

**JANAÍNE CONCEIÇÃO SANTOS**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE  
DURABILIDADE DE ARGAMASSAS DE  
REPARO COM AGREGADO RECICLADO E  
ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO**

**Dissertação de Mestrado**

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, dezembro de 2022

S237p Santos, Janaína Conceição  
Propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas de reparo com agregado reciclado e adição de óxido de grafeno / Janaína Conceição Santos. – 2022.  
86 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.

Orientadora: Flávia Spitale Jacques Poggiali.

Bibliografia: f. 74-79.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Argamassa – Propriedades mecânicas – Teses. 2. Resíduos de demolição e construção – Teses. 3. Materiais de construção – Vida útil – Teses. 4. Materiais compostos – Teses. I. Poggiali, Flávia Spitale Jacques. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 691.9

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DE ARGAMASSAS DE  
REPARO COM AGREGADO RECICLADO E 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 parcial para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientadora: Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali**

**BELO HORIZONTE**

**2022**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JANAÍNE CONCEIÇÃO SANTOS**

**PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DE ARGAMASSAS DE REPARO COM AGREGADO RECICLADO E 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 parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 19 de dezembro de 2022

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali – Orientadora  
Departamento de Engenharia Civil - CEFET-MG

---

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

---

Prof. Dr. José Márcio Fonseca Calixto  
Departamento de Engenharia Civil - UFMG

---

Prof. Dr. Luiz Orlando Ladeira  
Departamento de Física - UFMG

Dedico este trabalho aos meus amados pais,

Antônio e Maria.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela graça da vida, pela minha saúde e pela sabedoria.

A minha orientadora Flávia Spitale Jacques Poggiali pela paciência, socorro e orientação. A todos os professores aos quais pude absorver conhecimento durante as disciplinas e em especial ao Rogério Cabral de Azevedo pelas inúmeras explicações. Ao Peter Ludvig pelas liberações de entrada no Campus em dias específicos.

Ao CEFET-MG, pela oportunidade de cursar meu tão desejado mestrado.

Ao pessoal dos laboratórios, Ivan, Adalberto, Lucas e André.

Aos meus pais, Antônio e Maria, por entenderem os momentos em que não pude estar presente. Aos meus irmãos, Sandro pelo carinho e Jaqueline pelo incentivo e por me achar capaz. Ao César por me incentivar e entender minha ausência.

A professora Maria Teresa Paulino Aguilár por ceder o espaço do Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica e ao doutorando Lucas Chaves Chiaradia pela ajuda nos ensaios de Módulo de Elasticidade e Carbonatação. E também a UFMG por liberarem o maquinário para realização dos referidos ensaios.

Agradeço também a doutoranda Laísa do Rosário Souza Carneiro, pelo apoio e correções e a doutoranda Camila Lacerda Gomes pela doação de aditivo e cimento.

À empresa Metform S.A. por me liberar do trabalho conforme a necessidade das minhas tarefas. À LBL Consultoria por entenderem os momentos nos quais não pude estar trabalhando.

Agradeço a CAPES pelo incentivo a pesquisa.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

## RESUMO

Os resíduos da construção contribuem significativamente para a poluição do meio ambiente. A construção civil busca por inovações que aumentem o desempenho de seus materiais, reduzam seus custos e garantam sua sustentabilidade. As argamassas são um tipo de compósito cimentício comumente utilizado para assentamento de tijolos, placas cerâmicas, revestimentos e reparos em estruturas. O uso de agregado miúdo reciclado no traço de argamassas tem se mostrado uma alternativa para a destinação dos resíduos de construção e demolição. No entanto, a substituição do agregado natural por agregados de RCD compromete as resistências à compressão, tração e flexão, bem como a durabilidade da argamassa. Nesse sentido, a incorporação de pequenas quantidades de óxido de grafeno (OG) em argamassas teria o potencial de melhorar suas propriedades mecânicas e de durabilidade. O presente trabalho propôs a avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas confeccionadas com substituição de 100% dos agregados naturais pelos agregados de resíduos de construção e demolição (RCD), e adição de óxido de grafeno em dois teores de 0,05% e 0,10% (da massa de cimento). As argamassas foram confeccionadas em quatro traços: com agregado natural, com agregado de RCD, com agregado de RCD e adição de 0,05% de OG e com agregado de RCD e adição de 0,1% de OG. Os ensaios realizados abrangeram a resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, absorção de água e carbonatação. Os resultados dos ensaios indicam que a substituição do agregado natural por agregado de RCD mais adição de OG em argamassas de reparo resultaram no aumento da resistência à compressão (21%), da resistência à tração na flexão (10%), do módulo de elasticidade (6%) e na diminuição da absorção de água (7%) comparada à argamassa de RCD. Porém, houve um aumento na frente de carbonatação (14%), visto que a argamassa R já havia apresentado menor frente de carbonatação do que a argamassa N.

**Palavras-chave:** argamassa; carbonatação; durabilidade; óxido de grafeno; propriedades mecânicas; resíduos da construção e demolição.

## ABSTRACT

In the last few decades, the construction sector has experienced intense development, culminating in large amounts of waste, especially derived from demolition and construction activities. The construction industry is continuously searching for innovations, performance gain, cost reduction, and sustainability. The use of the recycled fine aggregate, made from construction and demolition waste, has proved to be an alternative for incorporated in the composition of the mortar. However, the replacement of natural aggregate by RCD aggregates, as long as the mechanical strength and durability of the mortar decrease issue was solved. In this sense, small additions of graphene oxide (GO) could have the potential to improve the mechanical performance and durability of mortars. The improvement of the mechanical properties and durability could encourage the construction industry to use, furthermore would support to reduce the depletion of available natural resources. This work evaluates the mechanical and durability properties of mortars, made up of 100% of replacement of the natural aggregates to recycled aggregates, and graphene oxide added in two levels of 0.05% and 0.10% (of the cement mass). The mortars were made in four types: natural aggregate, RCD aggregate, RCD aggregate an addition of 0.05% of OG and RCD aggregate an addition of 0.1% of OG. The tests carried out covered the compressive strength, flexural tensile strength, modulus of elasticity, water absorption and carbonation. The results of the tests indicate that the replacement of natural aggregate by RCD aggregate plus the addition of OG in repair mortars resulted in an increase in compressive strength (21%), flexural tensile strength (10%), modulus of elasticity (6%) and decrease in the water absorption (7%) compared to RCD mortar. However, there was an increase in the carbonation front (14%), since the mortar R had already obtainable a smaller carbonation than mortar N.

**Keywords:** construction and demolition waste; graphene oxide; mortar; mechanical properties; durability.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Demonstração do crescimento dos produtos de hidratação do cimento por parte do OG.....	29
<b>Figura 2</b> - Fluxograma das etapas da pesquisa.....	47
<b>Figura 3</b> - Estação de reciclagem de entulho. ....	48
<b>Figura 4</b> - Preparação do agregado de RCD. a) agregado de RCD sendo lavado após o peneiramento na malha 4,75mm. b) peneiramento na malha 0,15mm para retirada da água do agregado de RCD. c) espalhamento do material lavado nas cubas. d) material quarteado para colocação na estufa.....	49
<b>Figura 5</b> - Corpos de prova devidamente identificados durante a cura. ....	53
<b>Figura 6</b> - Prensa universal para ensaios de resistência mecânica.....	54
<b>Figura 7</b> - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade.....	55
<b>Figura 8</b> - A frequência ressonante foi obtida na leitura do painel.....	56
<b>Figura 9</b> - Quantidade e tipo do agregado de RCD. ....	58
<b>Figura 10</b> - Curva granulométrica dos agregados miúdos naturais e RCD. ....	59
<b>Figura 11</b> - Curva de inchamento dos agregados com identificação do coeficiente de inchamento.....	60
<b>Figura 12</b> – Ensaio na argamassa R com espalhamento de 220mm. ....	61
<b>Figura 13</b> - Resultado do ensaio de resistência à compressão das argamassas com agregado natural, com agregado de RCD e agregado de RCD com diferentes teores de OG (0,05% e 0,1%). ....	62
<b>Figura 14</b> - Corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão. ....	64
<b>Figura 15</b> - Resultado do ensaio de resistência à tração na flexão das argamassas com agregado natural, com agregado de RCD e agregado de RCD com diferentes teores de OG (0,05% e 0,1%). ....	65
<b>Figura 16</b> - Resultado do ensaio do módulo de elasticidade das argamassas com agregado natural, com agregado de RCD e agregado de RCD com diferentes teores de OG (0,05% e 0,1%). ....	66
<b>Figura 17</b> - Resultado do ensaio de absorção de água das argamassas com agregado natural, com agregado de RCD e agregado de RCD com diferentes teores de OG (0,05% e 0,1%).....	67

<b>Figura 18</b> - Profundidade de penetração do CO <sub>2</sub> das argamassas com agregado natural, com agregado de RCD e agregado de RCD com diferentes teores de OG (0,05% e 0,1%).....	69
<b>Figura 19</b> - Análise da absorção de água x carbonatação. ....	70
<b>Figura 20</b> - Amostras após a aspensão de fenolftaleína. ....	70

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Resistência à compressão de argamassa com agregado natural e reciclado. .....	32
<b>Tabela 2</b> - Resistência à compressão de argamassa com reciclado de RCD. ....	33
<b>Tabela 3</b> - Desempenho da resistência à compressão nas argamassas com adição de OG.....	34
<b>Tabela 4</b> - Desempenho da resistência à compressão nas argamassas recicladas com adição de OG. ....	36
<b>Tabela 5</b> - Desempenho da resistência à tração nas argamassas com adição de OG. .....	37
<b>Tabela 6</b> - Resistência à flexão de argamassas com agregado natural e agregado reciclado.....	38
<b>Tabela 7</b> - Desempenho da resistência à flexão das argamassas com adição de OG. .....	40
<b>Tabela 8</b> - Desempenho da resistência à flexão nas argamassas recicladas com adição de OG. ....	41
<b>Tabela 9</b> - Composição química do cimento.....	50
<b>Tabela 10</b> - Propriedades físicas do cimento.....	50
<b>Tabela 11</b> - Propriedades do óxido de grafeno BoomaTech.....	50
<b>Tabela 12</b> - Análise dos elementos químicos presentes no óxido de grafeno. ....	50
<b>Tabela 13</b> - Características do aditivo superplastificante.....	51
<b>Tabela 14</b> - Traço definido para as argamassas.....	52
<b>Tabela 15</b> - Porcentagem acumulada retida de agregados naturais e RCD.....	58
<b>Tabela 16</b> - Massa específica e massa unitária dos agregados miúdos.....	59
<b>Tabela 17</b> - Resultados do Espalhamento para as argamassas N, R, R <sub>0,05OG</sub> e R <sub>0,10G</sub> .....	61
<b>Tabela 18</b> - Compacidade das argamassas N e R. ....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- AFM – Microscópio de Força Atômica
- BR – Brasil
- CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CEFET – Centro Federal de Educação Tecnológica
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais
- CP – Corpo de Prova
- CPV – ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
- MG – Minas Gerais
- NBR – Norma Brasileira
- OG – Óxido de Grafeno
- PBH – Prefeitura de Belo Horizonte
- pH – Potencial Hidrogeniônico
- PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
- PROAP – Programa de Apoio à Pós-Graduação
- RCD – Resíduos de Construção e Demolição
- SINDUSCON – Sindicato da Indústria da Construção Civil
- SP – Superplastificante
- UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
- UPRV – Unidades de Recebimento de Pequenos Volumes

**LISTA DE SÍMBOLOS**

% – porcentagem  
°C – grau Celsius  
cm – centímetro  
cm<sup>2</sup>/g – centímetro quadrado por grama  
fck – *feature compression know*  
g – Grama  
GPa – Giga Pascal  
g/cm<sup>3</sup> – grama por centímetro cúbico  
Hz – Hertz  
kg – quilograma  
kHz – quilo Hertz  
kg/m<sup>3</sup> – quilograma por metro cúbico  
km – quilometro  
kN – quilo Newton  
m – metro  
mm – milímetro  
MPa – Mega Pascal  
m<sup>2</sup>/g – metro quadrado por grama  
m<sup>2</sup>/kg – metro quadrado por quilograma  
µm – micrômetro  
N/s – Newton por segundo  
nm – nanômetro  
t/m<sup>2</sup> – tonelada por metro ao quadrado  
TPa – Tera Pascal

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVO.....	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivo Específico.....	19
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	20
1.3	RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	21
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2	REVISÃO TEÓRICA.....	23
2.1	ARGAMASSAS.....	23
2.2	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	24
2.3	ARGAMASSA COM AGREGADO RECICLADO.....	25
2.4	ÓXIDO DE GRAFENO.....	27
2.5	ARGAMASSA COM ÓXIDO DE GRAFENO.....	28
2.6	PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS.....	31
2.6.1	Resistência à compressão.....	31
2.6.1.1	Resistência à compressão de argamassas com agregado reciclado.....	31
2.6.1.2	Resistência à compressão de argamassas com agregado natural e adição de óxido de grafeno.....	33
2.6.1.3	Resistência à compressão de argamassas com agregado reciclado e adição de óxido de grafeno.....	34
2.6.2	Resistência à tração por compressão diametral de argamassas com agregado natural e adição de óxido de grafeno.....	36
2.6.3	Resistência à flexão.....	37
2.6.3.1	Resistência à flexão de argamassas com agregado reciclado.....	37
2.6.3.2	Resistência à flexão de argamassas com agregado natural e adição de óxido de grafeno.....	38

2.6.3.3 Resistência à flexão de argamassas com agregado reciclado e adição de óxido de grafeno.....	40
2.6.4 Módulo de Elasticidade.....	41
2.6.4.1 Módulo de Elasticidade de argamassas com agregado natural e adição de óxido de grafeno.....	42
2.6.4.2 Módulo de Elasticidade de argamassas com agregado reciclado e adição de óxido de grafeno.....	43
2.7 PROPRIEDADES DE DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS.....	43
2.7.1 Absorção de água.....	43
2.7.2 Carbonatação .....	44
2.7.2.1 Carbonatação de argamassas de argamassas com agregado natural e adição de óxido de grafeno .....	44
3 MATERIAIS E MÉTODO .....	46
3.1 MÉTODO DE ABORDAGEM.....	46
3.2 MÉTODO DE PROCEDIMENTOS.....	47
3.2.1 Parametrização dos teores de óxido de grafeno.....	47
3.2.2 Obtenção dos materiais .....	48
3.2.2.1 Agregado natural.....	48
3.2.2.2 Agregado de RCD.....	48
3.2.2.3 Cimento.....	49
3.2.2.4 Óxido de grafeno.....	50
3.2.2.5 Superplastificante.....	51
3.2.2.6 Água.....	51
3.2.3 Caracterização dos materiais.....	51
3.2.3.1 Agregado natural.....	51
3.2.3.2 Agregado RCD.....	51
3.2.4 Consistência da argamassa de cimento .....	52

3.2.5	Definição do traço e moldagem dos corpos de prova das argamassas .....	52
3.2.6	Ensaio de resistência mecânica e de durabilidade .....	54
3.2.6.1	Resistência à compressão .....	54
3.2.6.2	Resistência à tração na flexão .....	54
3.2.6.3	Módulo de elasticidade .....	55
3.2.6.4	Absorção de água .....	56
3.2.6.5	Carbonatação .....	56
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	58
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	58
4.1.1	Granulometria do agregado miúdo natural e do agregado de RCD.....	58
4.1.2	Massa específica e massa unitária do agregado miúdo natural e agregado de RCD 59	
4.1.3	Determinação do inchamento do agregado de RCD .....	60
4.2	CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA DE CIMENTO .....	60
4.3	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA .....	62
4.3.1	Resistência à compressão .....	62
4.3.2	Resistência à tração na flexão .....	64
4.3.3	Módulo de elasticidade .....	66
4.4	ENSAIOS DE Durabilidade .....	67
4.4.1	Absorção de água.....	67
4.4.2	Carbonatação .....	68
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	72
	REFERÊNCIAS.....	73
	ANEXO.....	79

## 1 INTRODUÇÃO

As últimas décadas foram marcadas por intenso crescimento no setor da construção civil. Como consequência, foram geradas grandes quantidades de resíduos, oriundos da demolição e da própria construção. Os resíduos da construção colaboram para a poluição ambiental, sobretudo pela falta de diretrizes que tratem da disposição final desses resíduos (DIMOV *et al.*, 2018).

Os compósitos cimentícios são os materiais mais utilizados ao redor do mundo na indústria da construção civil devido à sua alta disponibilidade, custo-eficiência e elevada resistência à compressão. Usualmente, os materiais cimentícios são expostos às agressividades físicas e químicas como intempéries, carbonatação, ataques ácidos e o próprio uso da edificação, que comprometem suas propriedades mecânicas e de durabilidade (YAN *et al.*, 2020).

De modo geral, as argamassas utilizadas no reparo de estruturas de concreto para reconstituição geométrica de elementos estruturais em processos de recuperação devem apresentar boa trabalhabilidade, aderência ao concreto e armadura originais, baixa retração, resistência mecânica e baixa permeabilidade e absorção de água (durabilidade) (IBRACON, 2017).

A última década revelou alguns nanomateriais emergentes, como nanotubos de carbono (TYSON *et al.*, 2011), nanofibras de carbono (AN *et al.*, 2018) e óxido de grafeno (WANG *et al.*, 2015). Esses nanomateriais fornecem um reforço para melhorar as propriedades dos materiais cimentícios, diferentemente dos reforços tradicionais, como barras de aço que são feitos na macroestrutura, os nanomateriais atuam na microestrutura tornando-a mais densa (MOHAMMED *et al.*, 2015).

Os nanomateriais compostos de carbono (nanotubos de carbono, por exemplo) mostraram limitações, como fazer uma ligação completa com materiais cimentícios, devido à falta de área interfacial entre eles (HO *et al.*, 2020). Já a adição de nanopartículas de óxido de grafeno possui uma área de superfície grande e, juntamente com os grupos funcionais de oxigênio presentes nas bordas da superfície do OG, aumenta a interação do material com os produtos de hidratação do cimento, produzindo uma reação química alcalina que acelera essa hidratação e preenche os poros da pasta (AN *et al.*, 2018).

O desempenho mecânico de materiais cimentícios pode ser melhorado através da incorporação de óxido de grafeno, o qual proporciona um efeito de preenchimento de

vazios, uma vez que atua como agente de nucleação, favorecendo a formação de produtos de hidratação e possibilitando uma distribuição mais uniforme destes (CHU *et al.*, 2020). Os poros existentes nas argamassas de cimento, muitas vezes deixados pela água após evaporação, fornecem canais para a penetração de água e íons cloreto que degradam a durabilidade do material, a adição de óxido de grafeno otimiza a distribuição dos vazios, reduzindo a porosidade e, conseqüentemente, deixando a argamassa compacta (QI *et al.*, 2021).

O óxido de grafeno é uma possível solução para regular a microestrutura de materiais cimentícios, devido à sua significativa área de superfície, funcionalidades (atuar como agente de nucleação e tornar a estrutura densa) e boa dispersão em solventes aquosos. Esse material tem mostrado um promissor resultado quando usado para reforço em diferentes tipos de matrizes (SHARMA; KOTHIYAL, 2015).

Além de incentivar a descoberta de novos produtos, a indústria da construção civil tem voltado sua atenção à gestão de resíduos de construção e demolição (RCD). Visto que, o processo de beneficiamento de agregados utiliza, principalmente, a energia elétrica para acionamento de motores elétricos, britadores, esteiras, peneiras vibratórias e iluminação (MALTA; SILVA; GONÇALVES, 2013). A queima de combustível, utilizada para a produção dos agregados, também é responsável por emissões de gases como CO<sub>2</sub>. As análises feitas por Long *et al.* (2018) estimou-se um total de 1,34 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> poderiam deixar de ser emitidos se o agregado natural fosse completamente trocado pelo agregado reciclado em argamassas com óxido de grafeno. Além disso, temos como umas das principais vantagens a redução na extração de agregado miúdo da natureza.

A incorporação de agregado miúdo reciclado na argamassa, geralmente, necessita de maior quantidade de água na mistura devido à porosidade elevada do agregado (NENO *et al.*, 2014). O agregado miúdo reciclado altera a trabalhabilidade, a resistência mecânica e a durabilidade de materiais cimentícios, pois, este agregado miúdo reciclado muitas vezes está mais susceptível à contaminação com substâncias estranhas, além de possuir uma porosidade maior do que o agregado natural. (KATZ; KULISCH, 2017).

Além disso, a argamassa preparada com agregado reciclado requer uma quantidade maior de água, diante do fato que do agregado absorver mais água de amassamento, do que uma argamassa com agregado natural (SEBAIBI *et al.*, 2002).

Essa absorção de água de amassamento pelo agregado de reciclado prejudica o processo de hidratação cimentícia. No entanto, segundo Wang *et al.* (2019), o OG pode promover a hidratação do cimento através de interações entre grupos de oxigênios contido em suas bordas e os produtos de hidratação do cimento.

A literatura acerca da incorporação de óxido de grafeno em argamassas confeccionadas com agregado reciclado ainda é escassa. Por isso a importância em se estudar os efeitos da melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas utilizando agregado reciclado. Este trabalho propõe dois teores de adição de óxido grafeno (0,05% e 0,10% da massa de cimento) às argamassas preparadas com 100% de agregado miúdo reciclado de RCD, e avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade deste compósito cimentício.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas preparadas com 100% de agregado miúdo reciclado de RCD em substituição do agregado natural, com incorporação de dois teores de óxido grafeno sendo 0,05% e 0,10% da massa de cimento.

