial - 0,03%OG - após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.					
CP	Diâmetro (mm)		Média (mm)	Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	Q (kN)	σ (MPa)
1	50,02	50,12	50,07	81,41	41,35
2	49,94	50,14	50,04	99,35	50,52
3	50,05	50,11	50,08	96,09	48,78
4	49,95	50,07	50,01	101,97	51,91
RESUMO – 3 CPs					
Média		50,40			
Desvio Padrão		1,57			
Coef. de variação		3,1%			

Ensaio de resistência à compressão axial - 0,05%OG - após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.					
CP	Diâmetro (mm)		Média (mm)	Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	Q (kN)	σ (MPa)
1	49,94	50,06	50,00	101,71	51,80
2	49,88	49,92	49,90	110,99	56,75
3	50,02	50,10	50,06	98,00	49,79
4	49,97	50,03	50,00	102,94	52,43
RESUMO – 3 CPs					
Média		51,34			
Desvio Padrão		1,38			
Coef. de variação		2,7%			

Ensaio de resistência à compressão axial - REF - após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada					
CP	Diâmetro (mm)		Média (mm)	Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	F (kN)	σ (MPa)
1	50,04	50,12	50,08	111,11	56,41
2	49,96	50,10	50,03	113,68	57,83
3	50,09	50,13	50,11	96,44	48,90
4	50,00	50,08	50,04	111,99	56,95
RESUMO – 3 CPs					
Média		57,06			
Desvio Padrão		0,72			
Coef. de variação		1,3%			

Ensaio de resistência à compressão axial - 0,03%OG - após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada					
CP	Diâmetro (mm)		Média (mm)	Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	F (kN)	σ (MPa)
1	50,03	50,09	50,06	102,2	51,92
2	50,01	50,15	50,08	102,34	51,45
3	50,04	50,12	50,08	112,57	57,15
4	50,04	50,13	50,09	111,22	56,44
RESUMO – 4 CPs					
Média		54,24			
Desvio Padrão		2,97			
Coef. de variação		5,5%			

Ensaio de resistência à compressão axial - 0,05%OG - 28 dias de carbonatação acelerada					
CP	Diâmetro (mm)		Média (mm)	Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	Q (kN)	σ (MPa)
1	49,97	50,13	50,05	95,90	48,74
2	50,03	50,17	50,10	94,36	47,86
3	49,96	50,04	50,00	84,78	43,18
4	50,02	50,12	50,07	93,58	47,53
RESUMO – 3 CPs					
Média		48,04			
Desvio Padrão		0,63			
Coef. de variação		1,3%			

Apêndice D – Análise estatística dos resultados de resistência à compressão axial após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

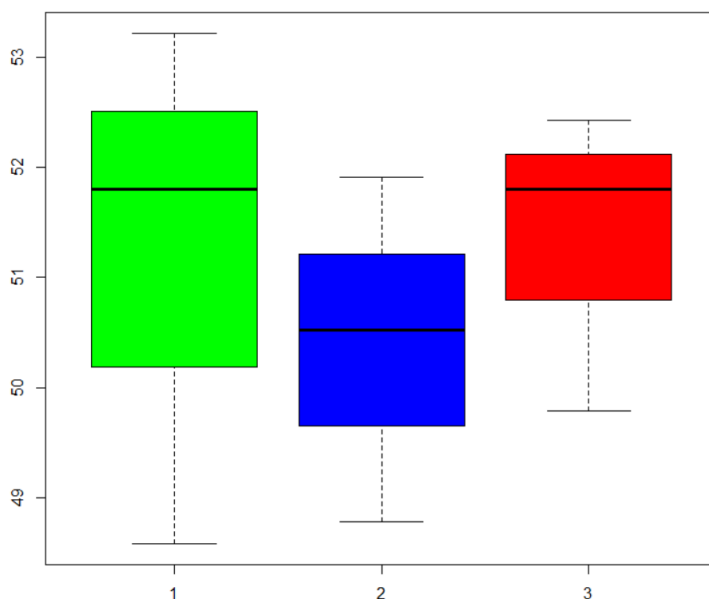
A: resistência à compressão das 3 amostras de REF após 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

B: resistência à compressão das 3 amostras de 0,03%OG após 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

C: resistência à compressão das 3 amostras de 0,05%OG após 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

```
> A<-c(51.80,48.58,53.22)
> B<-c(50.52,48.78,51.91)
> C<-c(51.80,49.79,52.43)

> boxplot(A,B,C,col=c("green","blue","red"))
```



Não há outliers para os grupos A, B e C.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```

> shapiro.test(A)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.95223, p-value = 0.5792

> shapiro.test(B)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.99585, p-value = 0.8769

> shapiro.test(C)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  C
W = 0.91652, p-value = 0.4402

```

Como $p\text{-value} > 0,05$, então os grupos A, B e C seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

H0 (hipótese nula) $p\text{-value} > 0,05$: Não existem diferenças na resistência à compressão após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

H1 (hipótese alternativa) $p\text{-value} < 0,05$: Existem diferenças na resistência à compressão após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

```

> var.test(A,B)

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 2.2983, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.6064
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.05892956 89.63186642
sample estimates:
ratio of variances
      2.298253

```

Como $p\text{-value} = 0,6064$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância A = variância B.

```
> t.test(A,B,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: A and B
t = 0.48448, df = 4, p-value = 0.6534
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -3.768829  5.362163
sample estimates:
mean of x mean of y
 51.20000  50.40333
```

Como $p\text{-value} = 0,6534$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à compressão após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório quando comparamos as amostras A e B.

```
> var.test(A,C)
```

```
F test to compare two variances
```

```
data: A and C
F = 2.9732, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.5034
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.07623656 115.95581505
sample estimates:
ratio of variances
 2.973226
```

Como $p\text{-value} = 0,5034$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância A = variância C.

```
> t.test(A,C,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: A and C
t = -0.08823, df = 4, p-value = 0.9339
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -4.545575  4.265575
sample estimates:
mean of x mean of y
 51.20    51.34
```

Como $p\text{-value} = 0,9339$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à compressão após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório, quando comparamos as amostras A e C.

```
> var.test(B,C)

      F test to compare two variances

data:  B and C
F = 1.2937, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.872
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.03317153 50.45389511
sample estimates:
ratio of variances
      1.29369
```

Como p-value = 0,872, então p-value > 0,05 e variância B = variância C.

