

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL MESTRADO**

**CAMILA WERNER MENEGOTTO**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE REVESTIMENTO DE ARGAMASSA  
SUBMETIDO A ENVELHECIMENTO ACELERADO E À CARBONATAÇÃO**

**São Leopoldo/RS**

**2023**

CAMILA WERNER MENEGOTTO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE REVESTIMENTO DE ARGAMASSA  
SUBMETIDO A ENVELHECIMENTO ACELERADO E À CARBONATAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos).

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

São Leopoldo/RS

2023

M541a Menegotto, Camila Werner  
Avaliação do comportamento de revestimento de argamassa submetido a envelhecimento acelerado e à carbonatação. / Camila Werner Menegotto. – 2023.  
163 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.  
“Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak.”

1. Argamassa de revestimento. 2. Carbonatação. 3. Envelhecimento acelerado. 4. Módulo de elasticidade. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

CAMILA WERNER MENEGOTTO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE REVESTIMENTO DE ARGAMASSA  
SUBMETIDO A ENVELHECIMENTO ACELERADO E À CARBONATAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos).

Aprovado em 28 de abril de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Nádia Cazarim da Silva Forti, Dr.<sup>a</sup> (Pontifícia Universidade Católica de Campinas)

---

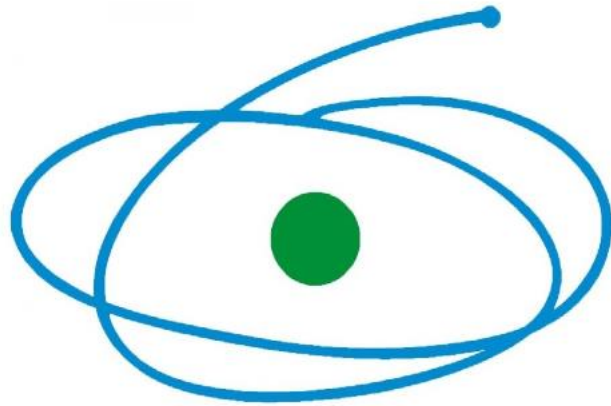
Marlova Piva Kulakowski, Dr.<sup>a</sup> (Universidade do Vale do Rio dos Sinos)

---

Mauricio Mancio, Dr. (Universidade do Vale do Rio dos Sinos)

## **AGRADECIMENTOS À CAPES**

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



**C A P E S**

À minha família.

## AGRADECIMENTOS

O período de realização desta pesquisa foi o mais desafiador que já pude vivenciar na minha existência. Desafios pessoais e desafios no meio acadêmico. No entanto, no meio de muitas incertezas e dificuldades, não me faltam pessoas para agradecer por cada palavra de amparo, pelos abraços de consolo e pelos momentos de alegria e descontração.

Agradeço primeiramente à minha mãe, Andréia Werner, por ser meu exemplo de dedicação e perseverança e por sempre acreditar em mim mais do que eu mesma acreditava. Obrigada pelos dias de ajuda em laboratório, pelos longos conselhos e pelo colo sempre que precisei. Você me ensinou a ser uma mulher forte e nunca desistir dos meus objetivos. Sem você nada disso faria sentido.

Agradeço ao meu noivo, Gabriel José Pasa, por todo incentivo e ajuda, pela compreensão do meu cansaço e me fez rir em meio ao caos. Você é meu porto seguro.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak, por todo auxílio e orientação desde meu ingresso na iniciação científica. Obrigada por me ensinar a ser uma pesquisadora cada dia melhor e por confiar a mim um trabalho com tantos desafios.

Sem amigos a caminhada é sempre mais pesada, e posso dizer que, ao longo desse período, novas amizades não faltaram e a união das que já existiam ficou ainda mais forte. À colega de profissão e agora amiga muito especial Ketlin Cornely da Silva, agradeço por todo o companheirismo desde o início da pesquisa até hoje, pois, mesmo a quilômetros de distância, sempre se faz presente ajudando com todo amor e carinho. Nós sabemos toda dificuldade que enfrentamos juntas e como superamos e evoluímos. Sei que sem você o caminho teria sido ainda mais difícil. À minha amiga Monique Palavro Lunardi, que me auxiliou no início da pesquisa e depois, mesmo distante, me ajudando e consolando nos momentos de dúvida, muito obrigada. As boas amizades não se esvaem no caos, mas se fortalecem.

Agradeço a toda equipe de laboratoristas, que têm meu completo respeito e carinho. Vocês me ajudaram em momentos inimagináveis como laboratoristas, mas também como bons amigos. Do laboratório de materiais de construção civil: André. Webber, Igor Wiskow, Leonardo Himmer, Helen Camargo e Michele Garcês, meu muito obrigada; vocês foram essenciais para que a jornada fosse mais leve. O carinho

será eterno. Do laboratório de metrologia: Vitor Costa, Éder Fernandes e Lucas Beck, muito obrigada pela paciência em relação aos incansáveis ensaios que fiz e pela ajuda ao longo desse período. Aos demais que contribuíram e me auxiliaram neste processo, fica meu agradecimento.

Agradeço ao colega de pesquisa Benício de Moraes Lacerda pela troca de experiências e pelo companheirismo no desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os colegas e amigos que tive a honra de conhecer e com quem pude compartilhar momentos ao longo destes dois anos, vocês fazem parte da minha história e serei eternamente grata por cada conversa que tivemos.