### 1.1.2 Objetivo Específico

Os seguintes objetivos específicos podem ser relacionados:

- i. Definir os teores de óxido de grafeno;
- ii. Avaliar a qualidade do agregado de RCD comparada a do agregado natural;
- iii. Testar a consistência da argamassa com os traços definidos;
- iv. Verificar o quanto a adição dos dois teores de óxido de grafeno pode influenciar:
  - ❖ nas propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade;
  - ❖ nas propriedades de durabilidade como absorção de água e carbonatação das argamassas.

Os resultados foram comparados com os resultados obtidos das argamassas confeccionadas com agregado natural e agregado de RCD.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A engenharia civil está a serviço da população com intuito de garantir construções capazes de suportar sobrecargas de serviço e intempéries do meio, protegendo seus usuários. Espera-se certo desempenho da edificação relacionado à segurança, que seja habitável e durável em atendimento as exigências preconizadas em projeto. (POSSAN; DEMOLINER, 2013).

Assim, nesta dissertação buscou-se desenvolver materiais capazes de garantir as suas propriedades durante a vida útil de um empreendimento, corrigindo patologias ocasionadas pelo material e levando a uma redução nas intervenções de manutenções, gerando maior economia e satisfação dos usuários (SEGAT, 2005).

As grandes quantidades de resíduos da construção e demolição produzida pela construção civil tornaram-se um problema com vertentes social e ambiental, principalmente pelo descarte desses resíduos, sendo feita ainda em lotes vazios. A importância de se planejar as etapas de uma construção visa também à redução da geração de resíduos e desperdício de materiais (MEYER, 2009).

As argamassas com agregado reciclado apresentam um viés sustentável, pois utilizam resíduos da construção civil que por outrora foram dispensados em aterros. Contudo, essas argamassas recicladas possuem restrições na indústria da construção quanto ao uso, devido à perda de resistência mecânica e durabilidade, visto que o agregado reciclado possui uma porosidade maior do que o agregado natural e pode conter matéria orgânica (KATZ; KULISCH, 2017).

A durabilidade é umas das principais preocupações na indústria da construção, pois os materiais de construção duráveis não somente reduzem os custos com manutenções, mas também garantem a vida útil estabelecida em projeto. As argamassas, quando expostas a agentes agressivos, podem reduzir seu tempo de vida útil. No entanto, ao incorporar OG à argamassa consegue-se reduzir a penetração de agentes agressivos através do preenchimento dos poros da pasta de cimento pelo OG (SHAMSAEI *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o presente trabalho propõe um estudo em argamassas de reparo preparadas com agregado reciclado e incorporação de óxido de grafeno relacionado às propriedades mecânicas e de durabilidade.

### 1.3 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa desenvolvida foi restrita às argamassas de reparo confeccionadas com agregado reciclado, desconsiderando argamassas industrializadas e argamassas com substitutivos de cal.

A limitação, como restrição a entrada aos laboratórios, que necessitou de prévio agendamento devido ao período pandêmico ao qual passamos, e a dificuldade em obter alguns insumos atrasou o prosseguimento da parte experimental.

Essa pesquisa limitou-se a adição de óxido de grafeno em dois diferentes teores conforme identificação, por levantamento bibliográfico, dos melhores resultados de resistência mecânica e de durabilidade obtidos no meio científico.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em cinco capítulos. O capítulo 1 corresponde à introdução, apresentando o tema de pesquisa, os objetivos gerais e específicos que norteiam este trabalho, à justificativa que consolida a necessidade do presente estudo e suas restrições. Também é apresentando a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 compreende a revisão bibliográfica da literatura através de artigos que abordam os materiais presentes nesta pesquisa, com o intuito de apoiar a tomada de decisão acerca das proporções iniciais de óxido de grafeno e agregado reciclado a serem utilizadas na preparação das argamassas no presente trabalho. Uma breve análise de: argamassas, argamassas confeccionadas com agregado reciclado, sobre o nanocompósito de óxido de grafeno e argamassas com óxido de grafeno foi desenvolvida. Além de abordar as considerações encontradas na revisão da literatura sobre a resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão, módulo de elasticidade, absorção de água e carbonatação das argamassas com agregado miúdo reciclado com ou sem incorporação de óxido de grafeno.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e método utilizados nesta pesquisa. Sendo inicialmente definido os materiais e suas proporções que foram parametrizados conforme pesquisa bibliográfica. O método experimental abrange a confecção dos corpos-de-prova e os ensaios necessários para avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade da argamassa confeccionada com agregado miúdo reciclado e adição de óxido de grafeno.

O capítulo 4 abrange os resultados dos ensaios feitos em laboratório. Também são apresentadas as considerações sobre esses resultados com base na pesquisa da literatura dando possíveis explicações acerca dos resultados encontrados durante os ensaios.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre esta pesquisa bem como sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

O capítulo de revisão bibliográfica aborda conceitos, definições e pesquisas sobre argamassas, agregado miúdo reciclado, óxido de grafeno e sobre as propriedades mecânicas, módulo de elasticidade e durabilidade em argamassas.

### 2.1 ARGAMASSAS

As argamassas são misturas homogêneas de aglomerante, agregado miúdo e água, podendo conter cal ou não. As argamassas para reparo estrutural podem ser aplicadas em pilares, vigas, lajes, escadas, elementos pré-moldados e etc. Assim, essas argamassas devem apresentar elevada consistência, boa coesão e facilmente moldável. (BARAZZETTI, 2021).

As principais características das argamassas são: trabalhabilidade, resistência, aderência e durabilidade (RIBEIRO *et al.*, 2011). A trabalhabilidade é resultante da conjugação de diversas outras propriedades, tais como: consistência, plasticidade, retenção de água, consistência, coesão, exsudação, densidade de massa, adesão inicial (IBRACON, 2017). As argamassas têm como principal função a aderência, sendo dosadas em campo ou comercializadas já prontas, necessitando, neste último caso, somente da adição de água para sua mistura (ABNT NBR 13281, 2005).

Na preparação das argamassas devem ser tomados os devidos cuidados em relação à dosagem dos materiais, como aglomerantes (cimento), agregado miúdo (areia), água, e em relação ao local de preparação, e esses materiais juntos conservem as características necessárias ao uso do produto final (RIBEIRO *et al.*, 2011). Com a adição de aditivos superplastificantes, a quantidade mínima de água necessária a fim de obter uma argamassa de revestimento com boa trabalhabilidade em seu estado fresco, permitindo que as reações de hidratação do cimento aconteçam e, quando endurecidas, devem garantir aderência, resistência mecânica satisfatória, assim como absorver deformações impostas ao revestimento (TOMAZ, 2015).

A argamassa de cimento endurecida apresenta poros, muitas vezes deixados pela água após evaporação. Esses poros tornam o substrato frágil, pois o material não é compacto, isso reflete em uma capacidade de carga reduzida devido a regiões de vazios que geram quebras, ou seja, baixa resistência mecânica, diminuindo a vida útil desse material (QI *et al.*, 2021).

## 2.2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil é classificada como o segmento industrial que mais gera impacto ambiental, principalmente aqueles relacionados à geração de resíduos. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 307/2002, Artigo 2º, define os resíduos da construção civil como:

“Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha” (CONAMA, 2002).

Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004), que estabelece os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, o resíduo da construção é proveniente de implantações, reformas, reparos e demolições de obras e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolo, bloco cerâmico, concreto, solo, rocha, madeira, forro, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros, comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Conforme apontado por Azevedo *et al.* (2020), a geração de resíduos é estimada entre 0,05 e 0,15 t/m<sup>2</sup> proveniente de novas construções e de 0,470 t/m<sup>2</sup> proveniente de reformas e demolições. A grande quantidade de resíduos da construção civil é advinda da própria etapa de construção e de demolições, denominados resíduos da construção e demolição (RCD). A disposição sem gestão desses resíduos gera impactos ambientais significativos como: a disposição a céu aberto, terrenos baldios que se transformam em lixões, aumento da proliferação de insetos, obstrução de descidas de água na drenagem de ruas, etc. (SINDUSCON-MG, 2018).

No Brasil, o descarte irregular dos RCD's causa inundações devido às obstruções de galerias, assoreamento de canais, proliferação de doenças e poluição (NETO; LEITE, 2018). Existe um grande potencial para reutilização e reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD) que podem gerar subprodutos como areia, brita e rocha trincada. Os RCD's cobrem uma gama de materiais de várias origens, incluindo demolição total ou parcial de infraestrutura, edificações, fundações, como também subprodutos oriundos de novas construções (ANDRADE *et al.*, 2017). Assim, a fase, tipo e origem da construção e demolição predirá a qualidade do agregado reciclado, pois essa heterogeneidade na composição do RCD influenciará o produto reciclado

(FERREIRA *et al.*, 2020). No entanto, a gestão desses resíduos deve iniciar no planejamento de um projeto definindo as técnicas adequadas na demolição para separação e destinação desse material para que, quando processados, possam substituir o agregado natural (SECO *et al.*, 2018).

### 2.3 ARGAMASSA COM AGREGADO RECICLADO

Com a modernização contínua e o progresso da urbanização ao redor do mundo, a indústria da construção civil tem experimentado um crescente aumento, acompanhada de uma rápida depleção do material de construção em sua forma natural, particularmente as areias (CHU *et al.*, 2020). Assim, a busca por materiais que possam substituir, total ou parcialmente, o agregado tem chamado a atenção de pesquisadores, como Dimitriou *et al.* (2018), Ledesma *et al.* (2016) e Jiménez *et al.* (2013). Por outro lado, a indústria da construção gera muitos resíduos em reformas, demolições e nos processos construtivos. Diversos países como China, Rússia, México e Brasil tem recorde no aumento de resíduo reciclável. Em alguns países com economia em desenvolvimento, por falta de conhecimento e de uma estrutura regulatória suficiente que descreva uma proporção de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, não são estimulados a prática de uso de agregado reciclado (TAM *et al.*, 2018).

No Brasil, a grande parte dos RCD está compreendida nos resíduos de demolição de elementos estruturais em concreto e resíduos cerâmicos de fachadas e paredes internas (ANDRADE *et al.*, 2017). A qualidade do agregado reciclado é uma das barreiras para seu uso em larga escala, pois o processo de reciclagem necessita de regulações que garantam a qualidade desse material. Vale ressaltar que não existe uma norma brasileira específica sobre a utilização de agregado reciclado em argamassas (SANTANA; PEREIRA, 2020). Katz e Kulisch (2017) pontuam que partículas menores que 0,063 mm podem conter gesso e argila e, conseqüentemente, afetarão negativamente a qualidade do agregado reciclado. Long *et al.* (2018) salientaram em seus estudos a necessidade de umedecer o agregado miúdo reciclado antes da mistura na pasta de cimento, garantindo o envolvimento do agregado reciclado pela pasta.

De maneira geral, a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado leva a redução da trabalhabilidade da argamassa e prejudica as suas propriedades

mecânicas (FERREIRA *et al.*, 2020). Zhao *et al.* (2015) concluíram em seu estudo que, ao aumentar o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, a resistência à compressão nas argamassas diminui conforme aumentava a substituição do agregado. Geralmente, a argamassa contendo agregado reciclado necessita da mistura com maior quantidade de água por causa da maior porosidade do agregado reciclado (NENO *et al.*, 2014). A maior absorção da água de amassamento pelo agregado reciclado produz uma argamassa, no estado fresco, com consistência pastosa (menor plasticidade), ou seja, menos partículas de cimento serão hidratadas refletindo na redução das propriedades mecânicas da argamassa no estado endurecido (FERREIRA *et al.*, 2020). Além disso, com a porosidade elevada devido ao agregado reciclado, a argamassa preparada apresenta similarmente uma maior quantidade de poros, o que pode comprometer tanto sua resistência mecânica quanto sua durabilidade (CHU *et al.*, 2020). Assim, a dosagem do fator  $a/c$  deve ser controlada uma vez que tem relação com a trabalhabilidade e a resistência mecânica final (LEDESMA *et al.*, 2016a).

Miranda e Selmo (2006) analisaram o comportamento da necessidade de água (fator  $a/c$ ) sobre a composição do agregado reciclado com material fino menor que  $75\mu\text{m}$ . Os autores concluíram que o fator  $a/c$  diminuía conforme se aumentava a quantidade de RCD com maior teor de finos. Isto pode ser explicado pelo fato do agregado reciclado composto de 100% de argamassa tendo uma distribuição dos tamanhos dos grãos similar àquela do agregado natural e, conseqüentemente, chegou-se a um fator  $a/c$  (2,41) igual para ambas as argamassas de agregado natural e agregado reciclado. Já os outros dois tipos de agregados reciclados estudados pelos autores possuíam composição de 45% de argamassa com demais proporções representadas por 55% de resíduos de cerâmica para um tipo e 55% de resíduos de bloco de concreto para o segundo tipo, estes agregados demandaram um fator  $a/c$  de 1,89 e 1,77, respectivamente.

A substituição do agregado natural por agregado reciclado reduz a trabalhabilidade das argamassas. Ledesma *et al.* (2016b) garantem que a substituição cerca de 50% do agregado natural pelo agregado reciclado, sem que as propriedades mecânicas das argamassas sejam comprometidas. Porém, veem-se necessárias adições de materiais que sejam capazes de reduzir as desvantagens causadas pelo uso de materiais reciclados. O uso de aditivos do tipo superplastificantes na proporção de 1%

do peso de cimento pode reduzir o teor de água da argamassa, mantendo a trabalhabilidade e melhorando a resistência e durabilidade (MARTINEZ *et al.*, 2016).

## 2.4 ÓXIDO DE GRAFENO

O óxido de grafeno (OG) é um material bidimensional composto de camadas, produzido a partir da oxidação do grafite. As camadas singulares apresentam-se com formato irregular e espessura média de 1 nm (CHEN, *et al.*, 2015). O OG é sintetizado via esfoliação do grafite que pode ser feita através de uma suspensão coloidal e posterior esfoliação mecânica, química ou eletroquímica (BABAK *et al.*, 2014). A dispersão do óxido de grafeno tende a ser o ponto chave no alcance de melhores propriedades dos materiais cimentícios, onde os principais métodos incluem oxidação ácida, tratamento com surfactante, tratamento ultrassônico e indução elétrica (ZHAI *et al.*, 2021).

Como resultado da oxidação, as folhas de OG são densamente oxigenadas, contendo grupos funcionais do tipo hidroxila e epóxi em seus planos basais e grupos carbonila e carboxila nas bordas de suas folhas (LERF, *et al.*, 1998). A presença desses grupos torna o OG hidrofílico, tendo uma excelente dispersão em água (STANKOVICH *et al.*, 2006a). Segundo Stankovich *et al.* (2006b), a esfoliação do óxido de grafeno consiste na forma mais estável para produzir suspensões de carbono em folhas bidimensionais. O óxido de grafeno possui módulo de elasticidade de, aproximadamente, 1,0 TPa e área superficial específica em torno de 2.630 m<sup>2</sup>/g, o que é mais vantajoso quando comparadas a outros nanomateriais (REHMAN *et al.*, 2018).

A grande área de superfície e estrutura única geram vantagens que melhoram as ligações entre o óxido de grafeno e a matriz cimentícia (LU; OUYANG, 2017). A elevada área de superfície torna o OG uma opção de material dispersante para outros nanomateriais (SUN *et al.*, 2020). Assim, os nanomateriais produzem resultados efetivos ao serem misturados em materiais cimentícios, considerando uma baixa demanda de 0,03% de OG em relação ao peso do cimento), levando a um aumento na resistência à compressão, à tração e à flexão de 38,9%, 60,7% e 78,6%, respectivamente (LV *et al.*, 2013).

Um dos impasses enfrentados na construção civil é o custo associado à mudança de uma cultura de produção e popularização de um novo produto, limitando o seu uso, mesmo que este material apresente um desempenho que gere melhorias aos

materiais de construção (SHAMSAEI *et al.*, 2018). Segundo Chu *et al.* (2020), os nanomateriais ainda apresentam um elevado custo de produção e, para atender a demanda da indústria da construção civil, devem ter uma projeção de produção em larga escala. Além disso, o baixo teor de OG (menor que 1% da massa de cimento) requerido na mistura de argamassas é suficiente para trazer melhorias às propriedades mecânicas dos materiais envolvidos.

## 2.5 ARGAMASSA COM ÓXIDO DE GRAFENO

O óxido de grafeno tem se tornando um importante nanomaterial para ser utilizado como adição cimentícia, principalmente devido aos inúmeros benefícios nas propriedades e seu potencial de custo efetivo de produção em larga escala (SHARMA; KOTHIYAL, 2016).

Segundo Mohammed *et al.* (2015), a adição de óxido de grafeno em argamassas pode se dar de duas formas: em pó ou em uma dispersão coloidal de óxido de grafeno. Apesar da boa dispersão em água, o óxido de grafeno possui uma disseminação razoável das nanopartículas de carbono nas argamassas de cimento (KIM *et al.*, 2017). Devido à forte interação de *van der Waals* e a presença de grupos hidrofílicos, algumas aglomerações são formadas, sendo essencial adicionar um surfactante, como superplastificantes de policarboxilato, à mistura para melhorar a trabalhabilidade da argamassa (BABAK *et al.*, 2014).

As argamassas com adição de OG possui fluidez menor que atrapalha a trabalhabilidade e aumenta a viscosidade, sendo causados pelo tamanho das partículas e pelos componentes químicos presentes na superfície do óxido de grafeno (WANG *et al.*, 2015). Em 2020, Corso *et al.* demonstrou que a adição de óxido de grafeno interfere nas propriedades físicas das argamassas, mas não há alteração na qualidade final da argamassa, diferentemente das propriedades mecânicas.

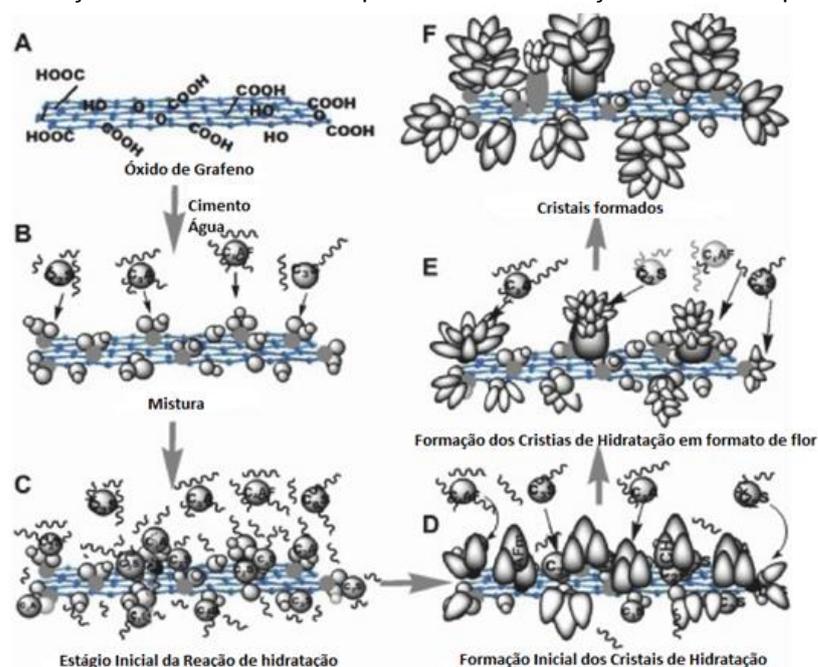
A melhoria da resistência à compressão e da resistência à flexão das argamassas com OG pode ser devido às ligações efetivas, que levam a um processo de hidratação mais eficaz (FANG *et al.*, 2017). Inicialmente, a reação de hidratação do aglomerante cimento dá origem a produtos como o hidróxido de cálcio (CH), o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), a etringita (AFt) e o monossulfato (AFm) (WANG *et al.*, 2019). Tais produtos reagem, então, com os grupos funcionais de oxigênio (carbonilas, hidroxilas

e epóxis), presentes nas extremidades superficiais do óxido de grafeno (KRYSTEK, 2019).

A argamassa de cimento endurecida apresenta poros, muitas vezes deixados pela água após evaporação. Os produtos de hidratação formados por silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e etringitas, quando suficientes, preenchem os vazios e poros, otimizando a microestrutura das argamassas (JINCHANG e YEMING, 2018).

Jinchang e Yeming (2018) analisaram a microestrutura das argamassas com OG e observaram que o OG afetou a forma de crescimento e distribuição dos produtos de hidratação do cimento. Alguns autores (AN *et al.*, 2018; CHINTALAPUDI *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2019), observaram que o OG estimula o crescimento dos produtos de hidratação do cimento, através de grupos funcionais oxigenados presentes na superfície do OG. Com o estímulo do crescimento desses produtos de hidratação do cimento por parte do OG, conforme a **Figura 1**, denominando esse efeito de semente ou modelo (PAN *et al.*, 2015; SHAMSAEI *et al.*, 2018). Assim, o efeito semente, faz com que a microestrutura cimentícia seja densificada, pois há redução dos vazios da pasta, alterando as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios, deixando-os mais compactos (MOHAMMED *et al.*, 2015; LONG *et al.*, 2017; INDUKURI e NERELLA, 2021).

**Figura 1** - Demonstração do crescimento dos produtos de hidratação do cimento por parte do OG.



Fonte: Adaptado WANG *et al.* (2020).