```
> t.test(B,C,var.equal=TRUE)

      Two Sample t-test

data:  B and C
t = -0.77692, df = 4, p-value = 0.4806
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -4.283995  2.410661
sample estimates:
mean of x mean of y
 50.40333  51.34000
```

Como p-value = 0,4806 e p-value > 0,05, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à compressão após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório quando comparamos as amostras B e C.

Apêndice E – Análise estatística dos resultados de resistência à compressão axial após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

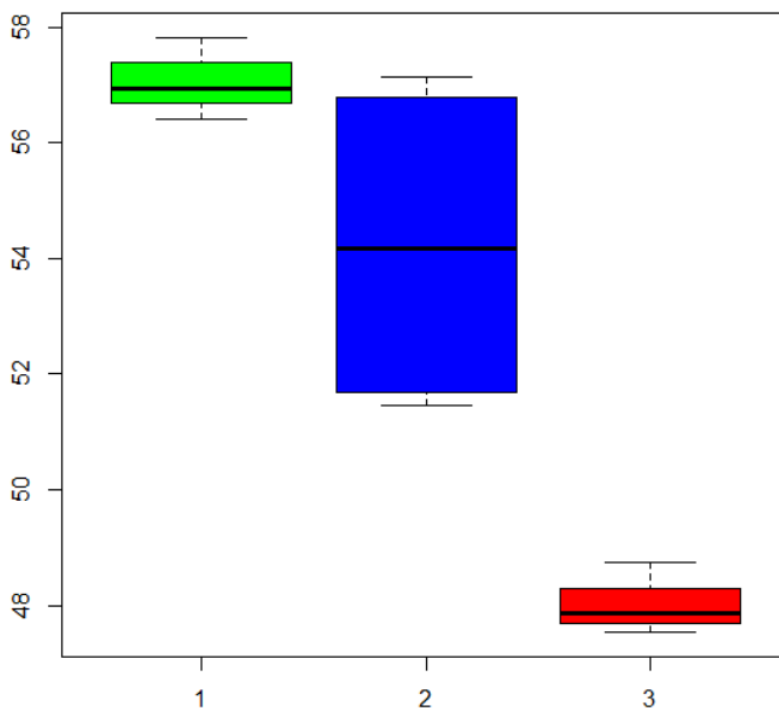
- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

A: resistência à compressão das 3 amostras de REF após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

B: resistência à compressão das 4 amostras de 0,03%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

C: resistência à compressão das 3 amostras de 0,05%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

```
A<-c(56.41,57.83,56.95)
B<-c(51.92,51.45,57.15,56.44)
C<-c(48.74,47.86,47.53)
> boxplot(A,B,C,col=c("green","blue","red"))
```



Não há outliers para os grupos A, B e C.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```

> shapiro.test(A)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.98125, p-value = 0.7376

> shapiro.test(B)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.8235, p-value = 0.1515

> shapiro.test(C)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  C
W = 0.93557, p-value = 0.5098

```

Como p-value > 0,05, então os grupos A, B e C seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Não existem diferenças na resistência à compressão após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Existem diferenças na resistência à compressão após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

```

> var.test(A,B)

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 0.058214, num df = 2, denom df = 3, p-value = 0.111
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.003628391 2.279991396
sample estimates:
ratio of variances
 0.05821429

```

Como p-value = 0,111, então p-value > 0,05 e variância A = variância B.

```
> t.test(A,B,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: A and B
t = 1.5762, df = 5, p-value = 0.1758
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -1.781220  7.427887
sample estimates:
mean of x mean of y
 57.06333  54.24000
```

Como $p\text{-value} = 0,1758$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à compressão após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada, quando comparamos as amostras A e B.

```
> var.test(A,C)
```

```
F test to compare two variances
```

```
data: A and C
F = 1.3131, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.8646
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.03366955 51.21138281
sample estimates:
ratio of variances
 1.313112
```

Como $p\text{-value} = 0,8646$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância A = variância C.

```
> t.test(A,C,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: A and C
t = 16.423, df = 4, p-value = 8.048e-05
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 7.495088 10.544912
sample estimates:
mean of x mean of y
 57.06333  48.04333
```

Como $p\text{-value} = 0,00008048$ e $p\text{-value} < 0,05$, então a hipótese alternativa é verdadeira. Pode-se afirmar que há diferenças na resistência à compressão após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada, quando comparamos as amostras A e C.

```
> var.test(B,C)

      F test to compare two variances

data:  B and C
F = 22.557, num df = 3, denom df = 2, p-value = 0.0855
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.5759287 361.8993781
sample estimates:
ratio of variances
 22.55653
```

Como p-value = 0,0855, então p-value > 0,05 e variância B = variância C.

```
> t.test(B,C,var.equal=TRUE)

      Two Sample t-test

data:  B and C
t = 3.4749, df = 5, p-value = 0.01776
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 1.612669 10.780664
sample estimates:
mean of x mean of y
 54.24000  48.04333
```

Como p-value = 0,01776 e p-value < 0,05, então a hipótese alternativa é verdadeira. Pode-se afirmar que há diferenças na resistência à compressão após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada quando comparamos as amostras B e C.

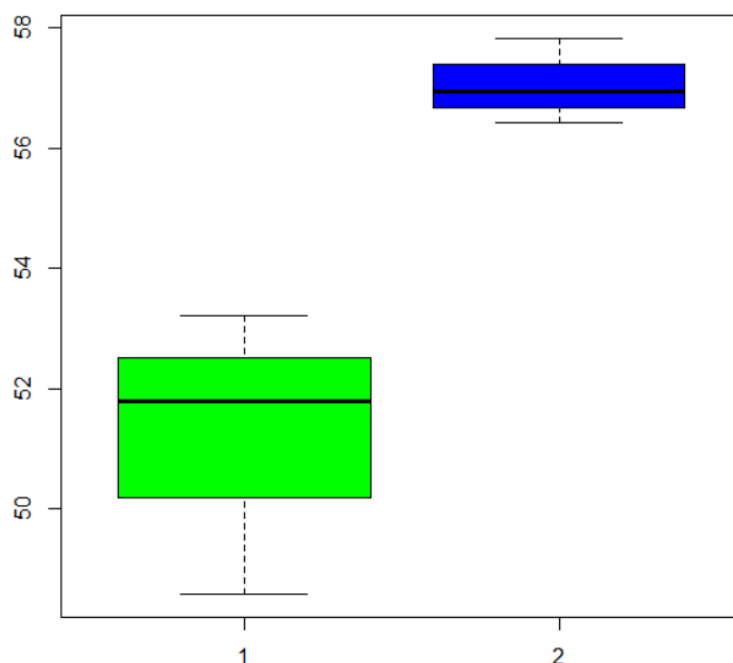
Apêndice F – Análise estatística dos resultados de resistência à compressão axial apenas da argamassa REF.

- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

A: resistência à compressão das 3 amostras de REF após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

B: resistência à compressão das 3 amostras de REF após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

```
> A<-c(51.80,48.58,53.22)
> B<-c(56.41,57.83,56.95)
> boxplot(A,B,col=c("green","blue"))
```



Não há outliers para os grupos A e B.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```
> shapiro.test(A)

Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.95223, p-value = 0.5792
```

```
> shapiro.test (B)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.98125, p-value = 0.7376
```

Como p-value > 0,05, então os grupos A e B seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Não existem diferenças na resistência à compressão para argamassa REF.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Existem diferenças na resistência à compressão para argamassa REF.

```
> var.test (A,B)

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 11.003, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.1666
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.2821178 429.1012198
sample estimates:
ratio of variances
 11.0026
```

Como p-value = 0,1666, então p-value > 0,05 e variância A = variância B.