Agradeço também a todos os professores que compartilharam seus conhecimentos e contribuíram para a minha formação, tanto através da passagem de conceitos como na troca de experiências. Sortudo aquele que encontra no caminho pessoas com quem pode aprender e evoluir.

Por fim, agradeço a mim mesma, por toda dedicação e perseverança nesse período. Não há como pôr em palavras tudo o que superei e o quanto evolui neste processo, nem todas as dificuldades que enfrentei. Sou muito orgulhosa da pessoa que me tornei e por não ter desistido.



“O passado pode doer, mas, da maneira que eu vejo,  
você pode fugir dele ou aprender com ele”  
(O Rei Leão)

## RESUMO

Os ciclos contínuos de molhagem e secagem a que revestimentos de argamassa são submetidos ao longo de sua vida, associados ao efeito da carbonatação e aos impactos provenientes do uso, ocasionam esforços de tração e cisalhamento ao revestimento que poderão causar microfissuras na estrutura do revestimento e, portanto, influenciar na forma de ruptura do material. Em consequência, é recomendado conferir um baixo módulo de elasticidade às argamassas, sendo este responsável pela capacidade destas de se deformarem sem fissurar ao receber tensões. No entanto, tal propriedade é afetada pelo processo de envelhecimento e pela carbonatação, que podem tornar a argamassa mais rígida ou mais elástica. O objetivo desta pesquisa é avaliar o efeito da carbonatação e do envelhecimento acelerado no comportamento da argamassa quando submetida a esforços de tração, ao ser aplicada sobre substratos distintos, bem como estimar o módulo de elasticidade por correlação de imagem digital (CID). Foram utilizados dois substratos cerâmicos com diferentes valores de absorção capilar e rugosidade. Foram moldadas argamassas no traço 1:1:4 (cimento:cal:areia), CP II-F 40 e cal CH-I, relação a/agl 0,80. As amostras foram curadas durante 56 dias em ambiente controlado. Foram determinados o índice de vazios, a absorção de água por capilaridade e a resistência à tração antes e após os processos de envelhecimento e carbonatação. A análise de tensões e deformações foi realizada aplicando a metodologia CID e posteriormente calculando o módulo de elasticidade com o auxílio de *softwares* específicos. Concluiu-se que o envelhecimento acelerado eleva a absorção de água capilar e reduz a resistência de aderência e que a carbonatação é influenciada pelo tipo de substrato ao qual a argamassa está aplicada. Os módulos de elasticidade calculados a partir de CID mostraram-se coerentes com os valores encontrados na literatura e indicaram que há diferenças de módulo ao longo da espessura do revestimento.

**Palavras-chave:** argamassa de revestimento; envelhecimento acelerado; carbonatação; módulo de elasticidade.

## ABSTRACT

The continuous wetting and drying cycles to which mortar coatings are subjected throughout their life, associated with the effect of carbonation and the impacts arising from use, cause traction and shear stresses to the coating that, throughout its useful life, may cause microcracks in the structure of the coating and, therefore, influence the way the material ruptures. Consequently, it is recommended to give mortars a low modulus of elasticity, which is responsible for their ability to deform without cracking when subjected to stress. However, this property is affected by the aging process and carbonation, which can make the mortar more rigid or more elastic. The objective of this research is to evaluate the effect of carbonation and accelerated aging on the behavior of the mortar when subjected to tensile stress, when applied on different substrates, as well as to estimate the modulus of elasticity by digital image correlation (CID). Two ceramic substrates with different capillary absorption and roughness values were used. Mortars were molded in the proportion 1:1:4 (cement:lime:sand), CP II-F 40 and lime CH-I, a/gl ratio 0.80. Samples were cured for 56 days in a controlled environment. The voids index, water absorption by capillarity and tensile strength were determined before and after the aging and carbonation processes. The stress and deformation analysis was carried out applying the CID methodology and later calculating the modulus of elasticity with the aid of specific software. It was concluded that accelerated aging increases capillary water absorption and reduces bond strength and that carbonation is influenced by the type of substrate to which the mortar is applied. The modulus of elasticity calculated from the CID were coherent with the values found in the literature and indicated that there are modulus differences along the thickness of the coating.

**Keywords:** coating mortar; accelerated aging; carbonation; modulus of elasticity.

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	91
Equação 2.....	143

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição do adesivo sobre a rugosidade superficial .....	27
Figura 2 – Microscopia eletrônica de varredura dos cristais presentes na zona de interface argamassa/substrato.....	32
Figura 3 – Microscopia eletrônica de varredura de cristais de etringita na interface argamassa/substrato .....	32
Figura 4 – Imagens obtidas em lupa estereoscópica da extensão de contato argamassa/substrato .....	33
Figura 5 – Ensaio de resistência de aderência .....	35
Figura 6 – Método de ensaio de resistência à tração direta .....	36
Figura 7 – Método de ensaio de resistência de aderência .....	37
Figura 8 – Solicitações sob revestimentos de argamassa.....	38
Figura 9 – Processo de carbonatação do $\text{Ca(OH)}_2$ .....	40
Figura 10 – Efeito da carbonatação na porosidade de diferentes relações a/c .....	41
Figura 11 – Módulo de elasticidade e dureza de amostras antes e após a carbonatação .....	42
Figura 12 – Exposição ao calor de revestimentos de argamassa.....	45
Figura 13 – Resultados esperados em correlação de imagem digital.....	51
Figura 14 – Fluxograma do programa experimental: fases 2 e 3.....	53
Figura 15 – Granulometria do cimento CII-F 40 .....	56
Figura 16 – Granulometria da cal CH I.....	57
Figura 17 – Granulometria da areia.....	59
Figura 18 – Blocos cerâmicos utilizados na pesquisa .....	60
Figura 19 – Esquema de corte dos blocos cerâmicos .....	61
Figura 20 – Ensaio de absorção de água por capilaridade .....	63
Figura 21 – Gráfico obtido no ensaio de absorção por capilaridade .....	63
Figura 22 – Captura de imagens para o ensaio de rugosidade.....	64
Figura 23 – Ensaio de índice de consistência .....	66
Figura 24 – Ensaio de densidade de massa .....	67
Figura 25 – Ensaio de teor de ar incorporado .....	67
Figura 26 – Ensaio de retenção de água .....	68
Figura 27 – Moldagem corpos de prova de argamassa.....	69
Figura 28 – Ensaio de resistência à tração na flexão .....	69