A reação principal funciona como efeito modelo ao influenciar as reações seguintes para o crescimento dos produtos de hidratação do cimento, dessa forma o OG preenche e reduz os poros da matriz cimentícia, formando estruturas reticuladas e intertravadas que auxiliam na distribuição de cargas aplicadas nas argamassas (LU e OUYANG, 2017; WANG *et al.*, 2019). Pormenorizando, a incorporação de óxido de grafeno reduz o diâmetro dos poros capilares grandes transformando-os por poros capilares menores e aumentando sua área superficial (WANG *et al.*, 2019). Tal efeito culmina na melhoria das propriedades mecânicas de argamassas, uma vez que produz cristais uniformemente distribuídos na matriz e que preenchem os poros maiores.

Sharma e Kothiyal (2015) observaram que os resultados combinados de microestrutura e porosidade melhoraram as propriedades mecânicas devido à dispersão de OG na matriz cimentícia. A dispersão não sendo efetiva, forma-se aglomerados de OG, os poros e vazios da matriz não sendo completamente preenchidos levam a um desempenho mecânico insatisfatório que não justificaria o uso de OG. Contudo, os superplastificantes são indispensáveis nas misturas de compósitos cimentícios tendo como principal função a redução do consumo de água na mistura sem perder a fluidez da argamassa (LV *et al.*, 2013). O uso de surfactantes para dispersar os nanomateriais a base de carbono reduz a rapidez no processo de hidratação do cimento, mas ao analisarmos o seu efeito na argamassa com incorporação de OG, ele diminui as chances de ocorrer aglomeração e enrugamento das folhas de OG. Zhao *et al.* (2020) reportou que, caso o fator água/cimento seja baixo ou o teor de OG esteja acima de 1%, é necessário utilizar superplastificante para melhorar a dispersão. Os superplastificantes utilizados podem ser do tipo policarboxilato, sendo um produto de terceira geração dos superplastificantes denominados superplastificantes, que conseguem dispersar, efetivamente, o OG, diferentemente de outros tipos de superplastificantes

No geral, as propriedades mecânicas apresentam bons resultados quando a porcentagem de óxido de grafeno adicionado à argamassa limita-se até 0,5% da massa de cimento na mistura. (CHINTALAPUDI; PANNEM, 2020ab, LI *et al.*, 2018, CORSO *et al.*, 2020, QI *et al.*, 2021).

## 2.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS

### 2.6.1 Resistência à compressão

A resistência de um material consiste na capacidade de resistir a uma tensão sendo função de diferentes aspectos como tipos de misturas, desenho da estrutura, processo de cura e outros (MOHAMMED *et al.*, 2015). O teste de resistência à compressão é um dos mais importantes testes práticos da engenharia civil.

#### 2.6.1.1 Resistência à compressão de argamassas com agregado reciclado

Andrade *et al.* (2017), em seu estudo com agregado reciclado de cerâmica e agregado reciclado de diferentes tipos de resíduos, relataram que, ao aumentar a substituição do agregado natural por RCD (25%, 50%, 75% e 100% da massa), houve redução da resistência à compressão (5%, 11%, 17% e 24%, respectivamente). Na pesquisa realizada por Azevedo *et al.* (2020), onde houve uma classificação e organização para separação e processamento do RCD, os autores obtiveram um tamanho máximo do agregado de RCD de 2,039 mm, com índice de vazios de 1,05 e compacidade de 0,75. O resultado da resistência à compressão da argamassa, com 100% de substituição do agregado natural pelo agregado de RCD, foi de aproximadamente 46% maior do que a argamassa feita com agregado natural. Os autores acreditam que o resultado de resistência à compressão obtida foi devido à redução dos poros alcançado pela melhor compacidade do RCD.

Ferreira *et al.* (2019) estudou o comportamento das argamassas devido ao tamanho e teor de pó dos agregados reciclados, variando em: partículas menores que 4,75 mm, partículas na faixa de 2,36 até 0,15 mm e partículas da faixa 2,36 até 0,15 mm mas lavada na peneira 0,15 mm. Eles encontraram que a resistência à compressão das argamassas com 100% de substituição do agregado natural pelo reciclado, conforme Tabela 1. Os resultados corroboram que a remoção do pó do agregado reciclado leva a uma queda na resistência à compressão das argamassas. Isto se deve ao fato de o pó contido nos agregados reciclados preencher os poros da argamassa levando a compacidade da estrutura.

**Tabela 1** - Resistência à compressão de argamassa com agregado natural e reciclado.

Tamanho do Agregado (mm)	Resistência a Compressão (MPa)	Varição em Relação à Amostra Padrão (%)
Natural – até 0,6	7,24	-
Reciclado - < 4,75	7,98	10% (maior)
Reciclado – entre 2,36 e 0,15	5,54	24% (menor)
Reciclado – entre 2,36 e 0,15 Lavado na peneira 0,15	5,90	19% (menor)

Fonte: Ferreira *et al.* (2019).

Colangelo e Cioffi (2017) relataram que as argamassas com agregado reciclado com adição média de 11 kg/m<sup>3</sup> de superplastificante e cura de 28 dias, apresentaram menor resistência à compressão, sendo a queda de 5%, 6%, 13% e 24% quando a substituição do agregado natural era de 30%, 50%, 70% e 100%, respectivamente. Já Ferreira *et al.* (2020) fizeram testes em argamassas com 100% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado e chegaram aos resultados de 55%, 62%, e 63% de redução da resistência à compressão para uma proporção volumétrica de 1:1:6, 1:1:7 e 1:2:9, respectivamente, dos materiais cimento: cal: agregado reciclado. Os autores explicam que a redução de 55% da resistência à compressão foi menor do que os demais resultados devido à presença de mais partículas finas contidas no agregado reciclado, que preenchem os poros existentes nas argamassas, tornando-a mais compacta e, assim, obtendo melhor desempenho mecânico.

Experimentalmente, Ledesma *et al.* (2016a) fizeram proporções diferentes de cimento e agregado, sendo 1:7 para *low-strength mortar* (LSM) e 1:4 *high-strength mortar* (HSM), adicionaram à mistura da argamassa um pó de agregado reciclado, nas proporções de 0%, 50% e 100% em substituição à areia fina (0-0,125mm). Os resultados mostraram que não houve significativas diferenças, cerca de 2% e 5% de aumento na resistência à compressão de argamassas LSM quando a proporção de substituição aumentava de 50% para 100% de substituição, respectivamente. Para a argamassa HSM, o aumento na resistência à compressão foi de 4% e 7% para as substituições de 50% e 100% da areia fina pelo pó de agregado reciclado. Os autores concluíram que a incorporação do pó de agregado reciclado poderia economizar cimento na fabricação de argamassa sem reduzir a resistência mecânica, que teriam efeitos benéficos ao aumentar a taxa de reciclagem dos RCD's e reduzir o consumo de cimento e, conseqüentemente, as emissões de CO<sub>2</sub> derivadas da produção.

A **Tabela 2** sintetiza os resultados, da resistência à compressão de argamassas com agregado e RCD, das pesquisas mencionadas.

**Tabela 2** - Resistência à compressão de argamassa com reciclado de RCD.

<b>Varição da Resistência à Compressão em Relação a Amostra padrão</b>	<b>Referência</b>
24% (menor)	ANDRADE <i>et al.</i> , 2017
46% (maior)	AZEVEDO <i>et al.</i> , 2020
19% (menor)	FERREIRA <i>et al.</i> , 2019
24% (menor)	COLANGELO; CIOFFI, 2017
55% (menor)	FERREIRA <i>et al.</i> , 2020
5% (maior)	LEDESMA <i>et al.</i> , 2016a
7% (maior)	LEDESMA <i>et al.</i> , 2016a

Fonte: Conforme Referência de Autores.

#### 2.6.1.2 Resistência à compressão de argamassas com agregado natural e adição de óxido de grafeno

A pesquisa realizada por Chindaprasirt *et al.* (2021) em argamassas com adição de óxido de grafeno (0,05% de OG) apresentou aumento de 16,4% na resistência à compressão, devido às partículas finas do OG que preenchem os espaços vazios e atuam como locais de nucleação para hidratação, resultando em uma matriz cimentícia menos porosa.

Chintalapudi e Pannem (2020a) moldaram cubos de 70,6 x 70,6 x 70,6 (mm) com 0,04% de óxido de grafeno adicionado à argamassa e fator a/c de 0,5. Para tais amostras, os autores obtiveram um aumento de 46% na resistência à compressão quando comparado à amostra de controle.

Sharma e Kothiyal (2015) utilizaram amostras com 1% de OG e superplastificante, onde obtiveram uma resistência à compressão 64,5% superior à resistência da amostra de controle. O aumento significativo da resistência à compressão pode ser atribuído ao uso de superplastificantes com um fator a/c mais baixo, 0,45, e a submissão do óxido de grafeno ao processo de moagem, o qual possibilitou o aumento da proporção de grupos funcionais oxigenados, culminando em ligações covalentes mais fortes entre as partículas de cimento e as nanofolhas de OG.

Wang *et al.* (2019) observou que a variação do fator água/cimento pode alterar a resistência à compressão das argamassas, com fator a/c variando entre 0,2, 0,3 e 0,4, considerado 28 dias de cura, usando 1,0% de superplastificante e com 0,03% de OG

apresentou resistência à compressão de 37%, 31% e 21%, respectivamente, superiores a amostra padrão. Estes resultados corroboram sobre a influência do fator água/cimento na melhoria das propriedades mecânicas das argamassas.

Baseado nos resultados das pesquisas, o efeito da adição de óxido de grafeno na resistência à compressão de argamassas é sintetizado na Tabela 3. A análise dos resultados indica cerca de 90% de melhoria na propriedade de resistência à compressão com a incorporação de pequenos teores de óxido de grafeno às argamassas (até 1% de OG por peso de cimento).

**Tabela 3** - Desempenho da resistência à compressão nas argamassas com adição de OG.

Teor de OG (% em peso de cimento)	Fator a/c	SP (%)	Aumento da Resistência à Compressão	Referência
0,05	0,37	1,00	16%	CHINDAPRASIRT <i>et al.</i> , 2021
0,04	0,50	-	46%	CHINTALAPUDI <i>et al.</i> , 2020a
0,04	0,40	1,00	29%	LI <i>et al.</i> , 2018
0,02	0,50	-	20%	CAO <i>et al.</i> , 2016
0,10	0,48	0,40	24%	CORSO <i>et al.</i> , 2020
0,05	0,50	-	10%	LU; OUYANG, 2017
1,00	0,45	0,50	86%	SHARMA; KOTHIYAL, 2015
0,04	0,50	0,18	3%	YAN <i>et al.</i> , 2020
0,03	0,42	-	12%	QI <i>et al.</i> , 2021
0,06	0,30	-	24%	CUI <i>et al.</i> , 2020
0,04	0,35	0,60	20%	SUN <i>et al.</i> , 2020
0,50	0,50	0,20	29%	KIM <i>et al.</i> , 2017
0,50	0,37	-	20%	WANG <i>et al.</i> , 2015
0,03	0,20	1,00	37%	WANG <i>et al.</i> , 2019
0,03	0,50	-	23%	KRYSTEK, 2019
0,03	0,50	0,20	72%	JINCHANG; YEMING, 2018
0,05	0,30	0,01	23%	KUNDANATI <i>et al.</i> , 2020
0,04	0,40	0,85	11%	LI <i>et al.</i> , 2019
0,05	0,37	0,002	48%	LV <i>et al.</i> , 2013
0,03	0,50	0,20	73%	JINCHANG; YEMING, 2018

Fonte: Conforme Referência de Autores.

### 2.6.1.3 Resistência à compressão de argamassas com agregado reciclado e adição de óxido de grafeno

Segundo os experimentos realizados por Long *et al.* (2017), a maior porcentagem de adição de OG, 0,20% na argamassa com agregado reciclado, levou a um aumento

da resistência à compressão de 16%, enquanto as outras adições de 0,05% e 0,10% levaram a um aumento de 7% e 10%, respectivamente. Eles reportaram que, em condições estáticas, a adição de OG na argamassa com agregado reciclado é efetiva, pois melhora as propriedades mecânicas devido aos impactos positivos do processo de hidratação do cimento feito pelo OG e ao preenchimento dos poros da argamassa.

No estudo de Fang *et al.* (2017), o uso de agregado miúdo reciclado culminou na necessidade de elevar o fator água/cimento (0,66), quando comparado com outros estudos, para não comprometer a trabalhabilidade da argamassa devido à alta absorção de água pelo agregado reciclado. Neste sentido, a adição de 0,2% de OG foi suficiente para proporcionar um aumento superior a 15% na resistência à compressão da argamassa com OG comparada à amostra padrão sem OG.

Long *et al.* (2018) em seu estudo de argamassas recicladas com diferentes teores de OG, 0,05%, 0,10% e 0,20%, encontraram melhorias na resistência à compressão dessas argamassas na ordem de 8%, 11,5% e 19%, respectivamente, quando comparadas a argamassas confeccionadas com 100% de agregado de RCD, sem adição de OG. Sabe-se que o agregado reciclado diminui as propriedades mecânicas das argamassas. Porém, os autores concluíram que, apesar do OG melhorar a pasta de cimento, fazendo a análise da impedância (que nos fornece informações entre as interfaces de diferentes fases de materiais cimentícios) verificou-se que o OG também melhorou a microestrutura da interface entre as fases líquida e sólida, ou seja, o transporte de cargas entre as fases líquida e sólida foi inibido, pois o número de poros interconectados diminuiu devido ao preenchimento deles pelos produtos de hidratação do cimento (C-S-H).

A análise dos resultados indica que o melhor resultado foi cerca de 20% de melhoria nas propriedades de resistência à compressão com a incorporação de 0,2% de óxido de grafeno às argamassas compostas de 100% de agregado reciclado. A síntese dos resultados do efeito da adição de óxido de grafeno na resistência à compressão de argamassas com agregado reciclado é apresentada na Tabela 4.

**Tabela 4** - Desempenho da resistência à compressão nas argamassas recicladas com adição de OG.

Teor de OG (% em peso de cimento)	Fator a/c	SP (%)	Melhoria da Resistência à Compressão	Referência
0,20	0,67	0,80	19%	LONG <i>et al.</i> , 2018
0,20	0,67	1,30	16%	LONG <i>et al.</i> , 2017
0,20	0,66	1,30	16%	FANG <i>et al.</i> , 2017

Fonte: Conforme Referência de Autores.

### 2.6.2 Resistência à tração por compressão diametral de argamassas com agregado natural e adição de óxido de grafeno

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral mede-se a força necessária para provocar a ruptura do corpo de prova conforme carga aplicada na direção do diâmetro.

Pesaralanka e Khed (2020) relataram uma melhora de 29,5% na resistência à tração de argamassas com 0,05% de óxido de grafeno aos 28 dias. O reforço proveniente do OG é atribuído à forte interface de ligação com a matriz cimentícia.

Cui *et al.* (2020) dedicaram seu estudo à infraestrutura marítima ao pesquisarem o comportamento de argamassas com OG submersas em um rio durante 3 anos. Eles encontraram que a resistência à tração de argamassas com teor de 0,06% de óxido de grafeno obteve um aumento de 28,73%, quando comparadas à amostra controle sem OG. Já em condições de submersão em água houve um aumento da resistência à tração de 34,54% quando comparadas a amostra padrão submergida. No entanto, as amostras que estavam imersas no rio por três anos apresentaram redução da resistência à tração de 8,26% quando confrontadas com amostras em condições ambiente, submersas em laboratório.

A pesquisa feita por Kim *et al.* (2017) proporcionou um aumento de 17% na resistência à tração em argamassas com 0,5% de OG. O aumento individual na quantidade de OG nem sempre culminará na melhoria da resistência à tração de argamassas, uma vez que as variáveis “fator de a/c” e “teor de surfactantes” também influenciam na mistura de cimento e OG e, conseqüentemente, na microestrutura da argamassa endurecida.

O estudo apresentado por Wang *et al.* (2019) apresentou valores de resistência à tração de 46%, 54% e 35% quando a quantidade de OG aumenta de 0,01%, 0,03% e 0,05%, respectivamente. Essa diminuição de 54% para 35% na resistência à tração,

mesmo com aumento do teor de OG, possivelmente refere-se à aglomeração de OG que teve uma dispersão ineficiente, refletindo no comportamento macroestrutural.

A resistência à tração da argamassa teve diminuição de 10% quando o óxido de grafeno adicionado foi em forma de pó ao invés de dispersado em água, conforme relatado por Kjaernsmo *et al.* (2018).

Baseado nos resultados das pesquisas, o efeito da adição de óxido de grafeno em argamassas é sintetizado na Tabela 5. O óxido de grafeno melhora significativamente a resistência à tração das argamassas, sendo um aumento de 79% obtido de 0,03% de OG nos estudos feitos por Lv *et al.* (2013).

**Tabela 5** - Desempenho da resistência à tração nas argamassas com adição de OG.

Teor de OG (% em peso de cimento)	Fator a/c	SP (%)	Aumento da Resistência à Tração	Referência
0,02	0,40	1,00	18%	LI <i>et al.</i> , 2018
0,06	0,30	-	35%	CUI <i>et al.</i> , 2020
0,50	0,50	0,20	17%	KIM <i>et al.</i> , 2017
0,03	0,55	1,00	54%	WANG <i>et al.</i> , 2019
0,03	0,37	0,002	79%	LV <i>et al.</i> , 2013

Fonte: Conforme Referência de Autores.

### 2.6.3 Resistência à flexão

A resistência à flexão mede a estabilidade de um material sobre determinados esforços de solicitação. O ensaio de resistência à flexão visa assegurar a eficiência dos materiais até a ruptura.

#### 2.6.3.1 Resistência à flexão de argamassas com agregado reciclado

A resistência à flexão apresenta um comportamento quase linear, ou seja, com poucas variações, quando a troca do agregado natural pelo agregado reciclado aumenta de 25% até 100% (com variações em 25%), tendo resultados similares para todas as substituições, ou seja, o aumento na resistência à flexão não teve uma significância estatística conforme relatado por Andrade *et al.* (2017). Já Ferreira *et al.* (2020) fizeram ensaios em argamassas com 100% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado e chegaram aos resultados de 50%, 56%, e 58% de redução da resistência à flexão para uma proporção volumétrica de 1:1:6, 1:1:7 e 1:2:9, respectivamente, dos materiais: cimento: cal: agregado reciclado.

Ferreira *et al.* (2019) estudou o comportamento das argamassas devido ao tamanho e teor de pó dos agregados reciclados, variando em: partículas menores que 4,75 mm, partículas na faixa de 2,36 até 0,15 mm e partículas na faixa de 2,36 até 0,15 mm, mas lavada na peneira 0,15 mm. Eles encontraram que as resistências à flexão das argamassas com substituição de 100% do agregado natural pelo reciclado conforme Tabela 6. Os resultados mostram que a remoção do pó do agregado reciclado não altera significativamente a resistência à flexão das argamassas.

**Tabela 6** - Resistência à flexão de argamassas com agregado natural e agregado reciclado.

Tamanho do Agregado (mm)	Resistência a Flexão (MPa)	Variação em Relação à Amostra Padrão (%)
Natural – até 0,6	1,93	-
Reciclado - < 4,75	1,73	10% (menor)
Reciclado – entre 2,36 e 0,15	1,86	4% (menor)
Reciclado – entre 2,36 e 0,15 Lavado na peneira 0,15	2,00	4% (maior)

Fonte: Ferreira *et al.* (2019).

Experimentalmente, Ledesma *et al.* (2016a) fizeram proporções diferentes de cimento e agregado, sendo 1:7 (LSM) e 1:4 (HSM), adicionaram a mistura de argamassa um pó de agregado reciclado, nas proporções de 0%, 50% e 100% de substituição da areia fina. Os resultados mostraram que houve aumento da resistência à flexão, cerca de 9%, para substituição de 100% da areia fina pelo pó de agregado reciclado para argamassas do tipo LSM, enquanto, para a argamassa HSM o aumento na resistência à flexão foi de 11,5%.

#### 2.6.3.2 Resistência à flexão de argamassas com agregado natural e adição de óxido de grafeno

A variação do fator água/cimento interfere na resistência à flexão. Conforme observado por Jinchang e Yeming (2018), se um fator a/c alto em torno de 0,5, combinado com adição maior que 0,03% de OG resulta em um aumento de até 70% da resistência a flexão. Já a incorporação de diferentes teores, como 0,02% e 0,04% de OG na argamassa, aumentou a resistência à flexão em 14,8% para ambas as quantidades de OG adicionado à argamassa, com tempo de cura de 28 dias, conforme relatado por Li *et al.* (2018).

A adição de 0,5% de OG na argamassa proporcionou um aumento na resistência à flexão de 72%, conforme relatado por Wang *et al.* (2015). Aumento de 32%, 30% e

28% na resistência à flexão com adição de 0,02%, 0,04% 0,06% de OG e fator a/c de 0,5, 0,35 e 0,30, foram reportados por Cao *et al.* (2016), Sun *et al.* (2020) e Cui *et al.* (2020), respectivamente.

Lu e Ouyang (2017) constataram que, ao se aumentar o teor de óxido de grafeno nas proporções de 0,01%, 0,03%, 0,05%, 0,08% e 0,10%, verifica-se, inicialmente, um aumento na resistência à flexão, seguida, porém, de uma redução, conforme valores de 7%, 11%, 12%, 7% e 3% para as respectivas adições. Essa diminuição na resistência à flexão refere-se à possível aglomeração de OG devido a pouca dispersão do material, refletindo no comportamento macroestrutural. Adições superiores a 1% de OG podem gerar empilhamento de material devido à força de atração de *van der Waals*, gerando aglomerações que não preenchem os poros e assim não garantem bons resultados na resistência a flexão.