```
> t.test (A,B,var.equal=TRUE)

      Two Sample t-test

data:  A and B
t = -4.0898, df = 4, p-value = 0.01498
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -9.843809 -1.882858
sample estimates:
mean of x mean of y
 51.20000  57.06333
```

Como p-value = 0,01498 e p-value < 0,05, então a hipótese alternativa é verdadeira. Pode-se afirmar que há diferenças na resistência à compressão para argamassa REF.

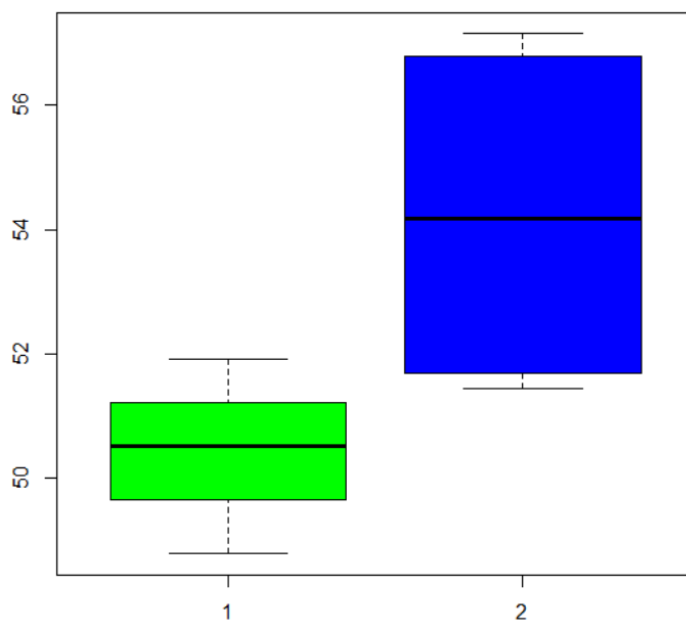
Apêndice G – Análise estatística dos resultados de resistência à compressão axial apenas da argamassa 0,03%OG.

- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

A: resistência à compressão das 3 amostras de 0,03%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

B: resistência à compressão das 4 amostras de 0,03%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

```
> A<-c(50.52,48.78,51.91)
> B<-c(51.92,51.45,57.15,56.44)
> boxplot(A,B,col=c("green","blue"))
```



Não há outliers para os grupos A e B.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```
> shapiro.test(A)

Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.99585, p-value = 0.8769
```

```
> shapiro.test(B)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.8235, p-value = 0.1515
```

Como p-value > 0,05, então os grupos A e B seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Não existem diferenças na resistência à compressão para argamassa 0,03%OG.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Existem diferenças na resistência à compressão para argamassa 0,03%OG.

```
> var.test(A,B)

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 0.27869, num df = 2, denom df = 3, p-value = 0.4511
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.01737046 10.91517033
sample estimates:
ratio of variances
 0.2786935
```

Como p-value = 0,4511, então p-value > 0,05 e variância A = variância B.

```
> t.test(A,B,var.equal=TRUE)

      Two Sample t-test

data:  A and B
t = -2.0048, df = 5, p-value = 0.1013
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -8.756206  1.082873
sample estimates:
mean of x mean of y
 50.40333  54.24000
```

Como p-value = 0,1013 e p-value > 0,05, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à compressão para argamassa 0,03%OG.

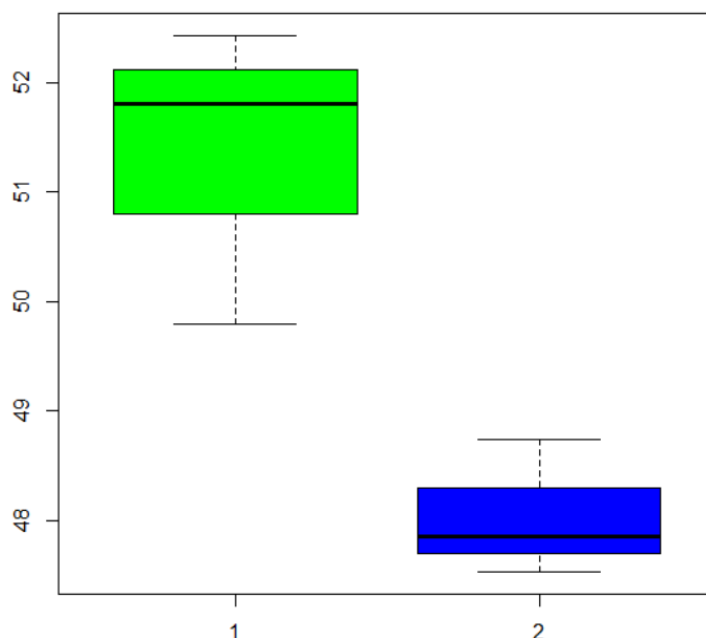
Apêndice H – Análise estatística dos resultados de resistência à compressão axial apenas da argamassa 0,05%OG.

- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

A: resistência à compressão das 3 amostras de 0,05%OG após 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

B: resistência à compressão das 3 amostras de 0,05%OG após 28 dias de carbonatação acelerada.

```
> A<-c(51.80,49.79,52.43)
> B<-c(48.74,47.86,47.53)
> boxplot(A,B,col=c("green","blue"))
```



Não há outliers para os grupos A e B.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```
> shapiro.test(A)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.91652, p-value = 0.4402
```

```
> shapiro.test(B)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.93557, p-value = 0.5098
```

Como p-value > 0,05, então os grupos A e B seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Não existem diferenças na resistência à compressão para argamassa 0,05%OG.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Existem diferenças na resistência à compressão para argamassa 0,05%OG.

```
> var.test(A,B)

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 4.8592, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.3413
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.1245961 189.5106927
sample estimates:
ratio of variances
 4.859249
```

Como p-value = 0,3413, então p-value > 0,05 e variância A = variância B.

```
> t.test(A,B,var.equal=TRUE)