Figura 29 – Ensaio de resistência à compressão .....	70
Figura 30 – Ensaio de absorção de água por capilaridade .....	71
Figura 31 – Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.....	72
Figura 32 – Esquema de moldagem dos corpos de prova .....	73
Figura 33 – Processo de moldagem.....	74
Figura 34 – Processo de cura dos revestimentos em câmara úmida .....	74
Figura 35 – Processo de sazonalização das amostras.....	75
Figura 36 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo.....	76
Figura 37 – Imagem referência para análise de DRX.....	77
Figura 38 – Análise por DRX da argamassa de revestimento.....	78
Figura 39 – Tempos de aquecimento e resfriamento definidos.....	80
Figura 40 – Restrição de movimentação do substrato nas amostras de revestimento para ensaio de envelhecimento acelerado .....	81
Figura 41 – Dispositivo para ensaio de resistência à tração direta em máquina universal de ensaios.....	83
Figura 42 – Processo de colagem das pastilhas metálicas.....	84
Figura 43 – Ensaio de tração adaptado.....	84
Figura 44 – Dimensões da amostra para ensaio de resistência de aderência e aplicação do método de CID.....	85
Figura 45 – Aplicação de camada de gesso sobre a superfície da argamassa.....	86
Figura 46 – Conjunto de agulhas utilizadas para pintura da malha de pontos .....	87
Figura 47 – Definição do método de pintura para aplicação do CID.....	88
Figura 48 – Cenário para ensaio de resistência de aderência com aplicação do método CID após reajustes .....	89
Figura 49 – Amostra finalizada para ensaio de resistência de aderência com aplicação do método CID.....	89
Figura 50 – Posição dos extensômetros .....	90
Figura 51 – Coeficientes de capilaridade das olarias .....	94
Figura 52 – Coeficiente de rugosidade das olarias.....	95
Figura 53 – Área de vale das olarias .....	96
Figura 54 – Assinatura de rugosidade e área de vales de uma amostra do substrato 1 .....	98
Figura 55 – Assinatura de rugosidade e área de vales de uma amostra do substrato 2 .....	98

Figura 56 – Índice de vazios das argamassas nas quatro variáveis .....	101
Figura 57 – Coeficiente de capilaridade das argamassas nas quatro variáveis .....	103
Figura 58 – Resistência à compressão das argamassas nas quatro variáveis .....	105
Figura 59 – Índice de vazios para amostras aplicadas no substrato 1 .....	107
Figura 60 - Índice de vazios para amostras aplicadas no substrato 2 .....	108
Figura 61 – Coeficiente de capilaridade para amostras aplicadas no substrato 1 ..	109
Figura 62 – Coeficiente de capilaridade para amostras aplicadas no substrato 2 ..	110
Figura 63 – Comparação do coeficiente de capilaridade entre amostras aplicadas em diferentes substratos .....	111
Figura 64 – Resistência de aderência para amostras aplicadas no substrato 1.....	113
Figura 65 – Resistência de aderência para amostras aplicadas no substrato 2.....	115
Figura 66 – Comparação da resistência de aderência entre amostras aplicadas em diferentes substratos .....	116
Figura 67 – Gráfico de tensão <i>versus</i> deformação obtido para uma amostra .....	117
Figura 68 – Módulo de elasticidade médio para as três regiões de análise das amostras REF .....	119
Figura 69 – Módulo de elasticidade médio para as três regiões de análise das amostras CARB E .....	119
Figura 70 – Comparação do módulo de elasticidade médio entre amostras REF e amostras CARB E .....	120
Figura 71 – Avaliação do módulo de elasticidade de três regiões em um mesmo conjunto de amostras .....	121

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Divergências entre normas para ensaio de envelhecimento acelerado .	46
Quadro 2 – Fatores de controle para a análise de comportamento dos revestimentos .....	54
Quadro 3 – Variáveis de respostas.....	55



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química do cimento .....	56
Tabela 2 – Caracterização química da cal .....	58
Tabela 3 – Caracterização química e física da cal.....	58
Tabela 4 – Resultado da caracterização do agregado miúdo .....	59
Tabela 5 – Caracterização dos substratos .....	92
Tabela 6 – Avaliação estatística das olarias quanto ao coeficiente de capilaridade .	94
Tabela 7 – Avaliação estatística do coeficiente de rugosidade .....	97
Tabela 8 – Avaliação estatística da área dos vales .....	97
Tabela 9 – Caracterização da argamassa no estado fresco .....	99
Tabela 10 – Caracterização da argamassa no estado endurecido .....	100
Tabela 11 – Resultado de absorção de água total para os revestimentos .....	106
Tabela 12 – Módulo de elasticidade determinado a partir da CID para amostras REF na direção vertical .....	117
Tabela 13 – Módulo de elasticidade determinado a partir da correlação de imagem digital para amostras CARB E na direção vertical .....	118
Tabela 14 – Módulo de elasticidade obtido a partir da correlação de imagem digital para amostras REF na direção horizontal .....	122
Tabela 15 – Módulo de elasticidade obtido a partir da correlação de imagem digital para amostras CARB E na direção horizontal.....	122