Em 2020, o estudo de Yan *et al.* apresentou um aumento da resistência à flexão de 4,7% em relação à amostra controle. Atribuindo essa melhora na resistência à flexão das argamassas confeccionadas com óxido de grafeno como consequência da região de interface da área de superfície do OG com morfologia enrugada e a matriz cimento/agregado miúdo, resultando no aumento da eficiência na transferência de carga imposta as amostras ensaiadas.

Nas pesquisas feitas por Qi *et al.* (2021), o aumento de 11% na resistência a flexão reflete o preenchimento dos poros pelo OG, produzindo uma argamassa compacta, além de regularem a hidratação das argamassas de cimento pela formação de núcleos e modelos de hidratação que promovem a reação principal e influenciam as reações subsequentes para o crescimento dos produtos de hidratação do cimento.

Baseado nos resultados das pesquisas, o efeito da adição de óxido de grafeno em argamassas, segundo alguns autores, é apresentado na Tabela 7. O óxido de grafeno melhora a resistência à flexão das argamassas, sendo o maior aumento nessa propriedade, cerca de 70%, obtido para os teores de 0,03% e 0,05% de OG nos estudos feitos por Jinchang e Yeming (2018), Wang *et al.* (2019) e Wang *et al.* (2015).

**Tabela 7** - Desempenho da resistência à flexão das argamassas com adição de OG.

<b>Teor de OG (% em peso de cimento)</b>	<b>Fator a/c</b>	<b>SP (%)</b>	<b>Melhoria da Resistência à Flexão</b>	<b>Referência</b>
0,02	0,40	1,00	15%	LI <i>et al.</i> , 2018
0,02	0,50	-	32%	CAO <i>et al.</i> , 2016
0,05	0,50	-	13%	LU; OUYANG, 2017
0,02	0,50	0,09	5%	YAN <i>et al.</i> , 2020
0,03	0,42	-	11%	QI <i>et al.</i> , 2021
0,06	0,30	-	28%	CUI <i>et al.</i> , 2020
0,04	0,35	0,60	31%	SUN <i>et al.</i> , 2020
0,50	0,50	0,20	3%	KIM <i>et al.</i> , 2017
0,50	0,37	-	72%	WANG <i>et al.</i> , 2015
0,03	0,20	1,00	70%	WANG <i>et al.</i> , 2019
0,03	0,50	-	13%	KRYSTEK, 2019
0,03	0,50	0,20	73%	JINCHANG; YEMING, 2018
0,05	0,30	0,01	12%	KUNDANATI <i>et al.</i> , 2020
0,04	0,40	0,85	45%	LI <i>et al.</i> , 2019
0,03	0,37	0,002	61%	LV <i>et al.</i> , 2013
0,03	0,50	0,20	73%	JINCHANG; YEMING, 2018

Fonte: Conforme Referência de Autores.

### 2.6.3.3 Resistência à flexão de argamassas com agregado reciclado e adição de óxido de grafeno

Long *et al.* (2017) realizaram ensaios de resistência a flexão, onde os resultados apresentam ganho na resistência à flexão de 16%, 27% e 41% para a adição de 0,05%, 0,10% e 0,20% de óxido de grafeno, respectivamente. Novamente, eles reportaram que, em condições estáticas, o OG consegue melhorar a argamassa com agregado reciclado devido aos impactos positivos no processo de hidratação do cimento feito pelo OG e ao preenchimento dos poros da argamassa, densificando a estrutura.

Já Fang *et al.* (2017), utilizaram em sua pesquisa as mesmas quantidades de adição de óxido de grafeno (0,05%, 0,10% e 0,20%) e fator água/cimento de 0,66 comparados a outros estudos que usaram RCD (LONG *et al.*, 2017; LONG *et al.*, 2018). Neste sentido, a adição de 0,20% de OG foi suficiente para proporcionar um aumento de 41% na resistência à flexão da argamassa com OG comparada à amostra padrão sem OG (LONG *et al.*, 2017; FANG *et al.*, 2017).

Long *et al.* (2018), em seu estudo de argamassas recicladas com diferentes teores de OG (0,05%, 0,10% e 0,20%), encontrou resultados de ganho na resistência à flexão dessas argamassas na ordem de 15%, 28% e 48%, respectivamente, quando comparadas a argamassas recicladas sem adição de OG. Da mesma forma que na resistência à compressão, sobre a inibição do transporte de cargas entre as fases líquida e sólida, fato verificado pela impedância que, portanto, deve-se ao preenchimento dos poros da argamassa pelos produtos de hidratação do cimento (C-S-H), tornando a estrutura mais regular e compacta, levando a propriedades mecânicas melhores.

Pode-se verificar que os três autores, Long *et al.* (2017), Fang *et al.* (2017) e Long *et al.* (2018), utilizaram o mesmo fator a/c e os melhores resultados da resistência à flexão aconteceram para o teor de 0,2% de OG às argamassas compostas de 100% de agregado reciclado. A síntese dos resultados do efeito da adição de óxido de grafeno na resistência à flexão de argamassas com agregado reciclado é apresentada na Tabela 8.

**Tabela 8** - Desempenho da resistência à flexão nas argamassas recicladas com adição de OG.

Teor de OG (% em peso de cimento)	Fator a/c	SP (%)	Melhoria da Resistência à Flexão	Referência
0,20	0,67	0,80	48%	LONG <i>et al.</i> , 2018
0,20	0,67	1,30	41%	LONG <i>et al.</i> , 2017
0,20	0,66	1,30	41%	FANG <i>et al.</i> , 2017

Fonte: Conforme Referência de Autores.

#### 2.6.4 Módulo de Elasticidade

A qualidade e durabilidade de um revestimento com argamassa estão ligadas diretamente ao comportamento elástico dos materiais caracterizado pelo módulo de elasticidade, que é proporcional a energia armazenada por ciclo de carregamento (LONG *et al.*, 2017). As argamassas de reparo devem suportar as deformações devido às tensões internas do contrário surgiriam anomalias relacionadas a fissuras que causam danos e ruptura, por isso é essencial à determinação do módulo de elasticidade das argamassas (MARQUES *et al.*, 2020).

#### 2.6.4.1 Módulo de Elasticidade de argamassas com agregado natural e adição de óxido de grafeno

As argamassas com adição de óxido de grafeno nas proporções de 3% e 0,03% obtiveram módulo de elasticidade de 2% (estático) e 6% (dinâmico), maiores que à amostra controle (sem adição de OG), conforme relatado por Horszczaruk *et al.* (2015) e Krystek (2019), respectivamente. Da mesma forma, o aumento do módulo de elasticidade devido à adição de OG está relacionado às reações químicas entre o OG e os produtos de hidratação.

Segundo Horszczaruk *et al.* (2015), a amostra padrão de argamassa apresentou módulo de elasticidade variando de 1-10 GPa, enquanto a amostra com adição de óxido de grafeno variou de 5-20 GPa. O aumento do valor do módulo de Young induz que adição de óxido de grafeno na argamassa pode favorecer o seu desempenho mecânico. O módulo de elasticidade varia em função do total de poros da amostra, sendo que, se a porosidade aumenta, resulta na diminuição do módulo de elasticidade, isso porque os vazios atuam como pontos que concentram as tensões, facilitando assim o aparecimento de fissuras e diminuindo a resistência mecânica, permitindo que a argamassa tenha maior deformação antes da ruptura (ROMANO *et al.*, 2015).

Kjaernsmo *et al.* (2018) pesquisaram a influência da dispersão do óxido de grafeno nas propriedades mecânicas. A argamassa teve uma diminuição de 14% do seu módulo de elasticidade estático quando utilizado o teor de 0,03% de OG disperso em solução aquosa, comparando com o mesmo teor na forma em pó.

Já comparando as argamassas de referência e aquelas com adições de óxido de grafeno, houve uma mesma tendência de variação no módulo de elasticidade sob carga crescente. No entanto, as argamassas com 0,03% de OG obtiveram um módulo de elasticidade 6% maior do que as argamassas sem OG (KRYSTEK, 2019).

Ferreira *et al.* (2020) concluíram que o módulo de elasticidade dinâmico é afetado pela rigidez dos agregados, sendo assim, verificaram que o agregado reciclado apresentou menor rigidez do que o agregado natural devido a maior porosidade. Colangelo e Cioffi (2017) relataram que as argamassas com agregado reciclado com adição média de 11 kg/m<sup>3</sup> de superplastificante e cura de 90 dias, apresentaram menor módulo de elasticidade estático, sendo 7%, 16%, 35% e 40% quando a

substituição do agregado natural pelo agregado reciclado era de 30%, 50%, 70% e 100%, respectivamente.

O comportamento do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com agregados reciclados, variou em: partículas menores que 4,75 mm, partículas na faixa de 2,36 até 0,15 mm e partículas da de 2,36 até 0,15 mm, mas lavada na peneira 0,15 mm, foi menor em 21%, 38% e 23% do que as argamassas preparadas com agregado natural. Essa redução no módulo de elasticidade dinâmico é devido à menor rigidez dos agregados reciclados. Porém, entre as três faixas de agregado reciclado apresentadas, aquela com maior teor de pó apresentou melhor resultado do módulo de elasticidade dinâmico quando comparado às faixas de agregado com menores teores de pó. Isso é, provavelmente, devido pelo preenchimento dos vazios, gerando uma argamassa mais compacta, portanto mais rígida (FERREIRA *et al.*, 2019).

#### 2.6.4.2 Módulo de Elasticidade de argamassas com agregado reciclado e adição de óxido de grafeno

Long *et al.* (2017) adicionaram 0,2% de OG a argamassas e obtiveram módulo de elasticidade dinâmico de 53%, maior que à amostra controle (sem adição de OG). O aumento no módulo de elasticidade pode ser devido ao fortalecimento da interface entre o agregado miúdo reciclado e a pasta de cimento com OG, ou seja, há uma reação química entre o OG e os produtos de hidratação do cimento. A adição de óxido de grafeno pode tornar as estruturas mais interligadas, reduzindo os poros e assim melhorar a distribuição de vazios, levando a uma vida de serviço maior e, portanto, menos manutenções, favorecendo o viés da sustentabilidade (LONG *et al.*, 2018).

## 2.7 PROPRIEDADES DE DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS

### 2.7.1 Absorção de água

As argamassas com agregado reciclado apresentam maior absorção de água, sugere-se à presença de maior quantidade de poros menores que não impacta negativamente na resistência mecânica dessas argamassas (MALTA, 2013). A alta porosidade da argamassa no estado endurecido não é uma característica apreciável, pois a água tem a capacidade de degradar materiais cimentícios, mas essa porosidade mais alta das argamassas de RCD contribui para melhor difusão do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera que em longo prazo é benéfico para as propriedades da argamassa e para o meio ambiente (FERREIRA *et al.*, 2019).

A absorção de água em argamassas com agregado reciclado misturado pode ser 10% maior do que aquelas argamassas preparadas com agregado reciclado cerâmico. Este fato é devido à elevada capacidade de absorção e águas do agregado reciclado misturado conjuntamente ao elevado fato a/c no preparo dessa argamassa (ANDRADE *et al.*, 2018).

Segundo Azevedo *et al.* (2020), o alto teor de RCD em materiais cimentícios provoca um aumento na absorção de água, prejudicando a durabilidade com o surgimento de problemas patológicos, como rachaduras, que prejudicam o desempenho do material.

## **2.7.2 Carbonatação**

A durabilidade rege a vida de serviço de uma estrutura, podendo ser definida como a habilidade de resistir aos ataques químicos, intempéries e outras circunstâncias (MOHAMMED *et al.*, 2015). A durabilidade na construção civil tem chamado atenção para materiais que reduzam a periodicidade de manutenções e garantam a vida de serviço da construção (SHAMSAEI *et al.* 2018). A permeabilidade é definida como um dos mais importantes fatores que influenciam a deterioração de compósitos cimentícios (WANG e ZHAO, 2018). O material tendo uma permeabilidade baixa, a quantidade de agente agressivo externo que poderia penetrar em seu interior é reduzida.

### **2.7.2.1 Carbonatação de argamassas de argamassas com agregado natural e adição de óxido de grafeno**

Du *et al.* (2016) relataram que os produtos à base de grafeno podem aumentar a resistência dos compósitos cimentícios contra intempéries. Pode-se concluir que isso acontece, primeiramente, devido à natureza impermeável do material à base de grafeno que funciona como barreira para evitar a difusão de íons. E por último, devido ao tamanho nano desses materiais que aceleram a hidratação do cimento e densifica a microestrutura.

A durabilidade de argamassas está relacionada à taxa de absorção de água e substâncias nocivas no meio. Materiais cimentícios pode absorver CO<sub>2</sub> durante sua vida útil através da carbonatação (ANDRADE *et al.*, 2018). Assim, Katz e Kulisch (2017) verificaram que argamassas contendo agregado reciclado levam as maiores profundidades de carbonatação. A reação de carbonatação causa degradação

química devido à presença de água e gás carbônico ao se juntarem produzem ácido carbônico que ao reagir com hidróxido de cálcio produz carbonato de cálcio que reduz o pH levando a corrosão das armaduras contidas no concreto (ROCHA *et al.*, 2021).

Para Zhao *et al.* (2015), o tamanho das partículas de agregado reciclado influencia na taxa de carbonatação, devido ao aumento da área específica exposta ao CO<sub>2</sub>. Conforme relatado por Mazurana (2019) em sua pesquisa, a profundidade de carbonatação foi máxima (7,7mm) para 100% de substituição do agregado reciclado pelo agregado de RCD.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo, são apresentados os materiais e procedimentos adotados no experimento bem como o método de abordagem da pesquisa.

#### 3.1 MÉTODO DE ABORDAGEM

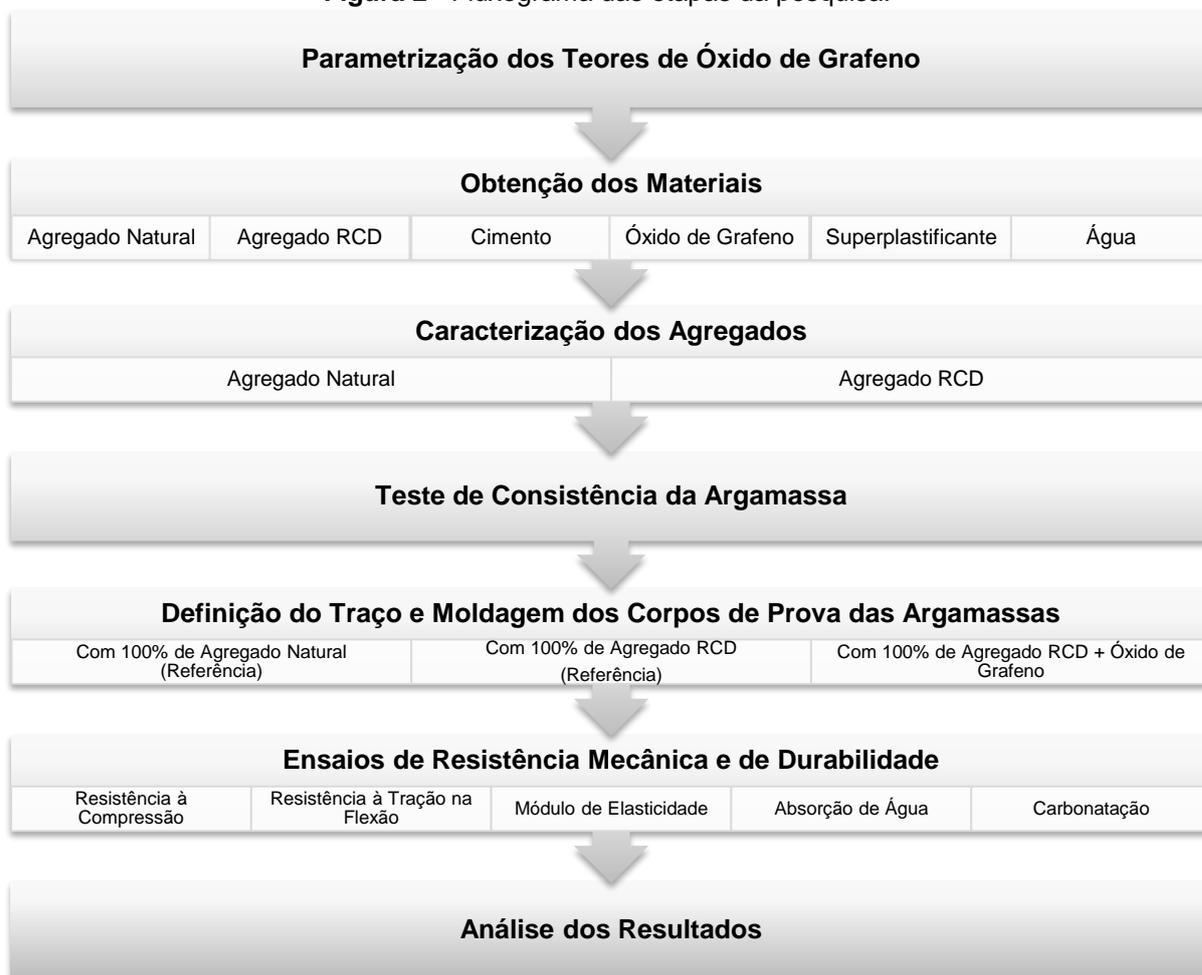
Segundo Gil (2002), Silva e Menezes (2005) e Tasca *et al.* (2010), o fomento à pesquisa se dá por razões de ordem intelectual e de ordem prática sendo diferenciadas pelo desejo em conhecer o desconhecido e contribuir para a eficiência de sistemas, respectivamente. Assim, de acordo com a classificação do objetivo a presente pesquisa é classificada como exploratória e explicativa, pois envolve uma pesquisa bibliográfica em seu desenvolvimento e analisará do comportamento de materiais submetidos a ensaios mecânicos. Segundo Silva e Menezes (2005), quanto a natureza da pesquisa podemos classificá-la como uma pesquisa básica, pois não haverá uma aplicação imediata do conhecimento, mas vai gerar resultados para o avanço científico. O processo de pesquisa apresenta uma coleta de dados primários obtidos da revisão teórica que serviram como primeiro passo na determinação dos ensaios mecânicos e de durabilidade a serem feitos bem como nos materiais a serem usados na confecção dos corpos de prova. A coleta de dados secundária se dará na etapa de resultados onde serão apresentados os valores obtidos experimentalmente nesta pesquisa (GIL, 2002). Por se tratar de uma pesquisa experimental que envolve o estudo de argamassas confeccionadas com agregado reciclado e adição de óxido de grafeno, cuja variável é o teor de OG a ser adicionado, tendo a substituição de 100% do agregado reciclado pelo agregado natural, cimento CP V-ARI, tempo de cura de 28 dias como variáveis de controle para assim observar os efeitos que a variável provoca no comportamento mecânico e de durabilidade das argamassas.

A presente pesquisa versa sobre analisar os valores obtidos ao medir a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão, o módulo de elasticidade, absorção de água e carbonatação em argamassas modificadas e comparar estes valores com argamassas padrões. Considerando as proposições descritas, o método de abordagem é designado como quantitativo, baseado nas classificações propostas por Tasca *et al.* (2010).

### 3.2 MÉTODO DE PROCEDIMENTOS

Neste trabalho as etapas a serem realizadas experimentalmente estão representadas no fluxograma conforme a Figura 2.

**Figura 2** - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Autora, 2021.

#### 3.2.1 Parametrização dos teores de óxido de grafeno

Várias pesquisas estudaram a incorporação do OG em argamassas, onde os teores variaram entre 0,03% até 0,2% de OG em relação à massa de cimento (KJAERNSMO *et al.*, 2018; QI *et al.*, 2021; CORSO *et al.*, 2020; LONG *et al.*, 2017). O teor de 0,05% de OG na bibliografia apresentou melhorias nas propriedades mecânicas de 47% e 48% na resistência à compressão e na resistência à tração na flexão, respectivamente. Já o teor de 0,1% de OG, apresentou resultado na resistência à compressão com 24% de melhoria.

A partir dessa revisão, a presente pesquisa estabeleceu os teores de 0,05% e 0,1% de OG em função dos melhores resultados relatados pelos autores Lv *et al.* (2013) e Corso *et al.* (2020), respectivamente.

### 3.2.2 Obtenção dos materiais

#### 3.2.2.1 Agregado natural

O agregado miúdo natural é uma areia fina com origem na região de Esmeraldas e Inhaúma no estado de Minas Gerais obtida em sacos de 20 kg da Pura Sílica nas lojas da Leroy Merlin.

#### 3.2.2.2 Agregado de RCD

O agregado miúdo reciclado a partir de resíduo de construção e demolição (RCD) utilizado neste experimento foi doado pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), que possui duas estações de reciclagem localizadas na BR-040 e Pampulha. No entanto, eles foram obtidos da Estação de Reciclagem de Entulho localizada na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos, à BR-040, km 531, bairro Jardim Filadélfia (Figura 3).

**Figura 3** - Estação de reciclagem de entulho.



Fonte: Autora, 2021.

Os agregados de RCD geralmente são provenientes das Unidades de Recebimento de Pequenos Volumes (UPRVs) de Belo Horizonte e de particulares (normalmente empresas de caçambas). Cerca de 100 m<sup>3</sup> desses resíduos são recebidos diariamente, onde primeiramente são espalhados no pátio para a triagem manual de rejeitos, retirando contaminante como papeis, papelão, plástico, metais, dentre outros. Os RCD's utilizados apresentam resíduos de origem cimentícia e cerâmica que foram processados por britagem mecânica, peneiramento e classificação do material.

Primeiramente, o RCD foi peneirado na peneira de abertura 4,75 mm e lavado na peneira 0,15 mm, como mostra a Figura 4. Tanto o agregado de RCD quanto o agregado natural foram levados à estufa por 48 horas. Assim, o agregado miúdo de RCD foi preparado para a realização dos ensaios.