      Two Sample t-test

data:  A and B
t = 3.7713, df = 4, p-value = 0.01958
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.8696802 5.7236531
sample estimates:
mean of x mean of y
51.34000 48.04333
```

Como p-value = 0,01958 e p-value < 0,05, então a hipótese alternativa é verdadeira. Pode-se afirmar que há diferenças na resistência à compressão para argamassa 0,05%OG.

Apêndice I – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral - REF - após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório								
C P	Diâmetro (mm)		Comprimento (mm)		Médias (mm)		Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	Comprimento	F (kN)	σ (MPa)
1	50,01	50,07	100,34	100,43	50,04	100,39	42,70	5,41
2	50,01	50,11	99,71	99,87	50,06	99,79	41,17	5,25
3	49,94	50,06	99,03	99,27	50,00	99,15	44,74	5,75
4	49,97	50,04	100,29	100,41	50,01	100,35	40,96	5,20
RESUMO – 3 CPs								
Média		5,29						
Desvio Padrão		0,11						
Coef. de variação		2,1%						

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral - 0,03%OG - após 35 dias de cura e 28 dias em ambiente de laboratório								
C P	Diâmetro (mm)		Comprimento (mm)		Médias (mm)		Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	Comprimento	F (kN)	σ (MPa)
1	50,02	50,18	99,68	99,92	50,10	99,80	37,09	4,72
2	50,00	50,18	99,8	99,98	50,09	99,89	41,24	5,25
3	50,03	50,15	99,99	100,09	50,09	100,04	39,27	4,99
4	50,31	50,33	100,03	100,07	50,32	100,05	42,51	5,38
RESUMO – 3 CPs								
Média		5,21						
Desvio Padrão		0,20						
Coef. de variação		3,8%						

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral - 0,05%OG - após 35 dias de cura e 28 dias em ambiente de laboratório								
C P	Diâmetro (mm)		Comprimento (mm)		Médias (mm)		Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	Comprimento	F (kN)	σ (MPa)
1	50,07	50,17	99,72	99,78	50,12	99,75	41,84	5,33
2	50,00	50,06	99,86	100,04	50,03	99,95	35,99	4,58
3	50,08	50,12	100,18	100,38	50,10	100,28	38,02	4,82
4	49,98	50,14	100,13	100,27	50,06	100,20	30,49	3,87
RESUMO – 3 CPs								
Média		4,91						
Desvio Padrão		0,38						
Coef. de variação		7,8%						

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral - REF - 28 dias de carbonatação acelerada								
C P	Diâmetro (mm)		Comprimento (mm)		Médias (mm)		Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	Comprimento	F (kN)	σ (MPa)
1	50,03	50,21	99,63	99,77	50,12	99,70	40,61	5,25
2	50,07	50,21	99,72	99,91	50,14	99,82	21,99	2,80
3	50,19	50,27	98,29	98,45	50,23	98,37	18,68	2,37
4	50,11	50,15	100,24	100,46	50,13	100,35	38,05	4,82
RESUMO – 3 CPs								
Média		4,29						
Desvio Padrão		1,31						
Coef. de variação		30,5%						

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral - 0,03%OG - 28 dias de carbonatação acelerada								
C P	Diâmetro (mm)		Comprimento (mm)		Médias (mm)		Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	Comprimento	F (kN)	σ (MPa)
1	50,2	50,28	99,96	100,04	50,24	100,00	47,19	6,02
2	50,07	50,21	99,69	99,81	50,14	99,75	26,28	3,22
3	50,06	50,12	100,19	100,29	50,09	100,24	33,17	4,28
4	50,07	50,25	100,23	100,45	50,16	100,34	39,47	5,00
RESUMO – 3 CPs								
Média		5,10						
Desvio Padrão		0,87						
Coef. de variação		17,1%						

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral - 0,05%OG - 28 dias de carbonatação acelerada								
C P	Diâmetro (mm)		Comprimento (mm)		Médias (mm)		Ruptura	
	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2	Diâmetro	Comprimento	F (kN)	σ (MPa)
1	50,04	50,24	100,04	100,28	50,14	100,16	42,83	5,43
2	49,9	50,06	100,11	100,29	49,98	100,20	43,31	5,51
3	50,05	50,09	100,04	100,13	50,07	100,09	21,04	2,67
4	49,99	50,05	100,11	100,23	50,02	100,17	33,31	4,23
RESUMO – 3 CPs								
Média		5,06						
Desvio Padrão		0,72						
Coef. de variação		14,2%						

Apêndice J – Análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

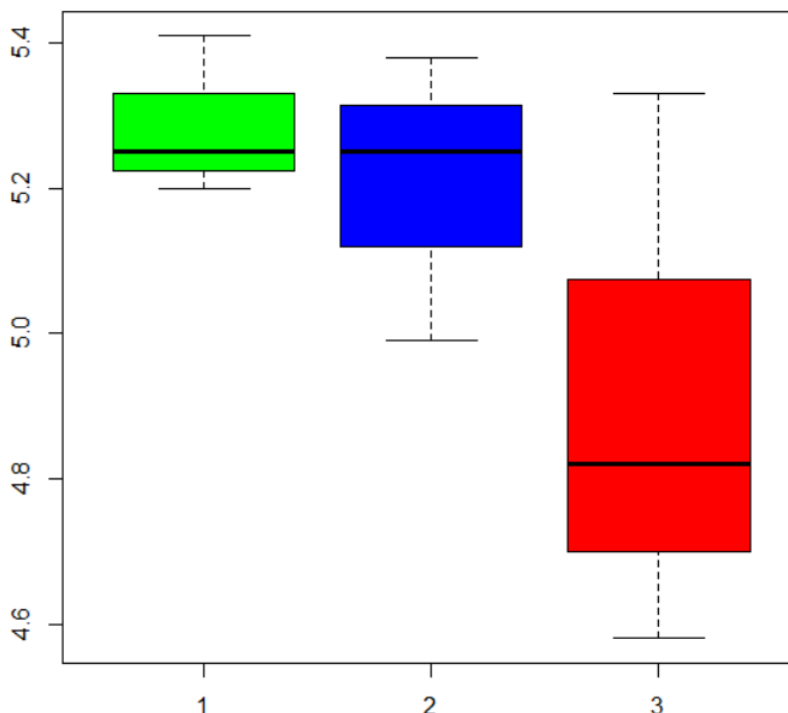
- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

A: resistência à tração das 3 amostras de REF após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

B: resistência à tração das 3 amostras de 0,03%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

C: resistência à tração das 3 amostras de 0,05%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

```
> A<-c(5.41,5.25,5.20)
> B<-c(5.25,4.99,5.38)
> C<-c(5.33,4.58,4.82)
> boxplot(A,B,C,col=c("green","blue","red"))
```



Não há outliers para os grupos A, B e C.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```

> shapiro.test(A)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.9162, p-value = 0.4391

> shapiro.test(B)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.96429, p-value = 0.6369

> shapiro.test(C)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  C
W = 0.95859, p-value = 0.6086

```

Como $p\text{-value} > 0,05$, então os grupos A, B e C seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

H_0 (hipótese nula) $p\text{-value} > 0,05$: Não existem diferenças na resistência à tração após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

H_1 (hipótese alternativa) $p\text{-value} < 0,05$: Existem diferenças na resistência à tração após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

```

> var.test(A,B)

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 0.30516, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.4676
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.007824523 11.901098901
sample estimates:
ratio of variances
 0.3051564

```

Como $p\text{-value} = 0,4676$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância A = variância B.

```
> t.test(A,B,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: A and B
t = 0.61078, df = 4, p-value = 0.5743
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.2836566  0.4436566
sample estimates:
mean of x mean of y
 5.286667  5.206667
```

Como $p\text{-value} = 0,5743$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à tração após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório quando comparamos as amostras A e B.

```
> var.test(A,C)
```

```
F test to compare two variances
```

```
data: A and C
F = 0.082027, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.1516
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.002103252 3.199045671
sample estimates:
ratio of variances
 0.08202681
```

Como $p\text{-value} = 0,1516$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância A = variância C.

```
> t.test(A,C,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: A and C
t = 1.6375, df = 4, p-value = 0.1769
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.2619828  1.0153161
sample estimates:
mean of x mean of y
 5.286667  4.910000
```

Como $p\text{-value} = 0,1769$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à tração após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório quando comparamos as amostras A e C.

```
> var.test(B,C)
```

```
F test to compare two variances
```

```
data: B and C
```

```
F = 0.2688, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.4237
```

```
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
0.006892373 10.483299250
```

```
sample estimates:
```

```
ratio of variances
```

```
0.2688025
```

Como p-value = 0,4237, então p-value > 0,05 e variância B = variância C.

```
> t.test(B,C,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: B and C
```

```
t = 1.191, df = 4, p-value = 0.2995
```

```
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
-0.3949103 0.9882437
```

```
sample estimates:
```

```
mean of x mean of y
```

```
5.206667 4.910000
```

Como p-value = 0,2995 e p-value > 0,05, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à tração após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório quando comparamos as amostras B e C.