## LISTA DE SIGLAS

a/agl	Água/Aglomerante
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CH	Hidróxido de Cálcio
CID	Correlação de imagem digital
CV	Coefficiente de variação
FRX	Florescência de raio X
DRX	Difração de raio X
GMAT	Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem
LMC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT	Transdutor de deslocamento variável linear
NBR	Norma Brasileira de Regulação
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials Systems and Structure
Unisinos	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.1.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>23</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>23</b>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	23
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>24</b>
2.1	ADERÊNCIA ENTRE ARGAMASSA E SUBSTRATO.....	24
2.1.1	<b>Propriedades que influenciam a aderência entre a argamassa e o substrato.....</b>	<b>28</b>
2.1.2	<b>Métodos de análise de resistência de aderência.....</b>	<b>34</b>
2.2	DURABILIDADE DE REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA.....	37
2.2.1	<b>Carbonatação.....</b>	<b>39</b>
2.2.2	<b>Degradação da argamassa de revestimento.....</b>	<b>44</b>
2.2.3	<b>Tensões em revestimentos de argamassa.....</b>	<b>47</b>
2.2.4	<b>Análise de fissuras pela correlação de imagem digital.....</b>	<b>49</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
3.1	FATORES E VARIÁVEIS.....	54
3.1.1	<b>Fatores de controle com níveis variáveis.....</b>	<b>54</b>
3.1.2	<b>Fatores fixos.....</b>	<b>54</b>
3.1.3	<b>Variáveis de respostas.....</b>	<b>55</b>
3.2	MATERIAIS.....	55
3.2.1	<b>Cimento.....</b>	<b>55</b>
3.2.2	<b>Cal.....</b>	<b>57</b>
3.2.3	<b>Agregado miúdo.....</b>	<b>58</b>
3.2.4	<b>Água.....</b>	<b>60</b>
3.2.5	<b>Substratos cerâmicos.....</b>	<b>60</b>
3.2.5.1	Absorção de água por capilaridade.....	62
3.2.5.2	Rugosidade.....	63
3.3	MÉTODOS.....	65
3.3.1	<b>Preparo das argamassas.....</b>	<b>65</b>
3.3.2	<b>Caracterização da argamassa no estado fresco.....</b>	<b>66</b>

3.3.2.1	Índice de consistência.....	66
3.3.2.2	Densidade de massa.....	66
3.3.2.3	Teor de ar incorporado.....	67
3.3.2.4	Retenção de água.....	68
<b>3.3.3</b>	<b>Caracterização da argamassa no estado endurecido.....</b>	<b>68</b>
3.3.3.1	Resistência à tração na flexão.....	69
3.3.3.2	Resistência à compressão.....	70
3.3.3.3	Densidade de massa aparente.....	70
3.3.3.4	Absorção de água total, índice de vazios e massa específica.....	70
3.3.3.5	Absorção de água por capilaridade.....	71
3.3.3.6	Módulo de elasticidade dinâmico.....	71
<b>3.3.4</b>	<b>Aplicação das argamassas de revestimento nos substratos cerâmicos.....</b>	<b>72</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Processo de carbonatação.....</b>	<b>74</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Processo de envelhecimento acelerado.....</b>	<b>79</b>
<b>3.3.7</b>	<b>Caracterização dos revestimentos.....</b>	<b>81</b>
3.3.7.1	Índice de vazios.....	82
3.3.7.2	Absorção de água por capilaridade.....	82
3.3.7.3	Resistência de aderência.....	82
<b>3.3.8</b>	<b>Módulo de elasticidade por correlação de imagem digital.....</b>	<b>85</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>92</b>
4.1	SUBSTRATO.....	92
4.1.1	Absorção de água por capilaridade.....	93
4.1.2	Rugosidade.....	95
4.2	ARGAMASSA DE REVESTIMENTO.....	99
4.2.1	Caracterização da argamassa em estado fresco.....	99
4.2.2	Caracterização da argamassa em estado endurecido.....	100
4.2.2.1	Absorção de água.....	101
4.2.2.2	Propriedades mecânicas.....	104
4.3	SISTEMAS DE REVESTIMENTO.....	106
4.3.1	Absorção de água.....	106
4.3.2	Resistência de aderência.....	112
4.3.3	Módulo de elasticidade por correlação de imagem digital.....	116

<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>124</b>
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	126
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>127</b>
	<b>APÊNDICE A – ENSAIOS-PILOTOS DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL QUANDO APLICADO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO.....</b>	<b>139</b>
	<b>APÊNDICE B – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO EM AMOSTRAS DE 50 X 70MM – COEFICIENTE DE CAPILARIDADE.....</b>	<b>149</b>
	<b>APÊNDICE C – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO EM AMOSTRAS DE 50 X 70MM – RUGOSIDADE.....</b>	<b>152</b>
	<b>APÊNDICE D – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO EM AMOSTRAS DE 50 X 70MM - ÁREA DE VALES.....</b>	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE E – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA (40 X 40 X 160MM).....</b>	<b>157</b>
	<b>APÊNDICE F – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTO.....</b>	<b>159</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As argamassas são materiais compostos, na maioria dos casos, de cimento, cal e agregado miúdo e podem conter adições e aditivos. São aplicadas de diferentes formas em uma edificação, principalmente como revestimento e assentamento (CARASEK, 2010). Independentemente de suas aplicações, as argamassas devem apresentar algumas propriedades características, a fim de reduzir as manifestações patológicas e elevar a durabilidade da edificação (KAZMIERCZAK *et al.*, 2016).