**Figura 4** - Preparação do agregado de RCD. a) agregado de RCD sendo lavado após o peneiramento na malha 4,75mm. b) peneiramento na malha 0,15mm para retirada da água do agregado de RCD. c) espalhamento do material lavado nas cubas. d) material quarteadado para colocação na estufa.



Fonte: Autora, 2021.

### 3.2.2.3 Cimento

O cimento Portland usado foi CP V – ARI. A escolha se deu devido ao menor teor de adições em sua composição química e elevado grau de finura. Os ensaios físicos e químicos do cimento foram realizados pela empresa fornecedora e os relatórios correspondentes foram disponibilizados para uso neste trabalho. O cimento utilizado possui propriedades químicas e físicas conforme mostrado na Tabela 9 e Tabela 10, respectivamente.

**Tabela 9** - Composição química do cimento.

Composto	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	R.I.
Teor (% em massa)	64,17	18,93	5,16	2,96	0,76	2,88	0,86	2,92	0,87

Fonte: LafargeHolcim, 2020.

**Tabela 10** - Propriedades físicas do cimento.

Porcentagem Retida na #400 (%)	Tempo de Pega (min)		Resistência à Compressão (MPa)		Área Superfície Específica (cm <sup>2</sup> /g)
	Inicial	Final	7d	28d	
2,9	121	173	46,4	55,1	4695

Fonte: LafargeHolcim, 2020.

### 3.2.2.4 Óxido de grafeno

O óxido de grafeno utilizado na pesquisa foi obtido por eletroesfoliação química a vácuo, processo desenvolvido pela empresa BOOMATECH. As propriedades e composição do óxido de grafeno são apresentadas na Tabela 11 e na Tabela 12, respectivamente.

**Tabela 11** - Propriedades do óxido de grafeno BoomaTech.

Forma	Pó
Tamanho da Partícula (Difração a laser)	D90 25-28 µm D50 13-15 µm D10 6-7 µm
Cor	Marrom
Odor	Inodoro
Dispersibilidade	Solventes polar
Densidade Aparente	0,2-0,4 gr/ml
Umidade	13-16%

Fonte: Boomatech, 2022.

**Tabela 12** - Análise dos elementos químicos presentes no óxido de grafeno.

Carbono	49-56%
Hidrogênio	1-2%
Nitrogênio	0-1%
Enxofre	2-4%
Oxigênio	41-50%

Fonte: Boomatech, 2022.

### 3.2.2.5 Superplastificante

O aditivo superplastificante usado é o MASTERGLENÍUM 51 à base de policarboxilatos, sendo doado pela empresa Master Builders Solutions. O uso de superplastificante na mistura será para proporcionar uma dispersão uniforme do OG e boa trabalhabilidade da pasta de cimento. As características do aditivo, fornecidas pelo fabricante, são conforme Tabela 13.

**Tabela 13** - Características do aditivo superplastificante.

Propriedade	Especificação
Nome	MASTERGLENÍUM 51
Natureza química	Solução aquosa de policarboxilatos modificados
Aspecto a 25°C	Líquido amarelado
pH	5,0 a 7,0
Densidade (25°C)	1,055 a 1,085
Sugestão de dosagem	0,2% a 1,2%

Fonte: Master Builders Solutions, 2021.

### 3.2.2.6 Água

A água utilizada foi fornecida pela COPASA aos laboratórios do PPGEC.

## 3.2.3 Caracterização dos materiais

### 3.2.3.1 Agregado natural

Os agregados miúdos naturais foram caracterizados conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) que preconiza o ensaio de granulometria, e as normas NBR 9776 (ABNT, 1987), NBR 16972 (ABNT, 2021) e NBR 6467 (ABNT, 2006) que abordam sobre a massa específica, massa unitária e inchamento do agregado miúdo, respectivamente.

### 3.2.3.2 Agregado RCD

Todo o agregado miúdo de RCD foi peneirado para obter a classificação conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). A massa unitária e massa específica foram obtidas conforme padronizações normativas para o agregado natural, segundo as normas NBR 16972 (ABNT, 2006) e NBR 9776 (ABNT, 1987). A determinação do inchamento do RCD foi realizada seguindo a norma NBR 6467 (ABNT, 2006).

### 3.2.4 Consistência da argamassa de cimento

O ensaio do índice de consistência da argamassa de cimento foi feito conforme preconiza a norma NBR 13276 (ABNT, 2016).

O parâmetro de espalhamento foi adotado na faixa de 190 mm até 220 mm, com fator a/c de 0,6.

### 3.2.5 Definição do traço e moldagem dos corpos de prova das argamassas

A partir da faixa de espalhamento, o traço definido foi de 1:3:0,60, com a intenção de obter uma argamassa de reparo com fins estruturais no qual a resistência à compressão deve ser compatível com a resistência de concreto utilizado em edificações no meio agressivo ( $f_{ck} = 35\text{MPa}$ ) conforme NBR 6118 (ABNT, 2014).

Os teores de óxido de grafeno foram adotados após parametrizar os quantitativos de material conforme os melhores resultados de resistência mecânica e durabilidade obtidos segundo Fang *et al.* (2017), Long *et al.* (2017).

A Tabela 14 apresenta os traços das argamassas do presente estudo. As argamassas de cimento padrão foram preparadas com cimento, 100% de agregado natural (N) ou 100% de agregado de RCD (R), água e superplastificante. A argamassa R foi modificada com acréscimo de 0,05% de óxido de grafeno ( $R_{0,05OG}$ ) e 0,1% de óxido de grafeno ( $R_{0,1OG}$ ). Com o intuito de evitar a aglomeração na suspensão ao adicionar o OG, um superplastificante (SP) foi usado para dispersar as possíveis aglomerações e estabilizar as partículas de OG na solução aquosa (DU; PANG, 2015). Inicialmente foi adotado o teor de 1,0% de superplastificante, segundo o estudo de Li *et al.* (2018) e Wang *et al.* (2019). Porém, o teor foi alterado durante os ensaios preliminares devido à necessidade de atender a consistência definida.

**Tabela 14** - Traço definido para as argamassas.

Amostra	Agregado Miúdo (g)	Cimento (g)	Água (g)	a/c	OG (g)	OG/ Cimento (%)	SP/ OG (%)
N	1872	624	374	0,60	-	-	1,1
R	1872	624	374	0,60	-	-	1,1
$R_{0,05OG}$	1872	624	374	0,60	0,312	0,05	1,2
$R_{0,1OG}$	1872	624	374	0,60	0,625	0,1	1,2

Fonte: Autora, 2021.

Os agregados miúdos, tanto o natural quanto o reciclado, foram secos na estufa por 48 horas. Após a pesagem, conforme quantidades definidas na Tabela 14, o cimento e o agregado miúdo foram homogeneizados manualmente na cuba da argamassadeira. A água de amassamento foi dividida em porções. A primeira parte da água foi adicionada a cuba durante os 30 s iniciais de mistura na velocidade baixa. O superplastificante, misturado na segunda parte da água, foi adicionado nos próximos 30 s de mistura na velocidade alta. Após mais 60 s de mistura na velocidade alta, a argamassadeira foi desligada e colocou-se um pano úmido cobrindo a cuba durante 60 s. Depois de retirar o pano úmido, a mistura se deu por mais 60 s na velocidade alta e seguindo para o ensaio de espalhamento.

A dispersão do óxido de grafeno ( $R_{0,05OG}$  e  $R_{0,10G}$ ) foi feita com parte da água de amassamento em ultrassom por 10 min. O procedimento de mistura foi o mesmo descrito acima, e o óxido de grafeno disperso em água foi adicionado após os 30 s de mistura do superplastificante.

Assim, foram confeccionados corpos de prova cilíndricos (5cmx10cm) e prismáticos (4cmx4cmx16cm). Os CP's cilíndricos necessitam de adensamento manual com haste onde a argamassa é depositada no molde. Todas as argamassas em seus devidos moldes foram submetidas à mesa de vibração para adensamento do material. Os CP's foram desmoldados após 24 horas. Após o desmolde os CP's foram identificados, conforme Figura 5, e colocados em um tanque de cura úmida submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio onde permaneceram por 28 dias. Para os ensaios mecânicos os CP's foram retificados para não haver excentricidade nas bases cilíndricas desses CP's.

**Figura 5** - Corpos de prova devidamente identificados durante a cura.



Fonte: Autora, 2022.

Um total de 44 corpos de prova foi preparado, sendo 11 CP's com agregado natural, 11 CP's com agregado proveniente de RCD sem adição de OG e 22 CP's com agregado proveniente de RCD e adição de OG.

### 3.2.6 Ensaios de resistência mecânica e de durabilidade

#### 3.2.6.1 Resistência à compressão

Os 12 corpos de prova cilíndricos, sendo 3 CP's para cada traço, foram ensaiados após 28 dias de cura úmida, conforme o padrão de recomendações NBR 13279 (ABNT, 2005). A máquina da marca EMIC, Figura 6, foi utilizada para o ensaio de resistência à compressão, com capacidade de carga de 2.000 kN. Os ensaios foram realizados no laboratório do CEFET-MG.

**Figura 6** - Prensa universal para ensaios de resistência mecânica.



Fonte: Autora, 2022.

#### 3.2.6.2 Resistência à tração na flexão

Os 12 corpos de prova prismáticos, sendo 3 CP's para cada traço, foram ensaiados após 28 dias de cura úmida, conforme o padrão de recomendações NBR 13279 (ABNT, 2005). Os ensaios foram realizados no laboratório do CEFET-MG com a máquina da marca EMIC com capacidade de carga de 200 kN. O ensaio de resistência à tração na flexão por 3 pontos, tem a finalidade de obter a resistência à tração a partir

da flexão, pois durante o ensaio a parte superior do CP é submetida à compressão enquanto a parte inferior é submetida à tração. Como a argamassa confeccionada tem finalidade de reparo em estruturas de concreto, o ensaio de tração é considerado primordial.

### 3.2.6.3 Módulo de elasticidade

Os 12 corpos de prova cilíndricos, sendo 3 CP's para cada traço, foram ensaiados após 28 dias de cura úmida conforme procedimentos definidos na ASTM E1876. Os corpos de prova foram submetidos a vibrações na direção longitudinal e a frequência de ressonância foi analisada. O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico é não destrutivo que consiste em induzir um sinal de vibração ao longo do corpo de prova, medindo a resposta. Segundo Otani e Pereira (2022), o módulo de elasticidade de um corpo de prova medido na direção do seu comprimento quando a vibração é longitudinal, este módulo é o equivalente dinâmico do valor obtido em um ensaio de tração ou compressão.

$f_{12.L\pi.D2.10-12}$  Equação 1 com base nos dados obtidos.

$$E = 16. m. f_1^2. \left( \frac{L}{\pi.D^2} \right). 10^{-12} \quad \text{Equação 1 - Módulo de Elasticidade Dinâmico}$$

Onde:  $m$  é a massa do CP (g);  $f_1$  é a frequência de ressonância fundamental longitudinal (Hz);  $L$  é o comprimento do CP (mm);  $D$  é o diâmetro do CP (mm).

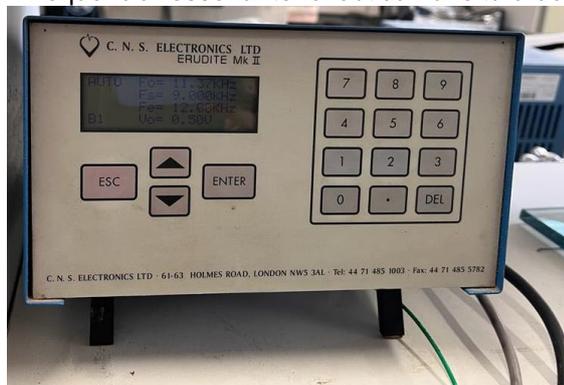
Para este ensaio foi utilizado o equipamento ERUDITE MKII, conforme mostra a Figura 7.



Fonte: Autora, 2022.

A faixa de frequência foi de 9 kHz a 12 kHz, a frequência ressonante foi medida no painel ligado a aparelhagem, Figura 8. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica da UFMG.

**Figura 8-** A frequência ressonante foi obtida na leitura do painel.



Fonte: Autora, 2022.

#### 3.2.6.4 Absorção de água

Após a cura úmida de 28 dias e 3 dias de cura sazonal, seguindo definições da NBR 9778 (ABNT, 1987), as 12 amostras cilíndricas, sendo 3 CP's para cada traço, foram colocadas na estufa por 72 horas, sendo realizadas as medidas de massa a cada 24 horas. Depois as amostras cilíndricas foram imersas em água por 72 horas, sendo realizadas as medidas de massa a cada 24 horas.

#### 3.2.6.5 Carbonatação

O ensaio de carbonatação acelerada testou as argamassas em um ambiente agressivo de exposição ao CO<sub>2</sub>. Após a cura úmida de 28 dias, + 77 dias cura ambiente (sazonal), totalizando 105 dias. As 8 amostras prismáticas de 4 cm x 4cm x 16 cm foram inseridas na câmara de carbonatação acelerada por 28 dias. Visto que não há uma normatização brasileira para este ensaio, seguiram-se as recomendações da LNEC E 391 (1993). A medida da carbonatação foi feita seguindo as instruções da RILEM CPC-18 (1988). A concentração de CO<sub>2</sub> foi de 5% ± 0,5%, temperatura de 25°C ± 2°C e umidade relativa de 60% ± 5%. A profundidade de carbonatação foi medida após o rompimento por quebra no ponto médio dos corpos de prova e aspersão de fenolftaleína na superfície rompida. Para cada metade dos CP's rompidos foi medido a coloração deixada pela fenolftaleína em cada uma das quatro faces. A profundidade foi definida pela média dos quatro pontos avaliados. Os ensaios foram

realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica da UFMG. As medidas foram tomadas nas quatro faces de cada amostra.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A caracterização dos agregados miúdos naturais e de RCD foram feitos segundo os ensaios de granulometria, massa específica, massa unitária. Além disso, o agregado de RCD foi avaliado quanto ao inchamento.

#### 4.1.1 Granulometria do agregado miúdo natural e do agregado de RCD

A Tabela 15 apresenta a porcentagem retida de material acumulado em cada uma das peneiras após agitação mecânica do agregado natural e do agregado de RCD. Assim, tanto o agregado natural quanto o agregado de RCD foram classificados como uma areia média grossa (Zona 3), conforme classificação obtida da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

**Tabela 15** - Porcentagem acumulada retida de agregados naturais e RCD.

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem acumulada de material retido (agregado natural)	Porcentagem acumulada de material retido (RCD)
4,75	0,00%	0,00%
2,36	2,17%	9,07%
1,18	19,28%	23,84%
0,60	43,67%	47,45%
0,30	64,60%	72,10%
0,15	88,21%	94,43%
Fundo	100,00%	100,00%

Fonte: Autora, 2021.

Na Figura 9 podemos observar qualitativamente o material retido em cada peneira, da esquerda para direita começando na peneira com abertura de 2,36 mm e finalizando na peneira de menor abertura 0,075 mm.

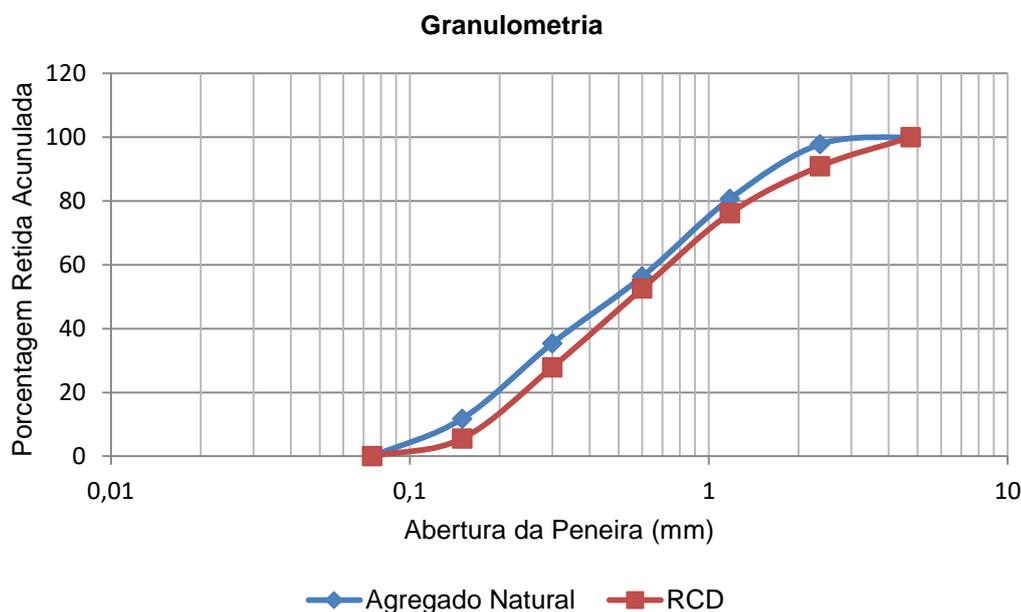
**Figura 9** - Quantidade e tipo do agregado de RCD.



Fonte: Autora, 2021.

Apesar da diferença de origem entre o agregado natural e agregado de RCD, a curva granulométrica da Figura 10 mostra uma distribuição contínua e semelhante entre o tamanho dos grãos do agregado natural e do agregado de RCD. O módulo de finura foi igual a 3,18 (agregado natural) e 3,47 (agregado de RCD). Esses valores do módulo de finura estão na zona utilizável superior para agregado miúdo que varia de 2,9 a 3,5, como preconiza a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Assim, o agregado de RCD pode ser utilizado como agregado miúdo em materiais à base de cimento.

**Figura 10** - Curva granulométrica dos agregados miúdos naturais e RCD.



Fonte: Autora, 2021.

#### 4.1.2 Massa específica e massa unitária do agregado miúdo natural e agregado de RCD

O agregado de RCD apresenta menor massa específica e maior massa unitária em comparação ao agregado natural, como mostra a Tabela 16.

**Tabela 16** - Massa específica e massa unitária dos agregados miúdos.

Propriedade	Agregado Natural	Agregado de RCD
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,51	2,47
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1353,78	1378,67

Fonte: Autora, 2021.

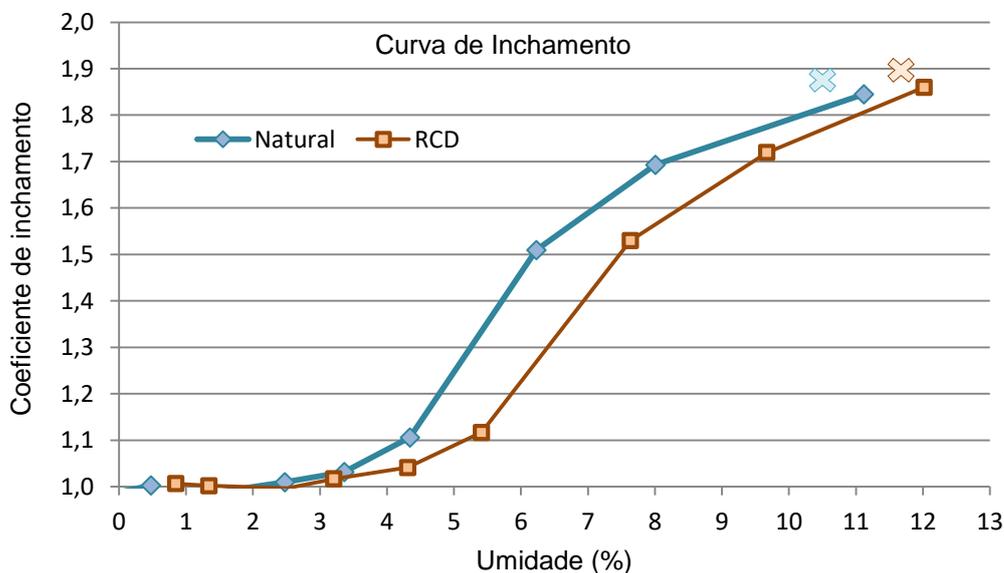
Os resultados da Tabela 16 mostram que a massa específica do agregado de RCD foi 2% menor que do agregado natural. Já a massa unitária do agregado de RCD ficou 2% maior comparada ao agregado natural.

Gomes (2019) e Alves (2020) também utilizaram resíduos provenientes da estação de Reciclagem de Entulho localizada na BR-040. Os resultados obtidos em suas pesquisas foram: 2,57 g/cm<sup>3</sup> e 2,56 g/cm<sup>3</sup> para a massa específica, 1.446 kg/m<sup>3</sup> e 1.490 kg/m<sup>3</sup> para massa unitária, respectivamente. Assim, o valor obtido na Tabela 16 está com menos de 8% de diferença dos valores encontrados pelos autores.

#### 4.1.3 Determinação do inchamento do agregado de RCD

O agregado natural apresentou umidade crítica de 9,9% e coeficiente de inchamento igual a 1,85. Já o agregado reciclado oriundo de RCD apresentou umidade crítica de 11,7% e coeficiente de inchamento igual a 1,87. Os parâmetros descritos foram definidos pelo ponto “X” da Figura 11, determinados conforme a norma NBR 6467 (ABNT, 2006). A água absorvida, aderente aos grãos, provoca afastamento entre eles, resultando no inchamento. Contudo, há um aumento no volume total, e conseqüentemente diminui a densidade específica do agregado de RCD, conforme observado na Tabela 16. O inchamento se aplica na aquisição de agregado miúdo em volume.

**Figura 11** - Curva de inchamento dos agregados com identificação do coeficiente de inchamento.



Fonte: Autora, 2022.