Apêndice K – Análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

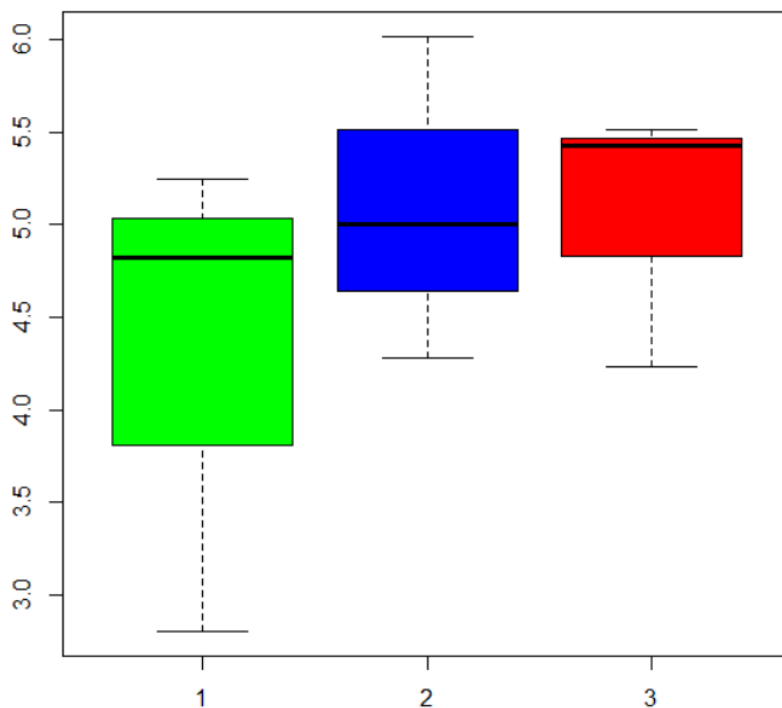
A: resistência à tração das 3 amostras de REF após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

B: resistência à tração das 3 amostras de 0,03%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

C: resistência à tração das 3 amostras de 0,05%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

```
> A<-c(5.25,2.80,4.82)
> B<-c(6.02,4.28,5.00)
> C<-c(5.43,5.51,4.23)

> boxplot(A,B,C,col=c("green","blue","red"))
```



Não há outliers para os grupos A, B e C.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```

> shapiro.test(A)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.87689, p-value = 0.3153

> shapiro.test(B)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.99019, p-value = 0.8105

> shapiro.test(C)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  C
W = 0.79668, p-value = 0.1066

```

Como $p\text{-value} > 0,05$, então os grupos A, B e C seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

H_0 (hipótese nula) $p\text{-value} > 0,01$: Não existem diferenças na resistência à tração após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

H_1 (hipótese alternativa) $p\text{-value} < 0,01$: Existem diferenças na resistência à tração após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

```

> var.test(A,B)

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 2.2387, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.6175
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.05740383 87.31122449
sample estimates:
ratio of variances
 2.238749

```

Como $p\text{-value} = 0,6175$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância A = variância B.

```
> t.test(A,B,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: A and B
t = -0.89165, df = 4, p-value = 0.423
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -3.332188  1.712188
sample estimates:
mean of x mean of y
    4.29    5.10
```

Como $p\text{-value} = 0,423$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à tração após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada quando comparamos as amostras A e B.

```
> var.test(A,C)
```

```
F test to compare two variances
```

```
data: A and C
F = 3.3285, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.4621
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.08534651 129.81204616
sample estimates:
ratio of variances
    3.328514
```

Como $p\text{-value} = 0,4621$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância A = variância C.

```
> t.test(A,C,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: A and C
t = -0.89014, df = 4, p-value = 0.4237
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -3.157976  1.624643
sample estimates:
mean of x mean of y
 4.290000  5.056667
```

Como $p\text{-value} = 0,4237$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à tração após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada quando comparamos as amostras A e C.

```
> var.test(B,C)
```

```
F test to compare two variances
```

```
data: B and C
```

```
F = 1.4868, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.8043
```

```
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
0.03812241 57.98418050
```

```
sample estimates:
```

```
ratio of variances
```

```
1.486774
```

Como $p\text{-value} = 0,8043$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância B = variância C.

```
> t.test(B,C,var.equal=TRUE)
```

```
Two Sample t-test
```

```
data: B and C
```

```
t = 0.066378, df = 4, p-value = 0.9503
```

```
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
-1.769194 1.855860
```

```
sample estimates:
```

```
mean of x mean of y
```

```
5.100000 5.056667
```

Como $p\text{-value} = 0,9503$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à tração após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada quando comparamos as amostras B e C.

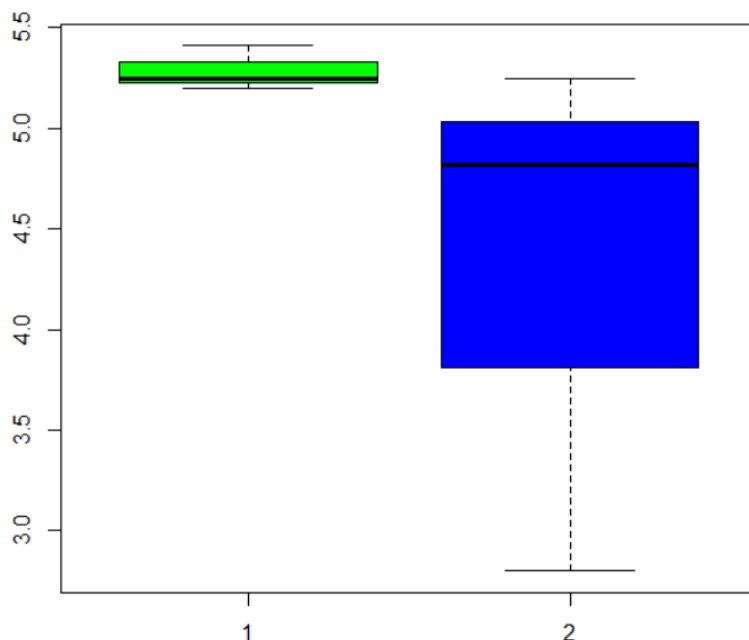
Apêndice L – Análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral apenas da argamassa REF.

- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

A: resistência à tração das 3 amostras de REF após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

B: resistência à tração das 3 amostras de REF após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