Especificamente em argamassas de revestimento, deve-se garantir que ocorra uma aderência adequada entre a argamassa e o substrato, no intuito de evitar problemas de deslocamento e queda do revestimento. Também é preciso que haja resistência ao cisalhamento (BAUER, 2009; CAMPOS, 2014) e um baixo módulo de elasticidade, visto que a argamassa apresenta elevada exposição a agentes externos que ocasionam variações dimensionais, as quais geram tensões internas, uma vez que não há espaços para o material se movimentar livremente, o que, por consequência, ocasiona microfissuras, reduzindo a durabilidade (ESQUIVEL, 2009; MARQUES *et al.*, 2020; SINGH, NAGAR, AGRAWAL, 2016).

A resistência de aderência é uma propriedade mecânica de elevada complexidade nas argamassas de revestimento, a qual é influenciada por parâmetros relacionados ao substrato (como absorção de água especialmente por capilaridade, rugosidade, tratamentos superficiais, tipos de substratos etc.), relacionados à argamassa (como reologia, adesão inicial, retenção de água, composição de finos etc.), bem como por técnicas de aplicação, cura e condições climáticas no momento da aplicação (CARASEK, 2010; VAZ, CARASEK, 2019). A incompatibilidade entre esses fatores ocasiona problemas na extensão do contato entre a argamassa e o substrato e excessiva retração em idades iniciais da argamassa, influenciando na resistência de aderência final do revestimento e na durabilidade deste (CARASEK, 1996; HOLT, 2001; POLITO, CARVALHO JUNIOR, BRANDÃO, 2010).

A aderência é ocasionada pela interação entre os dois materiais (argamassa e substrato). Este efeito pode ocorrer química ou mecanicamente. A aderência química é baseada na interação molecular das partículas que compõem os dois materiais, na qual ocorrem ligações primárias e secundárias, com intensidades distintas (KENDALL, 2001; NILSSON, PETTERSSON, NORSKOV, 2008). Já a aderência mecânica é oriunda da argamassa em estado fresco, que, ao se acomodar na rugosidade do

substrato, preenchendo os vales e obtendo resistência após o endurecimento da matriz cimentícia, originará um ponto de ancoragem entre a argamassa e o substrato (KIM *et al.*, 2010; STOLZ, 2015).

As argamassas de revestimento são consideradas como materiais de sacrifício, visto que são o primeiro material a entrar em contato com o meio externo em uma edificação, estando sujeitas a interferências dos ventos, das chuvas, da umidade, dos agentes químicos e biológicos e das variações climáticas (SILVA; BRITO, 2021). Os agentes a que as argamassas são submetidas ocasionam fenômenos que a degradam e fenômenos que podem beneficiar as suas propriedades. Há dois processos de degradação estudados na literatura, que são os ciclos de molhagem e secagem e a carbonatação (LUNARDI, 2021; SENTENA, 2015).

Os revestimentos de argamassa são submetidos a ciclos contínuos de molhagem e secagem, oriundos das chuvas, da umidade e da exposição solar (ESQUIVEL, 2009; SENTENA, 2015). Esses ciclos causam variações térmicas nos revestimentos, que ocasionam dilatação e retração do material proveniente das variações de temperatura, portanto o material passará por uma movimentação, a qual pode gerar fissuras e eventualmente reduzir a resistência de aderência (SENTENA; KAZMIERCZAK; KREIN, 2018).

Ainda, os revestimentos são expostos aos compostos presentes na atmosfera, como é o caso do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Quando se dá a interação do  $\text{CO}_2$  com a matriz cimentícia, ocorrem ligações químicas com o hidróxido de cálcio que irão resultar em uma precipitação no interior dos poros de partículas de carbonato de cálcio (PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1990). A carbonatação pode resultar na redução da porosidade da matriz cimentícia e elevar o módulo de elasticidade (CHI, HUANG, YANG, 2002; HAN *et al.*, 2015). Embora ocorra um aumento no módulo de elasticidade, alguns autores indicam que a carbonatação é benéfica a revestimentos de argamassa, especialmente quando esta é composta por cimento e cal, visto que a cal eleva a reserva de hidróxido de cálcio na mistura e ocorre maior quantidade de ligações entre o  $\text{CO}_2$  e o hidróxido de cálcio (CINCOTTO *et al.*, 2010; LUNARDI, 2021).