## 4.2 CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA DE CIMENTO

A consistência da argamassa, Figura 12, foi realizada até a obtenção de um fator água/cimento que se proporciona uma trabalhabilidade de argamassa de reparo

sendo mais consistente para moldagem dos corpos de prova, levando assim a adição de aditivo superplastificante redutor de água.

**Figura 12** – Ensaio na argamassa R com espalhamento de 220mm.



Fonte: Autora, 2022.

Nos ensaios, o espalhamento ficou na faixa de 190 mm até 220 mm, com fator  $a/c$  de 0,6, conforme encontrado por Rocha *et al.* (2015) em seu estudo. Os valores da Tabela 17 correspondem ao espalhamento das argamassas N, R, R<sub>0,05OG</sub> e R<sub>0,10G</sub>.

**Tabela 17** - Resultados do Espalhamento para as argamassas N, R, R<sub>0,05OG</sub> e R<sub>0,10G</sub>

Tipo	Índice de Consistência
N	220 mm
R	215 mm
R <sub>0,05OG</sub>	190 mm
R <sub>0,10G</sub>	190 mm

Fonte: Autora, 2022.

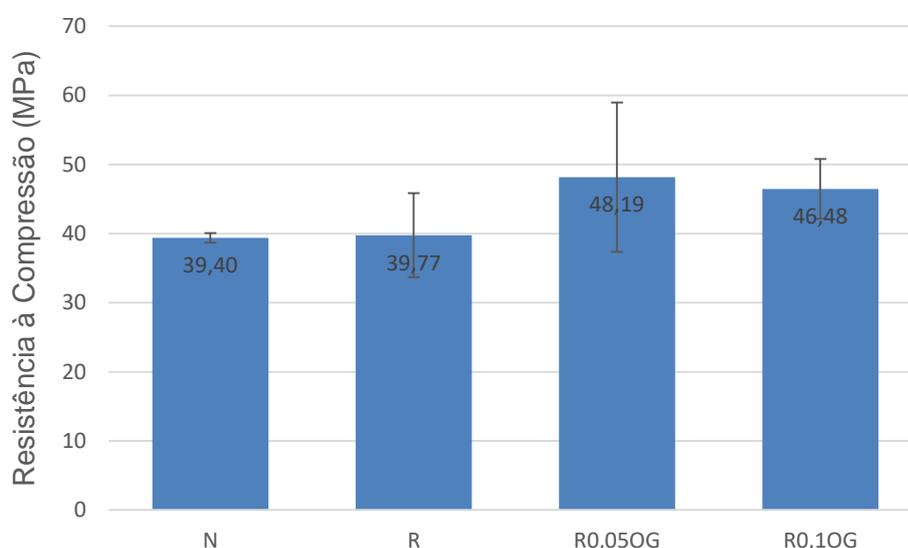
A maior capacidade de absorção de água pelo agregado de RCD, devido ao seu alto teor de finos e porosidade também influenciou na variação do espalhamento. Quanto mais finos existirem maior será a superfície específica na mistura, requerendo maior demanda de água para manter a consistência (ROCHA *et al.*, 2015). Segundo Gomes (2019) a maior absorção de água pelo agregado de RCD gera perda da consistência em 73% comparada à consistência de argamassas com agregado natural.

### 4.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

#### 4.3.1 Resistência à compressão

A Figura 13 apresenta os resultados obtidos com seus respectivos desvios padrão no ensaio de resistência à compressão de três corpos de provas para cada tipo de amostra das argamassas, 100% de agregado natural (N), 100% de agregado de RCD (R), 100% de agregado de RCD + 0,05% de óxido de grafeno ( $R_{0,05OG}$ ) e 100% de agregado de RCD + 0,1% de óxido de grafeno ( $R_{0,10G}$ ).

**Figura 13** - Resultado do ensaio de resistência à compressão das argamassas com agregado natural, com agregado de RCD e agregado de RCD com diferentes teores de OG (0,05% e 0,1%).



Fonte: Autora, 2022.

A faixa esperada de resistência à compressão das argamassas neste presente estudo deve ser no mínimo 35 MPa, conforme NBR 6118 (ABNT, 2014). Todas as argamassas N, R,  $R_{0,05OG}$  e  $R_{0,10G}$  superaram o valor mínimo definido para esta pesquisa.

Os resultados mostram que a substituição do agregado de RCD (R) na argamassa não apresentou variação significativa na resistência à compressão quando comparada à argamassa com agregado natural (N). Uma possível causa de os valores da resistência à compressão terem sido próximos deve-se às partículas de cimento não hidratadas, presentes no agregado de RCD, que completam suas reações na presença de água, levando a uma maior coesão da mistura (NENO *et al.*, 2014). Além disso, os resultados encontrados para a massa específica e massa unitária (Tabela 16) foram similares para o agregado natural e RCD. Assim, o agregado de RCD pode ter aumentado a compacidade da argamassa conforme Tabela 18. A compacidade é

um fator determinante para melhorar a resistência à compressão nas argamassas (AZEVEDO *et al.*, 2020).

**Tabela 18** - Compacidade das argamassas N e R.

Tipo	fc (MPa)	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Compacidade
N	39,40	1,35	1,77
R	39,77	1,38	2,10

Fonte: Autora, 2022.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão da argamassa, com agregado de RCD e adição de OG foram 48 MPa para R<sub>0,05OG</sub> e 46 MPa para R<sub>0,10G</sub>. Esses resultados ficaram acima do valor estabelecido para este trabalho (35 MPa) para concretos em meio agressivo (ABNT, 2014), podendo assim a argamassa ser usada como argamassa de reparo em estruturas danificadas.

Os ensaios realizados nas argamassas confeccionadas com agregado reciclado e adição de OG tiveram maior resistência à compressão 21% (48 MPa) para R<sub>0,05OG</sub> e 17% (46 MPa) para R<sub>0,10G</sub> do que as argamassas com agregado reciclado sem adição de OG (40 MPa). Outros autores (FANG *et al.*, 2017; LONG *et al.*, 2017; LONG *et al.*, 2018) já haviam relatado ganho de resistência à compressão de argamassas da ordem de 10% quando utilizaram 0,1% OG.

O aumento do teor de óxido de grafeno resultou em uma diminuição de 4% na resistência à compressão da argamassa, que pode ser devido à dispersão irregular do OG, levando a aglomeração e enrugamento desse material em algumas regiões e alguns poros ficaram sem preenchimento (LONG *et al.*, 2018).

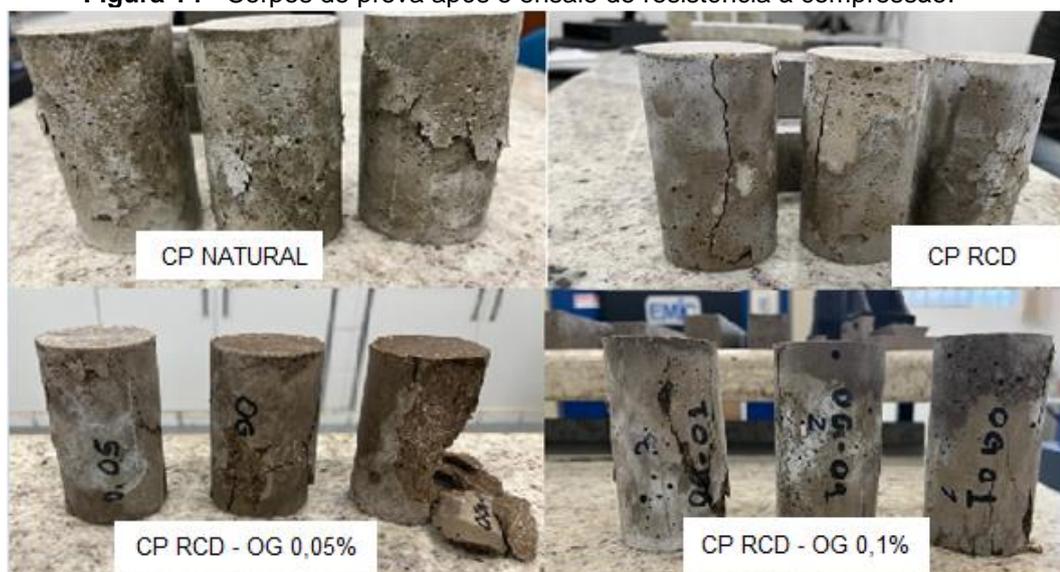
Para Sharma e Kothiyal (2015), o aumento significativo da resistência à compressão pode ser atribuído à proporção de grupos funcionais oxigenados presentes no OG, culminando em ligações covalentes mais fortes entre as partículas do cimento e o OG. Conforme análise de outros autores Pan *et al.* (2015) e Induruki e Nerella (2021), o óxido de grafeno melhora a zona de transição interfacial entre a matriz cimentícia e o agregado, gerando uma estrutura mais compacta com ligações mais fortes.

Segundo Wang *et al.* (2015), An *et al.* (2018), Chintalapudi *et al.* (2020); Wang *et al.* (2019), a argamassa sem OG apresenta cristais de hidratação desordenados por toda a matriz, os quais são responsáveis pela fragilidade do material, por crescerem de maneira aleatória. Já as argamassas com OG apresentam fileiras robustas de produtos hidratados (C-S-H), ordenados em camadas, ou seja, regula-se a geometria

dos hidratos de cimento (CH, C-S-H, AFt e AFm) e há preenchimento dos poros pelas nanopartículas de OG. As partículas menores conseguem preencher tanto os vazios quanto os poros, resultando em um desempenho favorável da resistência à compressão.

A Figura 14 apresenta qualitativamente os corpos de prova das argamassas após o ensaio de resistência à compressão.

**Figura 14** - Corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão.

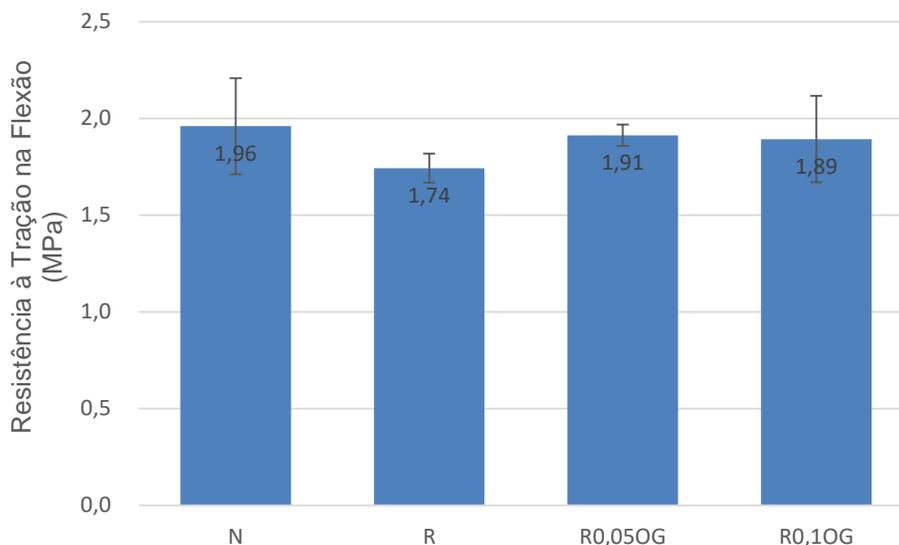


Fonte: Autora, 2022.

#### 4.3.2 Resistência à tração na flexão

A Figura 15 apresenta os resultados obtidos com seus respectivos desvios padrão no ensaio de resistência à tração de três corpos de provas para cada amostra das argamassas 100% de agregado natural (N), 100% de agregado de RCD (R), 100% de agregado de RCD + 0,05% de óxido de grafeno ( $R_{0,05OG}$ ) e 100% de agregado de RCD + 0,1% de óxido de grafeno ( $R_{0,1OG}$ ).

**Figura 15** - Resultado do ensaio de resistência à tração na flexão das argamassas com agregado natural, com agregado de RCD e agregado de RCD com diferentes teores de OG (0,05% e 0,1%).



Fonte: Autora, 2022.

O uso de agregado miúdo reciclado (R) em substituição ao agregado natural (N) levou a uma diminuição de 12% na resistência à flexão. Embora houve uma diminuição na resistência à flexão, no estudo de Katz e Kulisch (2017), considerando substituição de 100% do agregado natural e fator  $a/c$  de 0,6, os autores obtiveram uma redução de 60% da resistência à flexão das argamassas.

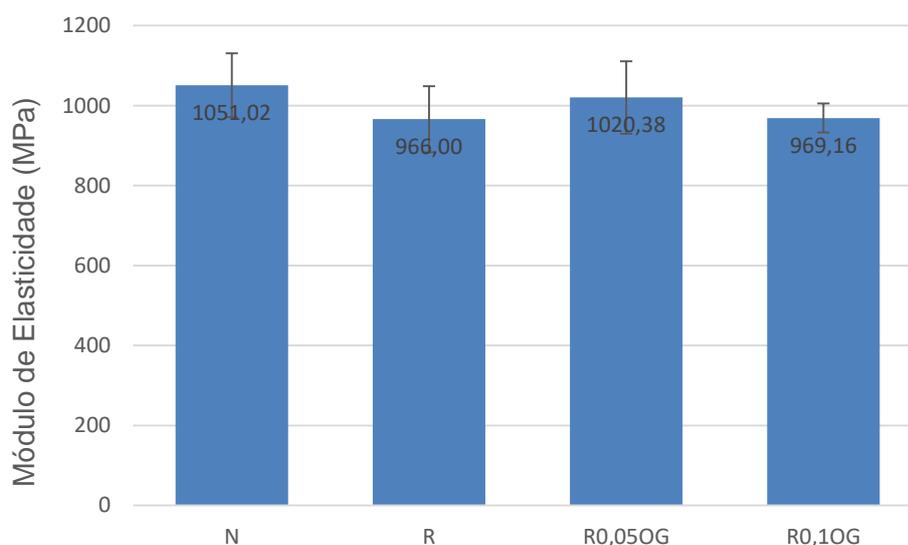
A resistência à tração na flexão aumentou quando o óxido de grafeno foi adicionado à mistura, sendo 10% para adição de 0,05% de OG e 9% para adição de 0,1% de OG. Ao adicionarmos OG na mistura das argamassas de RCD (R), ocorrem reações entre o OG e o cimento que podem preencher os microporos existentes na argamassa (KRYSTEK, 2019). Ao preencher os poros da matriz cimentícia, tem-se um compósito cimentício mais sólido e conseqüentemente mais estruturado levando ao aprimoramento a resistência à tração na flexão (MOHAMMED *et al.*, 2015).

A resistência à tração na flexão apresentou resultados semelhantes para os dois teores de OG (0,05% e 0,1% da massa de cimento). Assim, um teor de 0,05% de OG pode ser adicionado à mistura de argamassa com RCD para melhorar em 10% a resistência à tração na flexão. Considerando os resultados de resistência à compressão (Figura 13) e de resistência à flexão conclui-se que o melhor teor de OG seria 0,05% da massa de cimento, pois o teor de 0,1% apresentou uma queda de 4% na resistência à compressão, embora não tenha alterado o valor da resistência à tração na flexão.

### 4.3.3 Módulo de elasticidade

A Figura 16 apresenta os resultados obtidos com seus respectivos desvios padrão no ensaio para determinação do módulo de elasticidade de três corpos de provas para cada tipo de amostra das argamassas 100% de agregado natural (N), 100% de agregado de RCD (R), 100% de agregado de RCD + 0,05% de óxido de grafeno (R<sub>0,05OG</sub>) e 100% de agregado de RCD + 0,1% de óxido de grafeno (R<sub>0,1OG</sub>).

**Figura 16** - Resultado do ensaio do módulo de elasticidade das argamassas com agregado natural, com agregado de RCD e agregado de RCD com diferentes teores de OG (0,05% e 0,1%).



Fonte: Autora, 2022.

Diferentemente do resultado encontrado na resistência à compressão das argamassas, pode-se verificar que o ensaio do módulo de elasticidade das argamassas com agregado natural (N) obteve um desempenho 9% melhor que as argamassas com RCD (R), mas seguiu a mesma tendência do resultado da resistência à tração na flexão.

Na Figura 16, constata-se que houve uma melhoria do módulo de elasticidade da argamassa em 6% para o teor de 0,05% de OG em relação à argamassa com RCD (R). No entanto, a argamassa com teor de 0,1% de OG não teve um aumento significativo (aumento de 0,3%) do módulo de elasticidade em relação a argamassa R. A incorporação de 0,05% de OG aumenta o módulo de elasticidade em 5% comparado à incorporação de 0,1% de OG.

A incorporação dos dois teores de OG apresentou a mesma tendência nos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, onde ocorreu uma pequena queda nessas propriedades mecânicas com o aumento

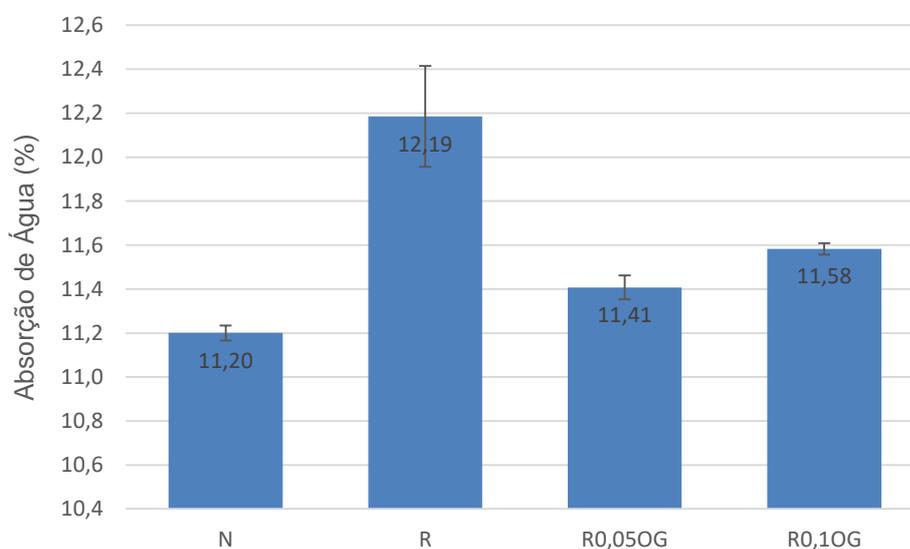
do teor de OG.

#### 4.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE

##### 4.4.1 Absorção de água

A Figura 17 apresenta os resultados obtidos no ensaio de absorção de água de três corpos de provas para cada amostra das argamassas 100% de agregado natural (N), 100% de agregado de RCD (R), 100% de agregado de RCD + 0,05% de óxido de grafeno ( $R_{0,05OG}$ ) e 100% de agregado de RCD + 0,1% de óxido de grafeno ( $R_{0,1OG}$ ).

**Figura 17** - Resultado do ensaio de absorção de água das argamassas com agregado natural, com agregado de RCD e agregado de RCD com diferentes teores de OG (0,05% e 0,1%).



Fonte: Autora, 2022.

A substituição do agregado natural pelo agregado de RCD aumentou a taxa de absorção de água da argamassa em 9%. Este resultado pode ser explicado pelo fato do agregado reciclado ser mais poroso, gerando uma matriz cimentícia menos densa, onde foi preenchida com água durante a imersão.

As taxas de absorção de água das argamassas  $R_{0,05OG}$  e  $R_{0,1OG}$  diminuíram em 7% e 5% em relação a argamassa (R). No entanto, quando OG foi adicionado à argamassa, melhorou-se a taxa de absorção de água, levando a concluir que o OG preencheu os poros da argamassa ao reagir com cimento e água, gerando um material mais compacto.

Embora a substituição do agregado natural pelo agregado de RCD, tenha aumentado absorção de água da argamassa em 5%, era esperado que as propriedades mecânicas reduzissem. Este comportamento foi verificado para a

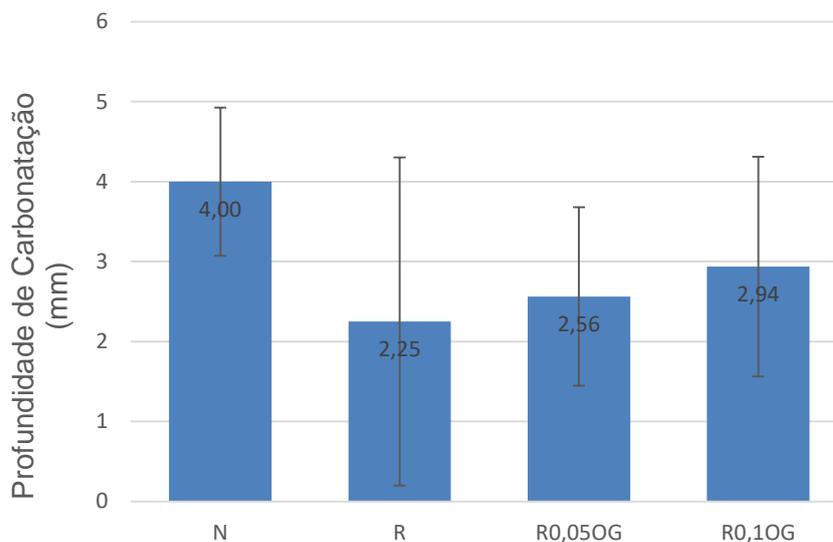
resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade, porém a resistência à compressão não foi alterada. A incorporação do óxido de grafeno diminui a absorção de água das argamassas comparada à argamassa R e aumentou a resistência à compressão, à resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade, exceto para a argamassa  $R_{0,10G}$  que manteve somente o módulo de elasticidade em relação a argamassa R.