```
> A<-c(5.41,5.25,5.20)
> B<-c(5.25,2.80,4.82)
> boxplot(A,B,col=c("green","blue"))
```



Não há outliers para os grupos A e B.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```
> shapiro.test(A)

Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.9162, p-value = 0.4391
```

```
> shapiro.test(B)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.87689, p-value = 0.3153
```

Como p-value > 0,05, então os grupos A e B seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

```
> var.test(A,B)

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 0.0070317, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.01397
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.0001802998 0.2742359610
sample estimates:
ratio of variances
 0.007031691
```

Como p-value = 0,01397, então p-value < 0,05 e variância A ≠ variância B.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: resistência à tração de B < resistência à tração de A.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: resistência à tração de B > resistência à tração de A.

```
> t.test(A,B,mu=0,alternative="less",var.equal=FALSE)

      Welch Two Sample t-test

data:  A and B
t = 1.315, df = 2.0281, p-value = 0.8412
alternative hypothesis: true difference in means is less than 0
95 percent confidence interval:
 -Inf 3.188997
sample estimates:
mean of x mean of y
 5.286667  4.290000
```

Como p-value = 0,8412 e p-value > 0,05, então a hipótese nula é verdadeira. A resistência à tração de B é menor do que a resistência à tração de A.

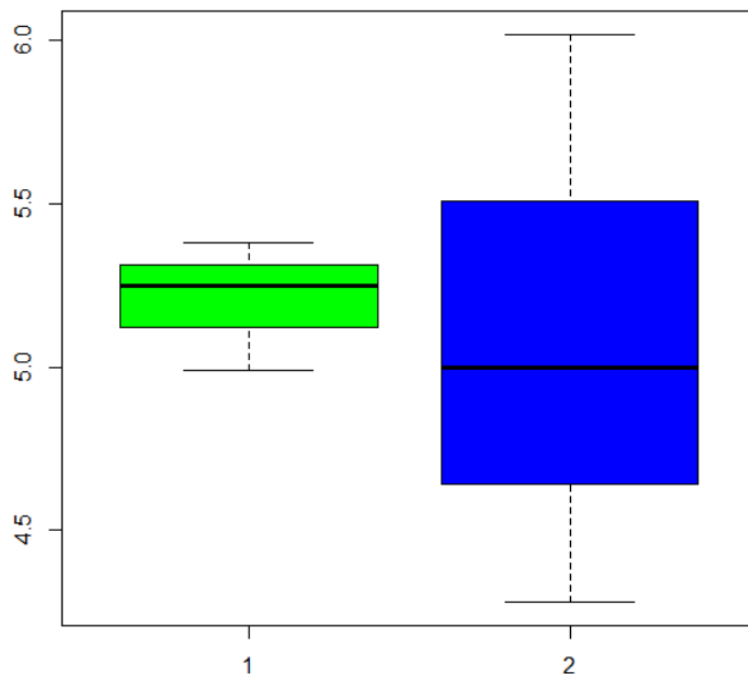
Apêndice M – Análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral apenas da argamassa 0,03% OG.

- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

A: resistência à tração das 3 amostras de 0,03%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

B: resistência à tração das 3 amostras de 0,03%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

```
> A<-c(5.25,4.99,5.38)
> B<-c(6.02,4.28,5.00)
> boxplot(A,B,col=c("green","blue"))
```



Não há outliers para os grupos A e B.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```
> shapiro.test(A)

Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.96429, p-value = 0.6369
```

```
> shapiro.test(B)

Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.99019, p-value = 0.8105
```

Como $p\text{-value} > 0,05$, então os grupos A e B seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

H_0 (hipótese nula) $p\text{-value} > 0,05$: Não existem diferenças na resistência à tração para argamassa 0,03%OG.

H_1 (hipótese alternativa) $p\text{-value} < 0,05$: Existem diferenças na resistência à tração para argamassa 0,03%OG.

```
> var.test(A,B)

F test to compare two variances

data:  A and B
F = 0.051587, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.09811
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.001322751 2.011904762
sample estimates:
ratio of variances
 0.0515873
```

Como $p\text{-value} = 0,09811$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância A = variância B.

```
> t.test(A,B,var.equal=TRUE)

Two Sample t-test

data:  A and B
t = 0.20607, df = 4, p-value = 0.8468
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -1.330514  1.543848
sample estimates:
mean of x mean of y
 5.206667  5.100000
```

Como $p\text{-value} = 0,8468$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à tração quando comparamos as amostras A e B.

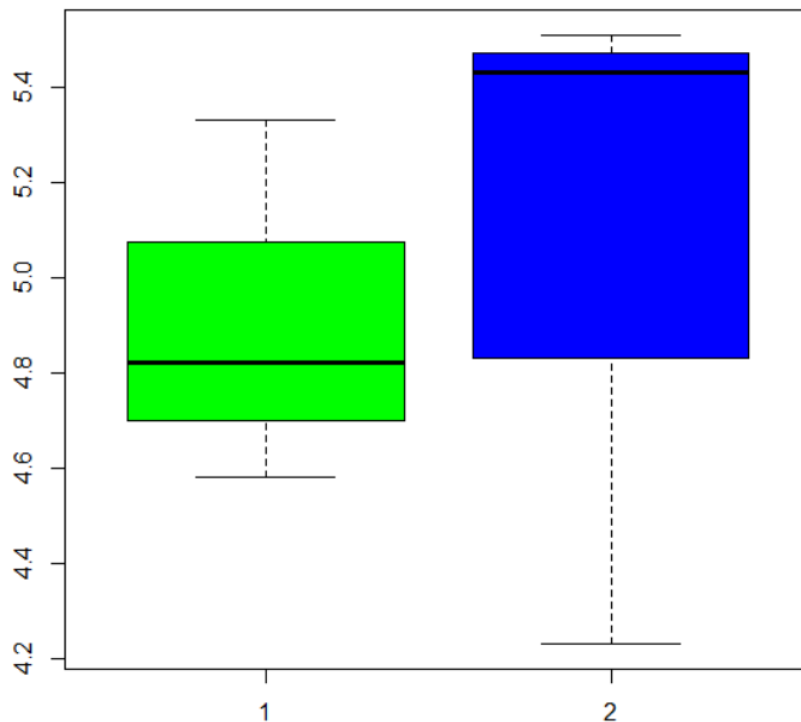
Apêndice N – Análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral apenas da argamassa 0,05% OG.

- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

A: resistência à tração das 3 amostras de 0,05%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.

B: resistência à tração das 3 amostras de 0,05%OG após 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada.

```
> A<-c(5.33,4.58,4.82)
> B<-c(5.43,5.51,4.23)
> boxplot(A,B,col=c("green","blue"))
```



- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```
> shapiro.test(A)

Shapiro-Wilk normality test

data:  A
W = 0.95859, p-value = 0.6086
```

```
> shapiro.test(B)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  B
W = 0.79668, p-value = 0.1066
```

Como $p\text{-value} > 0,05$, então os grupos A e B seguem uma distribuição normal. Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student.