A literatura apresenta ensaios que simulam os efeitos gerados durante o envelhecimento acelerado e o efeito da carbonatação ao longo dos anos, no entanto, avaliando apenas uma das exposições da argamassa, ou seja, expõe-se uma argamassa íntegra a um processo de exposição isolado. É consenso que as

argamassas de revestimentos aplicadas sobre elementos de edificações reais são expostas aos agentes de degradação de forma simultânea, e não isoladamente. O efeito da carbonatação quando ocorre em argamassas já expostas ao envelhecimento acelerado ou vice-versa pode gerar resultados distintos dos encontrados na literatura, especialmente em relação à intensidade das degradações (LUNARDI, 2021). Nesse contexto, foi proposta a presente pesquisa, partindo da hipótese de que as propriedades mecânicas e a distribuição de tensões em revestimentos expostos a processos de envelhecimento acelerado e carbonatação são diferentes do observado em revestimentos sem o efeito destes.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o efeito da degradação de revestimentos de argamassa por envelhecimento acelerado e por carbonatação.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Avaliar a influência do processo de envelhecimento acelerado com uso de restrição nas propriedades de revestimentos de argamassa quando aplicados em diferentes substratos;
- b) Avaliar a influência do processo de carbonatação e envelhecimento acelerado na resistência de aderência dos revestimentos de argamassa quando aplicados em diferentes substratos;
- c) Estimar o valor de módulo de elasticidade de argamassas expostas a envelhecimento acelerado e carbonatação utilizando o método de correlação de imagem digital (CID).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A resistência de aderência é um parâmetro que sofre influência de diversos fatores, como os relacionados ao substrato, à argamassa, entre outros. Os estudos



acerca desta propriedade iniciaram em 1930 (COSTA, 2014). Embora já haja avanços na compreensão do efeito da aderência em argamassas de revestimento, ainda há diversas lacunas a serem estudadas.

Os esforços ocasionados nas argamassas de revestimento ao longo da sua vida útil são especialmente esforços de tração e cisalhamento, relacionados aos efeitos, por exemplo, de molhagem e secagem, e por carbonatação, os quais causam retrações, além das tensões geradas pelo peso próprio e por impactos provenientes do uso (CAMPOS, 2014). Especialmente os ciclos de molhagem e secagem e a carbonatação são processos que ocorrem de forma contínua, e, à medida que isso acontece, causam fadiga no revestimento (JIANG *et al.*, 2017). A fadiga do material resultará em fissuras, as quais, ao se propagarem, poderão ocasionar deslocamentos dos revestimentos, fato observado em edifícios que apresentem manifestações patológicas (BAUER, CASTRO, ANTUNES, 2012; CARASEK, 2010).

No estudo realizado por Lunardi (2021), observou-se que o efeito da carbonatação nas argamassas de revestimento pode resultar em melhora na resistência de aderência, no entanto, após o envelhecimento acelerado, observou-se que tanto as amostras carbonatadas quanto as não carbonatadas apresentaram diminuição semelhante na resistência. Desse modo, concluiu-se que o envelhecimento acelerado resulta em um prejuízo à matriz mesmo que a carbonatação traga melhoras (LUNARDI, 2021). Ainda, a autora observou que as amostras não carbonatadas submetidas a ensaios de envelhecimento acelerado resultaram em uma modificação da forma de ruptura do revestimento, ou seja, em vez de romper na interface, as amostras romperam na argamassa (LUNARDI, 2021).

A CID é uma técnica implementada em 1980 a partir da fotogrametria e aprimorada ao longo dos anos (LIU *et al.*, 2015; PETERS, RANSON, 1982; QUANJIN *et al.*, 2020; SUTTON *et al.*, 1983). Na engenharia civil, é utilizada para verificar fissuras e correlacionar tensões e deformações de materiais de construção civil com maior precisão, a fim de avaliar o acúmulo de tensões em diferentes regiões do corpo de prova e sua possível relação com a forma de ruptura do material (ABSHIRINI, SOLTANI, MARASHIZADEH, 2016; VORA *et al.*, 2018).

Visando dar continuidade ao trabalho desenvolvido por Lunardi (2021) e outros trabalhos do Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem (GMAT) do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), a presente pesquisa propõe-se a identificar os efeitos da carbonatação e

do envelhecimento acelerado em revestimentos de argamassa, bem como a contribuir para o estado da arte sobre os efeitos da exposição de argamassas de revestimento nas propriedades mecânicas, no intuito de estimar o módulo de elasticidade em argamassas aplicadas sobre substratos cerâmicos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ADERÊNCIA ENTRE ARGAMASSA E SUBSTRATOS

Os revestimentos de argamassa são utilizados mundialmente tanto como camadas de proteção e nivelamento da estrutura quanto para assentamento de azulejos (CARASEK, VAZ, CASCUDO, 2018; MELO *et al.*, 2020). Pesquisadores afirmam que o uso de azulejos em fachadas começou a ser implementado no Brasil no século XVII, ou seja, quando da vinda dos portugueses, franceses e alemães ao país (DE FREITAS *et al.*, 2014).

No entanto, atualmente, as argamassas de revestimento são empregadas no Brasil especialmente como camadas de acabamento das edificações, podendo receber posteriormente demãos de pintura. Sua principal função é proteger a estrutura e são normalmente utilizadas sobre alvenarias de cerâmica vermelha, as quais compõem as vedações verticais (COSTA *et al.*, 2020).

Seja qual for a funcionalidade para a qual a argamassa de revestimento será empregada, a fim de que atinja os objetivos propostos, é fundamental que possua determinadas características. Em relação às argamassas de revestimento, a principal propriedade a ser considerada é a resistência de aderência (VAZ; CARASEK, 2019).

Segundo a literatura, a ligação entre a argamassa e o substrato ocorre em três períodos, sendo eles: i) o estado fresco (adesão), ii) o estado plástico e iii) o estado endurecido (aderência). Phan (2013) conceitua como i) adesão inicial o momento de lançamento da argamassa, ii) como adesão o momento de sarrafeamento e iii) como aderência o período após 28 dias de cura.