Wang *et al.* (2019) observaram que a incorporação de óxido de grafeno reduziu o volume total de poros contidos nas argamassas através da diminuição dos diâmetros dos poros capilares grandes, transformando-os em poros capilares pequenos, com maior área superficial. Ao funcionar como “*template effect*”, promovendo a reação principal influenciando as reações subsequentes, para o crescimento dos produtos de hidratação do cimento, o OG ajuda no preenchimento/ redução dos poros, formando estruturas reticuladas e intertravadas que auxiliam na distribuição de cargas quando aplicadas nas argamassas (LU e OUYANG, 2017; WANG *et al.*, 2019).

#### **4.4.2 Carbonatação**

Os resultados da profundidade de carbonatação foram determinados com régua, em milímetros, e estão apresentados na Figura 18. Para cada corpo de prova foi determinada a maior profundidade de carbonatação, considerando dois corpos de provas para cada tipo de amostra das argamassas, sendo 100% de agregado natural (N), 100% de agregado de RCD (R), 100% de agregado de RCD + 0,05% de óxido de grafeno ( $R_{0,05OG}$ ) e 100% de agregado de RCD + 0,1% de óxido de grafeno ( $R_{0,10G}$ ).

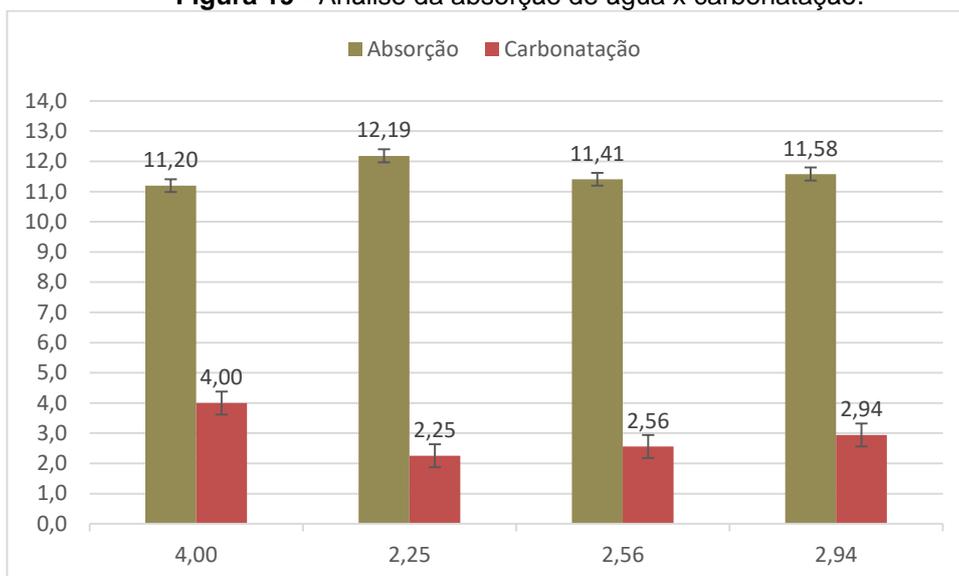
**Figura 18** - Profundidade de penetração do CO<sub>2</sub> das argamassas com agregado natural, com agregado de RCD e agregado de RCD com diferentes teores de OG (0,05% e 0,1%).



Fonte: Autora, 2022.

Os dados da Figura 18 demonstram que os agregados de RCD na argamassa R reduz o avanço da frente de carbonatação em 56% comparada a argamassa N. Pelo desvio padrão da argamassa R, pode-se verificar que a carbonatação foi irregular. Segundo Salles (2020) o agregado de RCD absorve mais água do que o agregado natural. Assim, durante a moldagem da argamassa R houve maior absorção de água de amassamento pelo RCD, conforme adicionou-se aditivo, e reduzindo o fator a/c efetivo da mistura, resultando em uma matriz menos porosa e assim com menor frente de carbonatação.

As argamassas com RCD e adição de OG tiveram resultados de 2,56 mm para R<sub>0,05OG</sub> e 2,94 mm R<sub>0,1OG</sub>, com aumento na frente de carbonatação em 14% e 31%, respectivamente, quando comparados a argamassa R. Logo, foi possível verificar que a presença do OG fez com que a carbonatação fosse mais lenta. Esses resultados mostram que quando OG é adicionado à mistura, a capacidade de absorção de água e, portanto, a porosidade diminui, mostrando que o OG contribui para a compacidade da argamassa e, deste modo, reduziu porosidade no estado endurecido, levando a menor profundidade de carbonatação (ANDRADE *et al.*, 2017; LEDESMA *et al.*, 2016). A **Figura 19** mostra essa análise graficamente.

**Figura 19** - Análise da absorção de água x carbonatação.

Fonte: Autora, 2022.

Os resultados do módulo de elasticidade (Figura 16) e da carbonatação (Figura 18) mostram que a argamassa  $R_{0,10G}$  comparada a  $R_{0,05OG}$  teve menos poros preenchidos, pois a rigidez, analisada tanto pela resistência à compressão quanto pela frequência ressonante, e a carbonatação tiveram melhores resultados para a argamassa  $R_{0,05OG}$  do que para a argamassa  $R_{0,10G}$ .

Portanto, todas as misturas de argamassas nesta presente pesquisa apresentaram profundidade de carbonatação abaixo ou igual a 5 mm, conforme apresenta qualitativamente a Figura 20. Assim, os valores encontrados estão dentro do mínimo normativo de 25 mm para cobertura de concretos estruturais NBR 6118 (ABNT, 2014).

**Figura 20** - Amostras após a aspersão de fenolftaleína.

Fonte: Autora, 2022.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de agregado miúdo proveniente de resíduos da construção e demolição, na confecção de argamassa de reparo com adição do nanomaterial óxido de grafeno melhorou o desempenho nas propriedades mecânicas e de durabilidade, sendo adequadamente utilizável para reparar estruturas de concreto.

A partir dos resultados deste estudo, verifica-se que:

- Na caracterização dos agregados naturais e de RCD apresentaram valores semelhantes para granulometria, massa unitária, massa específica e inchamento do agregado.
- Os poros da argamassa ao serem preenchidos com o OG tornou a estrutura mais compacta e densa no estado endurecido, melhorando o desempenho das argamassas  $R_{0,05OG}$  e  $R_{0,10G}$  quando comparadas a argamassa R;
- As argamassas quando submetidas aos ensaios de resistência à compressão obtiveram resultados próximos para argamassa R comparada a argamassa N. Já as argamassas  $R_{0,05OG}$  e  $R_{0,10G}$  tiveram um aumento de 21% e 17%, respectivamente em relação a argamassa R;
- O ensaio de resistência à tração na flexão teve uma redução de 12% na capacidade de carga da argamassa R comparada a argamassa N. Porém, as argamassas  $R_{0,05OG}$  e  $R_{0,10G}$  tiveram um aumento de 10% e 9%, respectivamente em relação a argamassa R;
- A argamassa R obteve um módulo de elasticidade 9% menor quando comparado a argamassa N. Já a incorporação de 0,05% de OG na mistura de argamassa com RCD reforçou a microestrutura ao promover a hidratação do cimento e refinando a estrutura dos poros melhorou o módulo de elasticidade da argamassa em 6% comparada a argamassa R. Já as argamassas R e  $R_{0,10G}$  não tiveram variação significativa do módulo de elasticidade;
- A taxa de absorção de água para R foi 9% maior do que para N, fato que pode ser justificado pela maior porosidade do agregado de RCD que necessita de mais água para completar as reações. Porém, o OG reduziu a taxa de absorção de água em 7% e 5%, respectivamente para os teores de 0,05% de 0,1% de OG, levando a considerar que o OG preencheu os poros e tornou a estrutura mais compacta.

- A argamassa R apresentou menor frente de carbonatação do que a argamassa N, infere-se que o RCD absorveu mais água da mistura e assim reduzindo a frente de carbonatação. A presença do OG nas argamassas fez com que a frente de carbonatação fosse ainda mais lenta do que nas argamassas com agregado de RCD sem OG. A redução carbonatação sendo de 14% e 31% para as argamassas  $R_{0,05OG}$  e  $R_{0,10G}$  quando comparadas a argamassa R.

Recomenda-se a utilização de agregados oriundos de resíduos da construção e demolição, visto que esses agregados reciclados podem ser substituídos por agregado natural sem alterações substanciais nas propriedades da argamassa.

### 5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Avaliar a aderência dessa argamassa em uma estrutura que necessita de reparo;
- Investigar a microestrutura da argamassa com RCD e adição de OG, avaliando a cinética da formação dos produtos de hidratação do cimento;
- Avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade apresentadas, mas em diferentes idades de cura dos corpos de prova.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E.; SQUIAVON, J. Z.; ORTOLAN, T. L. P. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70-83, 2017.
- AN, J.; MCINNIS, M.; CHUNG, W.; NAM, B. H. Feasibility of using graphene oxide nanoflake (GONF) as additive of cement composite. **Applied Sciences**, v. 8, 2018. Disponível em: < [www.mdpi.com/journal/applsci](http://www.mdpi.com/journal/applsci)>. Acesso em: 22 mar. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 248: agregados – determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13279: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6467: agregados – determinação do inchamento de agregado miúdo – método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto – procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16972: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16916: agregado miúdo – determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ALVES, G. V. O. **Avaliação da influência de métodos de mistura modificados e adição de cinzas de casca de arroz em concretos de agregados reciclados**. 2020. 163f. Trabalho de conclusão (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Belo Horizonte. 2020.
- AZEVEDO, A. R. G.; CECCHIN, D.; CARMO, D. F.; SILVA, F. C.; CAMPOS, C. M. O.; SHTRUCKA, T. G.; MARVILLA, M. T.; MONTEIRO, S. N. Analysis of the compactness and properties of the hardened state of mortars with recycling of construction and demolition waste (CDW). **Journal of Materials Research and Technology**, n. 9, v. 3, p. 5942-5952, 2020.
- BABAK, F.; ABOLFAZL, H.; ALIMORAD, R.; PARVIZ, G. Preparation and mechanical properties of graphene oxide: cement nanocomposites. **The Scientific World Journal**, 2014. Disponível em: < <https://www.ncbi.nlm.nih.ez107.periodicos.capes.gov.br/pmc/articles/PMC3915539/>>
- BARAZZETTI, F. Argamassas – Tipos, Traços e Normas. **Materiais de Construção / Materiais**, 2021. Disponível em: < <https://carluc.com.br/materiais-de-construcao/argamassa/>>
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, 2002.
- CAO, M. L.; ZHANG, H. X.; ZHANG, C. Effect of graphene on mechanical properties of cement mortars. **Journal of Central South University**, v. 23, p. 919-925, 2016.
- CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAUJO, R. C.; ANGELIM, R.; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, v. 64, p. 288-300, 2018.
- CHINDAPRASIRT, P.; SUKONTASUKKUL P.; TECHAPHATTHANAKON, A.; KONGTUN, S.; RUTTANAPUN, C.; YOO, D. Y.; TANGCHIRAPAT, W.; LIMKATANYU, S.; BANTHIA, N. Effect of graphene oxide on single fiber pullout behavior. **Construction and Building Materials**, v. 280, 2021.
- CHINTALAPUDI, K.; PANNEM, R. M. R. The effects of graphene oxide addition on hydration process, crystal shapes, and microstructural transformation of ordinary Portland cement. **Journal of Building Engineering**, v. 32, 2020a.

\_\_\_\_\_. Strength properties of graphene oxide cement composites. **Materials Today: Proceedings**, 2020b.

CHEN, J.; ZHAO, D.; GE, H.; WANG, J. Graphene oxide-deposited carbon fiber/cement composites for electromagnetic interference shielding application. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 66-72, 2015.

CHU, H.; ZHANG, Y.; WANG, F.; FENG, T.; WANG, L.; WANG, D. Effect of graphene oxide on mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete prepared from recycled sand. **Nanomaterials**, v. 10, 2020.

COLANGELO, F.; CIOFFI, R. Mechanical properties and durability of mortar containing fine fraction of demolition wastes produced by selective demolition in South Italy. **Composite Part B**, v. 115, p. 43-50, 2017.

CORSO, M.; BERTO, L. K.; ALBUQUERQUE, A. C. D.; OLIVEIRA, J. H.; FAVARO, S. L.; REZENDE, L. C. S. H. Incorporação de óxido de grafeno em argamassa de revestimento: uma visão sustentável. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 1, p. 297-312, 2020.

CUI, D.; WEI, H.; ZUO, X.; ZHENG, K.; WANG, Q. Use of graphene oxide to improve the durability and mechanical properties of mortar immersed in flowing river for three years. **Nanomaterials**, v. 10, 2020.

DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 228-235, 2018.

DU, H.; GAO, H. J.; PANG, S.D. Improvement in concrete resistance against water and chloride ingress by adding graphene nanoplatelet. **Cement and Concrete Research**, v. 83, p. 114-123, 2016.

FANG, C.; LONG, W.; WEI, J.; XIAO, B.; YAN, C. Effect of graphene oxide on mechanical properties of recycled mortar. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 274, 2017.

FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; NOBREGA, A. K. C.; PEREIRA, J. E. S.; LEDESMA, E. F. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behavior of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 601-612, 2019.

FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; MAIA, C.; PINTO, L.; AZEVEDO, A. R. G.; BRITO, J. Long-term analysis of the physical properties of the mixed recycled aggregate and their effect on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 274, 2020.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p.

GOMES, C. L. **Avaliação mecânica e de durabilidade de concretos fabricados com resíduo de construção e demolição e cinza de casca de arroz**. 2019. 66f. Trabalho de conclusão (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Belo Horizonte. 2019.

HO, V. D.; NG, C. T.; COGHLAN, C. J.; GOODWIN, A.; GUCKIN, C. M.; OZBAKKALOGLU, T.; LOSIC, D. Electrochemically produced graphene with ultra large particles enhances mechanical properties of Portland cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 234, 2020.

HORTA, R. A. S. **Avaliação das propriedades mecânicas e reológicas de pastas de cimento com adição de óxido de grafeno**. 2020. 123f. Trabalho de conclusão (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Belo Horizonte. 2020.

HORSZCZARUK, E.; MIJOWSKA, E.; KALENCZUK, R. J.; ALEKSANDRZAK, M.; MIJOWSKA, S. Nanocomposite of cement/ graphene oxide – impact on hydration kinetics and Young's modulus. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 234-242, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON. **Materiais de Construção Civil**, 3ª ed, 2017. Disponível em: < [http://ibracon.org.br/eventos/59cbc/Paginas\\_Iniciais\\_Rev6R.pdf](http://ibracon.org.br/eventos/59cbc/Paginas_Iniciais_Rev6R.pdf)>. Acesso em: 12 jun. 2022.

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

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNÁNDEZ, J. M.; BRITO, J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 679-690, 2013.

JINCHANG, P.; YEMING, W. Graphene oxide on the microstructure and mechanical properties of cement based composite material. **Frattura ed Integrità Strutturale**, v. 45, p. 156-163, 2018.

KATZ, A.; KULISCH, D. Performance of mortars containing recycled fine aggregate from construction and demolition waste. **Materials and Structures**, v. 50, n. 199, 2017.

KJAERNSMO, H.; KAKAY, S.; FOSSA, K. T.; GRONLI, J. The effect of graphene oxide on cement mortar. IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**, 362, 2018.

KIM, B.; TAYLOR, L.; TROY, A.; MCARTHUR, M.; PTASZYNSKA, M. The effects of graphene oxide flakes on the mechanical properties of cement mortar. The 2017 World Congress on: Advances in Structural Engineering and Mechanics, Korea, 2017.

KRYSTEK, M. Mechanical properties of cement mortar with graphene oxide. **Architecture, Civil Engineering, Environment**, n.1, p. 91-96, 2019.

KUNDANATI, R. R.; MALPANI, T.; SAIRAM, V. Study on mechanical properties of mortar using alccofine and graphene oxide. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 2431-2438, 2020.

LAFARGE. Ultra Rápido - CPV ARI Fácil. Disponível em: <[http://www.lafarge.com.br/wps/portal/br/Cimentos\\_Holcim\\_Detail?WCM\\_GLOBAL\\_CONTEXT=/wps/wcm/connect/lib\\_br/Site\\_br/AllProductDataSheet/Holcim\\_1444852241940/Product](http://www.lafarge.com.br/wps/portal/br/Cimentos_Holcim_Detail?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connect/lib_br/Site_br/AllProductDataSheet/Holcim_1444852241940/Product)>. Acesso em: jun. 2021.

LEDESMA, E. F.; GÓMEZ, A. I. T.; LOPEZ, M.; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J. R. Effect of powdered mixed recycled aggregates on bedding mortar properties. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 20, n. S1, p. 1-17, 2016a.

LEDESMA, E. F.; JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; CORINALDESI, V.; GODINO, F. J. I. A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. **Materiales de Construcción**, v. 66, n. 321, 2016b.

LERF, A.; HE, H.; FORSTER, M.; KLINOWSKI, J. Structure of graphite oxide revisited. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 102, n. 23, p. 4477-4482, 1998.

LI, C. Y.; CHEN, S. J.; LI, W. G.; LI, X. Y.; RUAN, D.; DUAN, W. H. Dynamic increased reinforcing effect of graphene oxide on cementitious nanocomposite. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 694-702, 2019.

LI, X.; LI, C.; LIU, Y.; CHEN, S. J.; WANG, C. M.; SANJAYAN, J. G.; DUAN, W. H. Improvement of mechanical properties by incorporating graphene oxide into cement mortar. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, v. 25, n. 15-16, p. 1313-1322, 2018.

LONG, W. J.; ZHENG, D.; DUAN, H.; HAN, N.; XING, F. Performance enhancement and environmental impact of cement composites containing graphene oxide with recycled fine aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 194, p. 193-202, 2018.

LONG, W. J.; WEI, J. J.; MA, H.; XING, F. Dynamic mechanical properties and microstructure of graphene oxide nanosheets reinforced cement composites. **Nanomaterials**, v. 7, n. 12, 2017.

LU, L.; OUYANG, D. Properties of cement mortar and ultra-high strength concrete incorporating graphene oxide nanosheets. **Nanomaterials**, v. 7, n. 187, 2017.

LV, S.; MA, Y.; QIU, C.; SUN, T.; LIU, J.; ZHOU, Q. Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 1217-127, 2013.

MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 1, n. 2, p. 176-188, 2013.

MARQUES, A. I.; MORAIS, J.; MORAIS, P.; VEIGA, M. R.; SANTOS, C.; CANDEIAS, P.; FERREIRA, J. G. Modulus of elasticity of mortars: static and dynamic analyses. **Construction and Building Materials**, v. 232, 2020.

- MARTINEZ, P. S.; CORTINA, M. G.; MARTINEZ, F. F. Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. **Journal of Cleaner Production**, v. 118, p. 162-169, 2016.
- MAZURANA, L. **Captura de CO<sub>2</sub> em argamassas de revestimento através de carbonatação natural**. 2019. 120f. Trabalho de conclusão (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Curso de Mestrado em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Medianeira. 2019.
- MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n.8, p. 601-605, 2009.
- MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part I – analysis of the effect of materials finer than 75µm on mortar properties. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 615-624, 2006.
- MOHAMMED, A.; SANJAYAN, J. G.; DUAN, W. H.; NAZARI, A. Incorporating graphene oxide in cement composites: a study of transport properties. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 341-347, 2015.
- NENO, C.; BRITO, J.; VEIGA, R. Using fine recycled concrete aggregate for mortar productions. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 168-177, 2014.
- NETO, G. A. S.; LEITE, M. B. Study of the influence of the mortar fine recycled aggregate ratio and the mixing sequence on the behavior of new mortars. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, 2018.
- OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. **Determinação do módulo de elasticidade do concreto empregando a técnica de excitação por impulso**, 2022. Disponível em: <[https://www.sonelastic.com/images/downloads/ITC-07\\_IET\\_MOE\\_Concretos\\_PT\\_v\\_1.4.pdf](https://www.sonelastic.com/images/downloads/ITC-07_IET_MOE_Concretos_PT_v_1.4.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2022.
- PAN, Z.; HE, L.; QIU, L.; KORAYEM, A. H.; LI, G.; ZHU, J. W.; COLLINS, F.; LI, D.; DUAN, W. H.; WANG, M. C. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite. **Cement and Concrete Research**, v. 58, p. 140-147, 2015.
- PAULETTI, C.; POSSAN, E.; MOLIN, D. C. C. D. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2006.
- PESARALANKA, V.; KHED, V. C.; Flow ability and compressive strength test on self-compacting mortar using graphene oxide. **Material Today: Proceedings**, v. 33, p. 491-495, 2020.
- POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista Técnico-Científica**, v. 1, p. 1-14, 2013. ISSN 2358-5420.
- QI, X.; ZHANG, S.; WANG, T.; GUO, S.; REN, R. Effect of high-dispersible graphene on the strength and durability of cement mortars. **Materials**, v. 14, n. 915, 2021.
- REHMAN, S. K. U.; IBRAHIM, Z.; JAMEEL, M.; MEMON, S. A.; JAVED, M. F.; ASLAM, M.; MEHMOOD, K.; NAZAR, S. Assessment of rheological and piezo resistive properties of graphene based cement composites. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n 64, 2018.
- RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 3. Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; Escola de Engenharia da UFMG, 2011.
- ROCHA, A. K. A.; DINIZ, H. A. A.; ANJOS, M. A. S.; BARBOSA, N. P.; ARAUJO, A. R. C. Estudo de carbonatação acelerada em argamassas do caa com elevados teores de adições minerais. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 7, 2021. ISSN 2447-7028.
- ROCHA, L. S.; CURCIO, D. R.; SIGNORINI, V. B.; DUFAU, T. Dosagem e caracterização de argamassas de assentamento e revestimento com agregados de resíduos da construção civil. IV Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil, 2015.
- ROMANO, R. C. O.; TORRES, D. R.; PILEGGI, R. G. Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 219-226, 2015.