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

H_0 (hipótese nula) $p\text{-value} > 0,05$: Não existem diferenças na resistência à tração para argamassa 0,05%OG.

H_1 (hipótese alternativa) $p\text{-value} < 0,05$: Existem diferenças na resistência à tração para argamassa 0,05%OG.

```
> var.test(A,B)

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 0.28533, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.444
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.00731627 11.12804720
sample estimates:
ratio of variances
 0.2853345
```

Como $p\text{-value} = 0,0444$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância A = variância B.

```
> t.test(A,B,var.equal=TRUE)

      Two Sample t-test

data:  A and B
t = -0.3125, df = 4, p-value = 0.7703
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -1.449757  1.156423
sample estimates:
mean of x mean of y
 4.910000  5.056667
```

Como $p\text{-value} = 0,7703$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. Não se pode afirmar que há diferenças na resistência à tração quando comparamos as amostras A e B.

Apêndice O – Resultados das medidas de profundidade de carbonatação das amostras submetidas à 28 dias de carbonatação acelerada após 35 dias de cura.

Profundidade de carbonatação (mm) - REF – 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada				
CP	Medição	Valor		
1	1	3,6		
	2	3,5		
	3	3,8		
	4	3,8		
2	1	3,5		
	2	3,3		
	3	3,6		
	4	3,1		
3	1	3,0		
	2	3,8		
	3	3,9		
	4	3,5		
4	1	3,5	Média	3,64
	2	4,1	Coef. de carbonat.	13,15
	3	4,0	Desvio Padrão	0,27
	4	5,1	Coef. de variação	7,5%

Profundidade de carbonatação (mm) - 0,03%OG – 35 dias de cura e 28 dias de carbonatação acelerada				
CP	Medição	Valor		
1	1	3,9		
	2	4,4		
	3	3,5		
	4	4,7		
2	1	7,3		
	2	7,4		
	3	7,0		
	4	7,7		
3	1	4,7		
	2	6,4		
	3	5,8		
	4	5,2		
4	1	4,5	Média	5,45
	2	4,6	Coef. de carbonat.	19,68
	3	5,5	Desvio Padrão	1,33
	4	4,6	Coef. de variação	24,4%
RESUMO – 16 medidas				

Profundidade de carbonatação (mm) - 0,05%OG - 28 dias de carbonatação acelerada				
CP	Medição	Valor		
1	1	3,5		
	2	3,8		
	3	3,8		
	4	3,7		
2	1	2,8		
	2	5,5		
	3	6,1		
	4	3,3		
3	1	3,0		
	2	4,0		
	3	5,2		
	4	4,1		
4	1	4,4	RESUMO – 14 medidas	
	2	2,5	Média	3,70
	3	3,4	Coef. de carbonat.	13,36
	4	4,3	Desvio Padrão	0,70
			Coef. de variação	19,0%

- Corpos de prova REF – 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.



CP 1/4



CP 2/4



CP 3/4



CP 4/4

- Corpos de prova REF – 28 dias de carbonatação acelerada.



CP 1/4



CP 2/4



CP 3/4



CP 4/4

- Corpos de prova 0,03%OG – 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.



CP 1/4



CP 2/4



CP 3/4



CP 4/4

- Corpos de prova REF – 0,03%OG dias de carbonatação acelerada.



CP 1/4



CP 2/4



CP 3/4

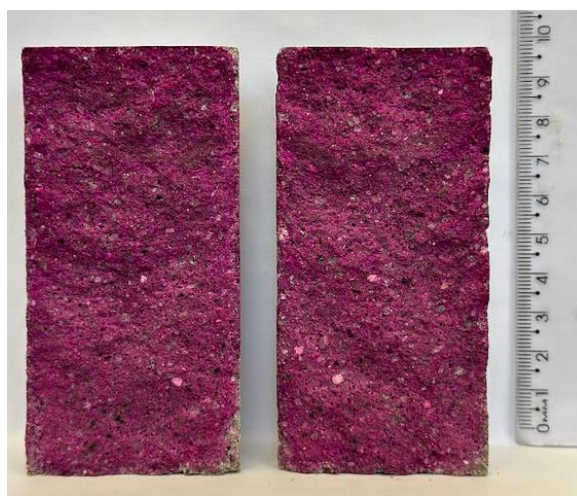


CP 4/4

- Corpos de prova 0,05%OG – 28 dias de carbonatação em ambiente de laboratório.



CP 1/4



CP 2/4



CP 3/4



CP 4/4

- Corpos de prova 0,05%OG – dias de carbonatação acelerada.



CP 1/4



CP 2/4



CP 3/4



CP 4/4

Apêndice P – Análise estatística dos resultados das medidas de profundidade de carbonatação das amostras submetidas à 28 dias de carbonatação acelerada após 35 dias de cura.

- 1º passo – Verificação da existência de outliers.

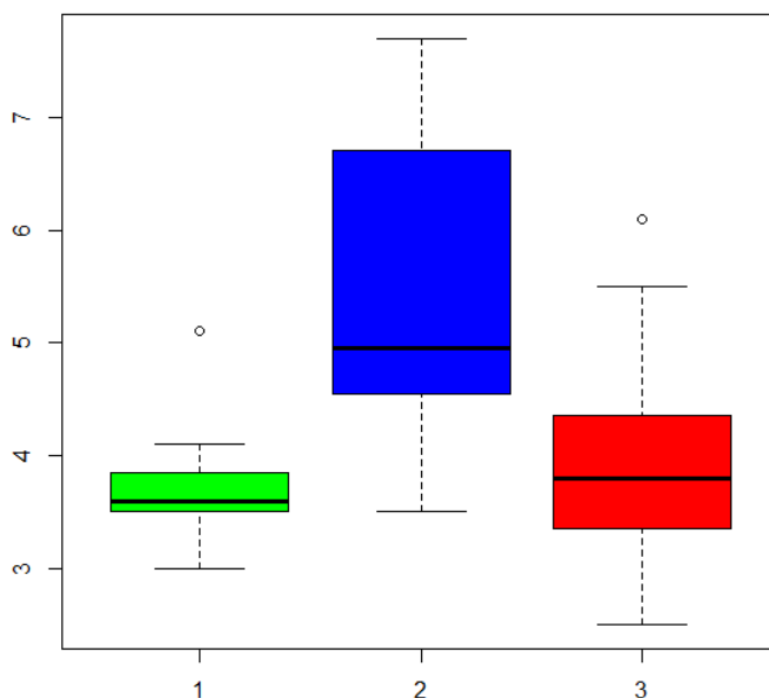
A: 16 medidas de profundidade de carbonatação das 4 amostras de REF, após 28 dias de carbonatação acelerada.

B: 16 medidas de profundidade de carbonatação das 4 amostras de 0,03%OG após 28 dias de carbonatação acelerada.