A adesão inicial está relacionada com a reologia das argamassas, ou seja, com o comportamento em estado fresco e a tensão superficial dos materiais (POLITO, 2013). O termo “adesão” abrange diversos significados, dependendo da área de pesquisa, no entanto, de modo geral, para a engenharia, significa tanto o estabelecimento das ligações químicas interfaciais quanto a carga mecânica imposta para fixar dois sólidos. Há uma variedade de teorias de adesão as quais ora se complementam, ora se contradizem, sendo as principais: intertravamento mecânico, teoria eletrônica, teoria das camadas limites e interfases, teoria da adsorção, teoria da difusão e teoria da ligação química (SHULTZ; NARDIN, 2003).

Na interação entre argamassa de revestimento e substrato cerâmico, as teorias de intertravamento mecânico e ligação química prevalecem. Embora a aderência seja o foco de avaliação para garantir a eficiência dos revestimentos de argamassa, essa propriedade é uma consequência das interações desde a adesão inicial até o momento de endurecimento e ganho de resistência da argamassa.

A teoria de intertravamento mecânico foi proposta por McBain e Hopkins (1925 *apud* COSTA, 2014), os quais consideraram que o intertravamento é proveniente da capacidade do adesivo de se espalhar nas rugosidades (picos e vales) e nos poros da superfície do sólido. Gent e Lin (1990) e Pizzi (2003) propuseram que um elevado nível de adesão pode ser atingido caso a morfologia da superfície e as interações físico-químicas entre o adesivo e o sólido sejam melhoradas.

Na maioria dos casos, a adesão elevada por intertravamento mecânico pode ser atribuída ao aumento da área superficial devido à sua rugosidade, uma vez que seja garantida a trabalhabilidade do adesivo, a fim de permitir a sua penetração nos vales (GENT, LIN, 1990; KIM *et al.*, 2010; SHULTZ; NARDIN, 2003). Stolz (2015) verificou que somente a rugosidade não é o fator decisivo para que a aderência seja eficiente, é preciso considerar também a área de contato efetiva entre os materiais, visto que a rugosidade de substratos cerâmicos, em alguns casos, não é compatível com a reologia das argamassas, ocasionando falhas na extensão de contato, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Distribuição do adesivo sobre a rugosidade superficial



Fonte: Adaptado de Silfwerbrand, Beushausen e Courard (2011).

A teoria da ligação química passou a ser considerada à medida que Silfwerbrand, Beushausen e Courard (2011) observavam que havia uma resistência de aderência em superfícies lisas. As ligações químicas dependem da reatividade dos materiais (adesivo e sólido) e ocorrem com diferentes forças de interação, sendo denominadas ligações primárias ou secundárias, sendo as primárias (de hidrogênio,

covalentes ou iônicas) mais fortes que as secundárias (de Van der Waals) (NILSSON; PETTERSSON; NORSKOV, 2008).

No entanto, Pizzi (2003) explica que essa interação química só ocorre quando há o contato efetivo entre os materiais. Dessa forma, a trabalhabilidade do adesivo e a capacidade de molhabilidade no substrato possui influência direta sobre a área de contato e, por consequência, sobre a resistência de aderências.

Após o contato efetivo entre os materiais e a sua reatividade para que ocorram as ligações químicas, há a interação intermolecular dos materiais, fenômeno regido por três principais leis: i) todos os átomos aderem com força considerável; ii) a contaminação da superfície reduz a adesão, ou seja, partículas soltas sobre o substrato interferem na extensão de contato; e iii) o mecanismo tem grande influência na adesão macroscópica, mesmo que a adesão molecular se mantenha constante. Portanto, a reologia da argamassa, a rugosidade superficial e a porosidade do substrato influenciam na proximidade da argamassa com o substrato. Caso a extensão de contato seja prejudicada, a interação química também o será (KENDALL, 2001).

### **2.1.1 Propriedades que influenciam a aderência entre a argamassa e o substrato**

A resistência de aderência é uma propriedade dos revestimentos de argamassa que pode ser definida como a capacidade da interface de absorver as tensões geradas por esforços de tração ou cisalhamento, sem que ocorra ruptura. Portanto, é uma propriedade que depende da interação dos dois materiais, a argamassa e o substrato (CARASEK *et al.*, 2014; POLITO, 2013).

Conseqüentemente, a resistência de aderência é influenciada pelas características da base (como substratos cerâmicos, de concreto etc.); pelas características da argamassa (como distribuição de finos, consistência, trabalhabilidade, propriedades mecânicas etc.); pelas técnicas de aplicação; pela energia de impacto; pela idade e pelas condições climáticas (VAZ; CARASEK, 2019). Ainda, a resistência de aderência é influenciada pela extensão de contato entre os materiais (COSTA; CARDOSO; JOHN, 2017).

Ao se avaliar os efeitos relacionados aos substratos que influenciam na aderência de revestimentos, destaca-se a rugosidade superficial e a porosidade interna (BARRIOS-MURIEL *et al.*, 2019; GROOT, LARBI, 1999; PAES *et al.*, 2014).

Os substratos (de concreto e de cerâmica vermelha) apresentam estruturas internas e superficiais distintas. Em substratos de concreto, há maior controle tecnológico, permitindo uma estrutura com maior homogeneidade e menor conectividade dos poros (BELLEI *et al.*, 2021). Já o substrato de cerâmica vermelha apresenta uma estrutura heterogênea devido aos processos de fabricação dos blocos (CULTRONE *et al.*, 2004; PINHEIRO, HOLANDA, 2010).