SALLES, P. V.; GOMES, C. L.; POGGIALI, F. S. J.; RODRIGUES, C.S. A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 177-196, 2021.

SANTANA, T. S.; PEREIRA, C. H. A. F. Avaliação da influência da utilização de agregado miúdo reciclado em argamassas estabilizadas. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 305-318, 2020.

SEBAIBI, Y.; DHEILLY, R. M.; QUENEUDEC, M. Study of the water-retention capacity of a lime-sand mortar: influence of the physicochemical characteristics of the lime. **Cement and Concrete Research**, n. 33, p. 689-696, 2002.

SECO, A.; OMER, J.; MARCELINO, S.; ESPUELAS, S.; PRIETRO, E. Sustainable unfired bricks manufacturing from construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 167, n. 10, p. 154-165, 2018.

SEGAT, G. T. **Manifestações patológicas observadas em revestimentos de argamassa: estudo de caso em conjunto habitacional popular na cidade de Caxias do Sul (RS)**. 2005. 166f. Trabalho de conclusão (Mestrado em Engenharia) – Curso de Mestrado Profissionalizante, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre. 2006.

SHAMSAEI E.; SOUZA, F. B.; YAO, X.; BENHELAL, E.; AKBARI, A.; DUAN, W. Graphene-based nanosheets for stronger and more durable concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 642-660, 2018.

SHARMA, S.; KOTHIYAL, N. C. Comparative effects of pristine and ball-milled graphene oxide on physic-chemical characteristics of cement mortar nanocomposites. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 256-268, 2016.

\_\_\_\_\_. Influence of graphene oxide as dispersed phase in cement mortar matrix in defining the crystal patterns of cement hydrates and its effect on mechanical, microstructural and crystallization properties. **Royal Society of Chemistry**, v. 5, p. 642-657, 2015.

SILVA, E. L. D.; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 4. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2005.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS – SINDUSCON-MG. **Alternativas para a destinação de resíduos da construção civil**, 3ª ed, 2018. Disponível em: <<http://www.sinduscon-mg.org.br/sinduscon-mg-disponibiliza-cartilha-gratuita-sobre-residuos-da-construcao/>>. Acesso em: 27 mar. 2021.

STANKOVICH, S.; DIKIN, D. A.; DOMMETT, G. H. B.; KOHLHAAS, K. M.; ZIMNEY, E. J.; STACH, E. A.; PINER, R. D.; NGUYEN, S. T.; RUOFF, R. S. Graphene-based composite materials. **Nature**, v. 442, n. 20, p. 282-286, 2006a.

STANKOVICH, S.; PINER, R. D.; CHEN, X.; WU, N.; NGUYEN, S. T.; RUOFF, R. S. Stable aqueous dispersions of graphitic nanoplatelets via the reduction of exfoliated graphite oxide in the presence of poly (sodium 4-styrenesulfonate). **Journal of Materials Chemistry**, v. 16, p. 155-158, 2006b.

SUN, H.; LING, L.; REN, Z.; MEMON, S. A.; XING, F. Effect of graphene oxide/ graphene hybrid on mechanical properties of cement mortar and mechanism investigation. **Nanomaterials**, v. 10, n. 113, 2020.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272-292, 2018.

TASCA, J. E.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; ALVES, M. An approach for selecting a theoretical framework for the evaluation of training programs. **Journal of European Industrial Training**, v. 34, n. 7, p. 631-655, 2010.

TOMAZ, E. Argamassas de revestimentos. **Revista Técnica: Canteiro Mecanizado**, p. 10, 2015. São Paulo.

TYSON, B. M.; AL-RUB, R. K. A.; YAZDANBAKHS, A.; GRASLEY, Z. Carbon nanotubes and carbon nanofibers for enhancing the mechanical properties of nanocomposite cementitious materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 7, p. 1028-1035, 2011.

WANG, B.; ZHAO, R. Effect of graphene nano-sheets on the chloride penetration and microstructure of the cement based composite. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 715-722, 2018.

WANG, Q.; WANG, J.; LU, C. X.; LIU, B. W.; ZHANG, K.; LI, C. Z. Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement. **New Carbon Materials**, v. 30, n.4, p. 349-356, 2015.

WANG, Y.; YANG, J.; OUYANG, D. Effect of graphene oxide on mechanical properties of cement mortar and its strengthening mechanism. **Materials**, n. 12, 2019.

YAN, X.; ZHENG, D.; YANG, H.; CUI, H.; MONASTERIO, M.; LO, Y. Study of optimizing graphene oxide dispersion and properties of the resulting cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 257, 2020.

ZHAI, S.; PANG, B.; LIU, G.; ZHANG, Y.; XU, K.; SHE, W.; ZHANG, Y. Investigation on preparation and multifunctionality of reduced graphene oxide cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 275, 2021. ISSN 0950-0618.

ZHAO, L.; HOU, D.; WANG, P.; GUO, X.; ZHANG, Y.; LIU, J.; ZHANG, J. Experimental and molecular dynamics studies on the durability of sustainable cement-based composites: Reinforced by graphene. **Construction and Building Materials**, v. 257, 2020.

ZHAO, Z.; REMOND, S.; DAMIDOT, D.; XU, W. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 179-184, 2015.

## ANEXO

## Anexo A – Resultados da Granulometria

A granulometria é apresentada abaixo conforme ordem de execução dos ensaios. Os valores em negrito são dados considerados *outliers*, sendo esses resultados desconsiderados no cálculo da granulometria.

	Abertura peneira (mm)	Massa Retida em Cada Peneira (g)			Fração Retida			Porcentagem Retida			Fração Passante			Porcentagem Passante		
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Areia Natural	4,75	0,00	<b>0,00</b>	0,00	0,0000	<b>0,0000</b>	0,0000	0,00	<b>0,00</b>	0,00	1,00	<b>1,00</b>	1,00	100,00	<b>100,00</b>	100,00
	2,36	11,65	<b>57,44</b>	10,09	0,0233	<b>0,1045</b>	0,0202	2,33	<b>10,45</b>	2,02	0,98	<b>0,90</b>	0,98	97,67	<b>89,55</b>	97,98
	1,18	81,86	<b>69,94</b>	89,21	0,1637	<b>0,1272</b>	0,1783	16,37	<b>12,72</b>	17,83	0,81	<b>0,77</b>	0,80	81,30	<b>76,83</b>	80,15
	0,6	118,20	<b>114,23</b>	125,81	0,2364	<b>0,2078</b>	0,2515	23,64	<b>20,78</b>	25,15	0,58	<b>0,56</b>	0,55	57,66	<b>56,05</b>	55,01
	0,3	104,54	<b>105,17</b>	104,80	0,2091	<b>0,1913</b>	0,2095	20,91	<b>19,13</b>	20,95	0,37	<b>0,37</b>	0,34	36,75	<b>36,92</b>	34,06
	0,15	124,00	<b>130,07</b>	112,18	0,2480	<b>0,2366</b>	0,2242	24,80	<b>23,66</b>	22,42	0,12	<b>0,13</b>	0,12	11,95	<b>13,26</b>	11,64
	Fundo	59,75	<b>72,90</b>	58,22	0,1195	<b>0,1326</b>	0,1164	11,95	<b>13,26</b>	11,64	0,00	<b>0,00</b>	0,00	0,00	<b>0,00</b>	0,00
		500,00	<b>549,75</b>	500,31	1,0000	<b>1,0000</b>	1,0000	100,00	<b>100,00</b>	100,00						

	Abertura peneira (mm)	Massa Retida em Cada Peneira (g)		Média Massa Retida em Cada Peneira (g)	Fração Retida	Porcentagem Retida	Porcentagem Retida Acumulada	Fração Passante	Porcentagem Passante
		Amostra 1	Amostra 3	Média de 1 e 3					
Areia Natural	4,75	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,000	0,00	1,00	100,00
	2,36	11,65	10,09	10,87	0,0217	2,173	2,17	0,98	97,83
	1,18	81,86	89,21	85,54	0,1710	17,102	19,28	0,81	80,72
	0,6	118,20	125,81	122,01	0,2439	24,393	43,67	0,56	56,33
	0,3	104,54	104,80	104,67	0,2093	20,928	64,60	0,35	35,40
	0,15	124,00	112,18	118,09	0,2361	23,611	88,21	0,12	11,79
	Fundo	59,75	58,22	58,99	0,1179	11,793	100,00	0,00	0,00
		500,00	500,31	500,16	1,0000	100,00			

	Abertura peneira (mm)	Massa Retida em Cada Peneira (g)			Fração Retida			Porcentagem Retida			Fração Passante			Porcentagem Passante		
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
RCD	4,75	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	100,00	100,00	100,00
	2,36	33,80	55,33	46,89	0,0676	0,1106	0,0939	6,76	11,06	9,39	0,93	0,89	0,91	93,24	88,94	90,61
	1,18	62,87	84,75	73,93	0,1257	0,1694	0,1481	12,57	16,94	14,81	0,81	0,72	0,76	80,66	72,00	75,80
	0,6	112,29	123,27	118,42	0,2246	0,2464	0,2372	22,46	24,64	23,72	0,58	0,47	0,52	58,21	47,37	52,09
	0,3	128,45	117,89	123,29	0,2569	0,2356	0,2469	25,69	23,56	24,69	0,33	0,24	0,27	32,51	23,80	27,40
	0,15	127,92	96,26	110,76	0,2559	0,1924	0,2218	25,59	19,24	22,18	0,07	0,05	0,05	6,93	4,56	5,21
	Fundo	34,64	22,84	26,04	0,0693	0,0456	0,0521	6,93	4,56	5,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		499,97	500,34	499,33	1,0000	1,0000	1,0000	100,00	100,00	100,00						

	Abertura peneira (mm)	Massa Retida em Cada Peneira (g)			Média Massa Retida em Cada Peneira (g)	Fração Retida	Porcentagem Retida	Porcentagem Retida Acumulada	Fração Passante	Porcentagem Passante
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média de 1, 2 e 3					
RCD	4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,000	0,00	1,00	100,00
	2,36	33,80	55,33	46,89	45,34	0,0907	9,070	9,07	0,91	90,93
	1,18	62,87	84,75	73,93	73,85	0,1477	14,774	23,84	0,76	76,16
	0,6	112,29	123,27	118,42	117,99	0,2360	23,604	47,45	0,53	52,55
	0,3	128,45	117,89	123,29	123,21	0,2465	24,648	72,10	0,28	27,90
	0,15	127,92	96,26	110,76	111,65	0,2233	22,335	94,43	0,06	5,57
	Fundo	34,64	22,84	26,04	27,84	0,0557	5,569	100,00	0,00	0,00
		499,97	500,34	499,33	499,88	1,0000	100,00			

### Anexo B – Resultados Massa Específica e Massa Unitária

	massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	massa recipiente + agregado (kg)	massa recipiente vazio (kg)	volume recipiente (l)	volume recipiente (m <sup>3</sup> )
Areia Natural	1352,00	23,44	3,16	15	0,015
	1354,67	23,48	3,16	15	0,015
	1354,67	23,48	3,16	15	0,015
	<b>1353,78</b>				
RCD	1376,00	23,80	3,16	15	0,015
	1380,00	23,86	3,16	15	0,015
	1380,00	23,86	3,16	15	0,015
	<b>1378,67</b>				

	massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Quantidade de agregado miúdo seco (g)	Leitura do frasco (cm <sup>3</sup> )	Água no Frasco (cm <sup>3</sup> )
Areia Natural	2,50	500	400	200
	2,53	500	398	200
	<b>2,51</b>			
RCD	2,45	500	404	200
	2,48	500	401,5	200
	<b>2,47</b>			

### Anexo C – Resultados do Inchamento do RCD

Umidade (%)	mi (massa da cápsula + material) (g)	Quantidade de água (g)	Massa da cápsula (g)	mf (massa cápsula + agregado) (g)	Teor de Umidade h (%)	Tara (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Ma (massa unitária seca) (g)	Gama s (g/cm <sup>3</sup> )	Mh (massa unitária úmida) (g)	Gama h (g/cm <sup>3</sup> )	Coefficiente de Inchamento
0,0		0	0			9560	4137	20220	2,577			
0,5	38,35	101	14,57	38,15	0,85	9560	4137	20220	2,577	20240	2,582	1,01
1,0	34,41	101	14,03	34,14	1,34	9560	4137	20220	2,577	20340	2,606	1,00
2,0	38,25	202	14,55	37,67	2,51	9560	4137	20220	2,577	20520	2,649	1,00
3,0	50,25	202	13,88	49,12	3,21	9560	4137	20220	2,577	20380	2,615	1,02
4,0	71,86	202	13,28	69,44	4,31	9560	4137	20220	2,577	20240	2,582	1,04
5,0	79,47	202	13,82	76,1	5,41	9560	4137	20220	2,577	19620	2,432	1,12
7,0	68,97	404	13,99	65,07	7,64	9560	4137	20220	2,577	17060	1,813	1,53
9,0	79,66	404	13,89	73,86	9,67	9560	4137	20220	2,577	16360	1,644	1,72
12,0	84,13	606	13,30	76,53	12,02	9560	4137	20220	2,577	15980	1,552	1,86

## Anexo D – Resultados do Ensaio de Absorção

Estufa	Natural (g)			RCD (g)			RCD +OG 0,05% (g)			RCD +OG 0,1% (g)		
	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas
CP1	377,10	376,70	376,68	381,90	381,13	381,06	380,62	379,67	379,37	371,09	370,37	369,97
CP2	390,39	389,93	389,87	368,02	367,27	367,18	377,71	376,86	376,65	373,82	372,91	372,55
CP3	375,11	374,66	374,60	370,10	369,35	369,23	385,25	384,50	384,28	370,62	369,56	369,22
	<b>380,87</b>	<b>380,43</b>	<b>380,38</b>	<b>373,34</b>	<b>372,58</b>	<b>372,49</b>	<b>381,19</b>	<b>380,34</b>	<b>380,10</b>	<b>371,84</b>	<b>370,95</b>	<b>370,58</b>

Imersão em água	Natural (g)			RCD (g)			RCD +OG 0,05% (g)			RCD +OG 0,1% (g)		
	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas
CP1	418,47	418,94	418,98	425,91	426,49	426,56	422,38	422,98	422,88	412,22	412,73	412,71
CP2	432,89	433,39	433,39	411,48	412,05	412,05	419,08	419,72	419,55	415,36	415,85	415,75
CP3	416,15	416,47	416,59	414,83	415,27	415,00	427,58	428,13	427,95	411,54	412,01	412,05
	<b>422,50</b>	<b>422,93</b>	<b>422,99</b>	<b>417,41</b>	<b>417,94</b>	<b>417,87</b>	<b>423,01</b>	<b>423,61</b>	<b>423,46</b>	<b>413,04</b>	<b>413,53</b>	<b>413,50</b>

### Anexo E – Resultados do Ensaio de Carbonatação

Profundidade de Carbonatação (mm)										
Tipo	CP1				CP2				Média	Desvio Padrão
N	5	4	4	3	5	3	3	5	4,00	0,93
R	1	1	1	0	5	5	4	1	2,25	2,05
R <sub>0,05OG</sub>	5	2	2	3	2	2	3	2	2,56	1,12
R <sub>0,1OG</sub>	4	3	1	2	5	4	3	2	2,94	1,37

## Anexo F – Resultados do Ensaio de Módulo de Elasticidade

CP - Natural	Módulo Elasticidade										
	Fr (Hz)	F(Hz)	Fh(Hz)	Q	Tensão (V)	E (Mpa)	Média E (Mpa)	E (GPa)	Idade (dias)	Massa (Kg)	Massa Específica (Kg/m³)
CP 1	10.230,00	10.230,00	10.260,00	330,00	0,50	1.044,13	972,07	0,97	105	0,3918	249,43
	9.019,00	9.010,00	9.049,00	231,26	0,50	811,56			105	0,3918	249,43
	10.310,00	10.300,00	10.320,00	572,61	0,50	1.060,53			105	0,3918	249,43
CP 2	10.074,00	10.074,00	10.076,00	632,00	0,50	1.046,90	1.131,95	1,13	105	0,4051	257,89
	10.720,00	10.720,00	10.730,00	824,54	0,50	1.185,47			105	0,4051	257,89
	10.620,00	10.620,00	10.630,00	816,92	0,50	1.163,46			105	0,4051	257,89
CP 3	9.000,00	9.000,00	9.028,00	321,43	0,50	802,78	1.049,04	1,05	105	0,3892	247,77
	10.800,00	10.800,00	10.820,00	635,29	0,50	1.156,01			105	0,3892	247,77
	10.950,00	10.950,00	10.970,00	684,38	0,50	1.188,34			105	0,3892	247,77

CP - RCD	Módulo Elasticidade										
	Fr (Hz)	F(Hz)	Fh(Hz)	Q	Tensão (V)	E (Mpa)	Média E (Mpa)	E (GPa)	Idade (dias)	Massa (Kg)	Massa Específica (Kg/m³)
CP 1	10.940,00	10.930,00	10.950,00	683,50	0,50	1.217,87	1.015,82	1,02	105	0,3996	254,39
	9.496,00	9.493,00	9.509,00	593,50	0,50	917,59			105	0,3996	254,39
	9.467,00	9.464,00	9.479,00	631,13	0,50	911,99			105	0,3996	254,39
CP 2	10.360,00	10.350,00	10.370,00	690,47	0,50	1.053,35	1.011,94	1,01	105	0,3854	245,35
	10.600,00	10.600,00	10.610,00	706,67	0,50	1.102,72			105	0,3854	245,35
	9.468,00	9.464,00	9.479,00	631,20	0,50	879,77			105	0,3854	245,35
CP 3	9.768,00	9.761,00	9.807,00	212,35	0,50	941,99	870,23	0,87	105	0,3877	246,82
	9.000,00	9.000,00	9.029,00	310,34	0,50	799,69			105	0,3877	246,82
	9.382,00	9.380,00	9.394,00	670,14	0,50	869,01			105	0,3877	246,82

CP - RCD + OG0,05%	Módulo Elasticidade										
	Fr (Hz)	F(Hz)	Fh(Hz)	Q	Tensão (V)	E (Mpa)	Média E (Mpa)	E (GPa)	Idade (dias)	Massa (Kg)	Massa Específica (Kg/m³)
CP 1	9.710,00	9.710,00	9.723,00	746,92	0,50	955,09	938,19	0,94	98	0,3978	253,25
	9.958,00	9.955,00	9.969,00	711,29	0,50	1.004,50			98	0,3978	253,25
	9.187,00	9.184,00	9.217,00	278,39	0,50	854,97			98	0,3978	253,25
CP 2	9.357,00	9.353,00	9.383,00	311,90	0,50	880,00	1.005,36	1,01	98	0,3947	251,27
	10.040,00	10.040,00	10.070,00	346,34	0,50	1.013,15			98	0,3947	251,27
	10.570,00	10.570,00	10.600,00	364,48	0,50	1.122,94			98	0,3947	251,27
CP 3	10.260,00	10.250,00	10.280,00	353,66	0,50	1.078,95	1.117,58	1,12	98	0,4025	256,24
	10.330,00	10.330,00	10.360,00	295,14	0,50	1.093,72			98	0,4025	256,24
	10.730,00	10.710,00	10.770,00	191,61	0,50	1.180,06			98	0,4025	256,24

CP - RCD + OG0,1%	Módulo Elasticidade										
	Fr (Hz)	F(Hz)	Fh(Hz)	Q	Tensão (V)	E (Mpa)	Média E (Mpa)	E (GPa)	Idade (dias)	Massa (Kg)	Massa Específica (Kg/m³)
CP 1	10.280,00	10.270,00	10.290,00	540,89	0,50	1.044,41	956,50	0,96	98	0,3881	247,07
	9.460,00	9.460,00	9.478,00	525,56	0,50	884,44			98	0,3881	247,07
	9.756,00	9.753,00	9.774,00	464,57	0,50	940,65			98	0,3881	247,07
CP 2	9.801,00	9.796,00	9.858,00	158,08	0,50	955,95	1.010,38	1,01	98	0,3908	248,79
	10.070,00	10.050,00	10.140,00	114,41	0,50	1.009,15			98	0,3908	248,79
	10.350,00	10.340,00	10.410,00	147,81	0,50	1.066,04			98	0,3908	248,79
CP 3	10.200,00	10.190,00	10.240,00	221,74	0,50	1.026,36	940,61	0,94	98	0,3874	246,63
	9.000,00	9.000,00	9.029,00	310,34	0,50	799,07			98	0,3874	246,63
	10.050,00	10.050,00	10.080,00	358,93	0,50	996,40			98	0,3874	246,63

### Anexo G – Cálculo da Compacidade da Argamassa

V <sub>c</sub> = volume do cimento/ volume unitário da argamassa		1,65	
Tipo	F <sub>c</sub> (MPa)	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Compacidade
N	39,40	1,35	1,77
R	39,77	1,38	2,10
R0,05OG	48,19	1,38	2,55
R0,1OG	46,48	1,38	2,46

$$V_c = \frac{\text{densidade do cimento} \times \text{quantidade de cimento por CP}}{\text{volume do CP}}$$

$$\text{Compacidade} = \frac{f_c \times (1 - \text{massa unitária})^2}{V_c^2}$$



**PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil**  
**Av Amazonas, 7675, Belo Horizonte-MG**  
**[www.civil.cefetmg.br/mestrado](http://www.civil.cefetmg.br/mestrado)**