C: 16 medidas de profundidade de carbonatação das 4 amostras de 0,05%OG após 28 dias de carbonatação acelerada.

```
> A<-c(3.6,3.5,3.8,3.8,3.5,3.3,3.6,3.1,3.0,3.8,3.9,3.5,3.5,4.1,4.0,5.1)
> B<-c(3.9,4.4,3.5,4.7,7.3,7.4,7.0,7.7,4.7,6.4,5.8,5.2,4.5,4.6,5.5,4.6)
> C<-c(3.5,3.8,3.8,3.7,2.8,5.5,6.1,3.3,3.0,4.0,5.2,4.1,4.4,2.5,3.4,4.3)

> boxplot(A,B,C,col=c("green","blue","red"))
```

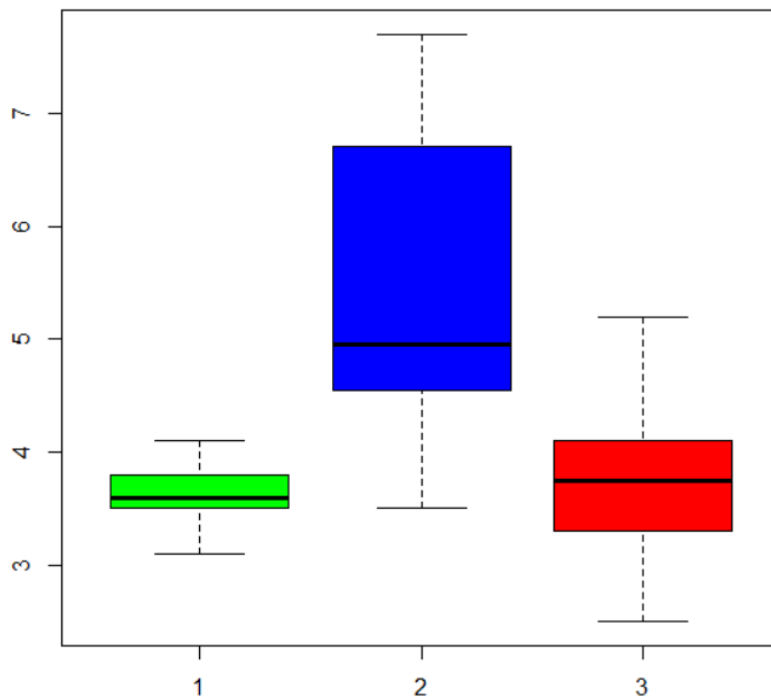


Verificou-se a existência de outliers nos grupos A, B e C. Para dar continuidade na análise, os outliers foram retirados dos grupos e uma nova verificação foi realizada.

Novas amostras sem outliers:

```
> A<-c(3.6,3.5,3.8,3.8,3.5,3.3,3.6,3.1,3.8,3.9,3.5,3.5,4.1,4.0)
> B<-c(3.9,4.4,3.5,4.7,7.3,7.4,7.0,7.7,4.7,6.4,5.8,5.2,4.5,4.6,5.5,4.6)
> C<-c(3.5,3.8,3.8,3.7,2.8,3.3,3.0,4.0,5.2,4.1,4.4,2.5,3.4,4.3)
```

```
> boxplot(A,B,C,col=c("green","blue","red"))
```



Não há outliers para os grupos A, B e C.

- 2º passo – Teste de normalidade.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: Distribuição normal.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: Distribuição não é normal.

```
> shapiro.test(A)
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: A
```

```
W = 0.96348, p-value = 0.7797
```

```
> shapiro.test(B)
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: B
```

```
W = 0.91484, p-value = 0.1393
```

```
> shapiro.test(C)
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: C
```

```
W = 0.98519, p-value = 0.9946
```

Como p-value > 0,05, então os grupos A, B e C seguem uma distribuição normal.

Logo, pode-se aplicar o teste de t-Student

- 3º passo – Aplicação do teste de t-Student.

```
> var.test(A,B)
```

```

      F test to compare two variances

data:  A and B
F = 0.042326, num df = 13, denom df = 15, p-value = 1.073e-06
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.01447086 0.12920883
sample estimates:
ratio of variances
 0.0423259

```

Como p-value = 0,000001073, então p-value < 0,05 e variância A ≠ variância B.

H0 (hipótese nula) p-value > 0,05: profundidade média de carbonatação de A < profundidade média de carbonatação de B.

H1 (hipótese alternativa) p-value < 0,05: profundidade média de carbonatação de A > profundidade média de carbonatação de B.

```
> t.test(B,A,mu=0,alternative="less",var.equal=FALSE)
```

```

      Welch Two Sample t-test

data:  B and A
t = 5.3055, df = 16.442, p-value = 1
alternative hypothesis: true difference in means is less than 0
95 percent confidence interval:
 -Inf 2.400842
sample estimates:
mean of x mean of y
 5.450000  3.642857

```

Como p-value = 1 e p-value > 0,05, então a hipótese nula é verdadeira. A profundidade média de carbonatação de A é menor do que a profundidade média de carbonatação de B.

```
> var.test(A,C)
```

```

      F test to compare two variances

data:  A and C
F = 0.15223, num df = 13, denom df = 13, p-value = 0.001768
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.04887011 0.47420856
sample estimates:
ratio of variances
 0.1522321

```

Como p-value = 0,001768, então p-value > 0,05 e variância A ≠ variância C.

H0 (hipótese nula) $p\text{-value} > 0,05$: profundidade média de carbonatação de A < profundidade média de carbonatação de C.

H1 (hipótese alternativa) $p\text{-value} < 0,05$: profundidade média de carbonatação de A > profundidade média de carbonatação de C.

```
> t.test(C,A,mu=0,alternative="less",var.equal=FALSE)

Welch Two Sample t-test

data: C and A
t = 0.28388, df = 16.868, p-value = 0.61
alternative hypothesis: true difference in means is less than 0
95 percent confidence interval:
 -Inf 0.4074672
sample estimates:
mean of x mean of y
 3.700000  3.642857
```

Como $p\text{-value} = 0,61$ e $p\text{-value} > 0,05$, então a hipótese nula é verdadeira. A profundidade média de carbonatação de A é menor do que a profundidade média de carbonatação de C.

```
> var.test(B,C)

F test to compare two variances

data: B and C
F = 3.5967, num df = 15, denom df = 13, p-value = 0.02571
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 1.178187 10.519906
sample estimates:
ratio of variances
 3.596667
```

Como $p\text{-value} = 0,02571$, então $p\text{-value} > 0,05$ e variância B $\neq$ variância C.

H0 (hipótese nula) $p\text{-value} > 0,05$: profundidade média de carbonatação de B < profundidade média de carbonatação de C.

H1 (hipótese alternativa) $p\text{-value} < 0,05$: profundidade média de carbonatação de B > profundidade média de carbonatação de C.

```
> t.test(C,B,mu=0,alternative="less",var.equal=FALSE)

Welch Two Sample t-test

data: C and B
t = -4.5826, df = 23.329, p-value = 6.384e-05
alternative hypothesis: true difference in means is less than 0
95 percent confidence interval:
 -Inf -1.095896
sample estimates:
mean of x mean of y
 3.70      5.45
```

Como $p\text{-value} = 0,00006384$ e $p\text{-value} < 0,05$, então a hipótese alternativa é verdadeira. A profundidade média de carbonatação de B é maior do que a profundidade média de carbonatação de C.