Os blocos cerâmicos são compostos por argilas coletadas em jazidas, e, em muitos casos, estas são compostas por diferentes argilominerais, os quais irão impactar posteriormente no produto final (DRIVE, 2006). Essas argilas são homogeneizadas e estocadas. Em seguida, com a adição de água, moldam-se as peças cerâmicas e ocorre a sinterização. A temperatura de queima gera uma série de mudanças mineralógicas, texturais e físicas nas peças, influenciando na conectividade dos poros internos e superficiais, visto que os efeitos endotérmicos e exotérmicos na massa cerâmica ocasionam retração e/ou expansão (CULTRONE *et al.*, 2004).

Azevedo *et al.* (2018) observaram que, com o aumento da temperatura de queima, há redução na porosidade interna do bloco cerâmico, que impacta na taxa de absorção de água. Os pesquisadores ainda concluíram que esta redução é benéfica ao processo de adesão da argamassa ao substrato devido à redução excessiva da perda de água da argamassa para o substrato. No entanto, ao se reduzir drasticamente a porosidade, os resultados de aderência também são prejudicados (AZEVEDO *et al.*, 2018).

Estes mesmos autores concluíram que o tipo de argila utilizada para produzir os blocos cerâmicos interfere expressivamente nos resultados de aderência. Observaram que argilas predominantemente cauliniticas apresentaram melhores resultados de resistência de aderência aos 28 dias em uma temperatura de queima de 950 °C quando comparadas a temperaturas de 750 e 850 °C (AZEVEDO *et al.*, 2018). Esse efeito se justifica pelo fato de a elevada temperatura propiciar maior redução dos diâmetros dos poros internos do substrato devido à desidroxilação da caulinita (formando metacaulinita amorfa) e à subsequente transformação desta em mulita, sob altas temperaturas. Esse processo auxilia na adesão da argamassa ao substrato (ARNOLD *et al.*, 2021; PINHEIRO, HOLANDA, 2010), visto que esta não perderá água excessivamente para o substrato, apenas aproximará os dois materiais em função da força capilar, resultando em resistências de aderência elevadas.

A rugosidade dos blocos cerâmicos também é uma propriedade relacionada com a porosidade interna do material. Estudos evidenciam que, com o aumento da rugosidade, há o aumento da força capilar devido ao ângulo de contato do líquido com a superfície (LI *et al.*, 2020).

Na literatura, há a tendência de que, com o aumento da temperatura de queima, ocorra redução da porosidade e aumento da força capilar. Considerando que o aumento da força capilar é também proveniente de um aumento da rugosidade, pode-se dizer que o aumento da temperatura de queima resulta em valores de rugosidade superiores (AZEVEDO *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2020).

Essas propriedades do substrato influenciam na resistência de aderência em uma escala microscópica, embora muitos pesquisadores até o momento as estejam avaliando em escalas macroscópicas, assim como as normas preveem. Ao longo dos últimos anos, com o avanço de equipamentos e técnicas, os pesquisadores iniciaram seus estudos com foco em análises em multiescala, a fim de explicar os fenômenos que ocorrem em macroescala a partir de uma abordagem em micro ou nanoescala (SADOWSKI, 2017).

Além das propriedades do substrato, as propriedades relacionadas ao material adesivo, no caso de revestimentos, as argamassas, também influenciam significativamente na resistência de aderência (COSTA, CARDOSO, JOHN, 2017; REDA TAHA, SHRIVE, 2001; SANTOS *et al.*, 2020). A argamassa de revestimento é constituída de cimento Portland ou aglomerantes, areia e água, com as adições e os aditivos variando em alguns casos.

Anteriormente ao uso do cimento Portland, utilizava-se argamassas à base de cal e areia. No entanto, com a chegada do cimento Portland, as argamassas de cal entraram em desuso. Dado o surgimento de diversas manifestações patológicas nas argamassas de cimento Portland, iniciou-se o uso de argamassa mista, ou seja, uma mistura de cimento Portland, cal, areia e água, a fim de beneficiar a mistura com as características mecânicas do cimento Portland e a trabalhabilidade, molhabilidade e retenção de água provenientes da cal (CARASEK, 2010; COSTA, CARDOSO, JOHN, 2017; GONZÁLEZ-SÁNCHEZ *et al.*, 2021; PALOMAR, BARLUENGA, 2018; QUARCIONI, CINCOTTO, 2005; ZAMPIERI, 1993).

A influência da argamassa na resistência de aderência ocorre, especialmente, por causa da reologia da argamassa, ou seja, de seu comportamento no estado fresco. No entanto, a reologia é uma propriedade de elevada complexidade (STOLZ,

2015). A reologia da argamassa irá definir a trabalhabilidade e a viscosidade no estado fresco, o que definirá o potencial de espalhamento desta sobre a rugosidade do substrato e, por consequência, a extensão de contato entre os dois materiais (CARASEK, 2010; COSTA, CARDOSO, JOHN, 2017; STOLZ, MASUERO, 2018).

A trabalhabilidade é influenciada pela quantidade de água e pela composição de finos e é a propriedade que determina a facilidade de mistura, transporte, aplicação e acabamento. As propriedades que compõem a trabalhabilidade são complexas. Além disso, o resultado final da argamassa é baseado em outras propriedades, como: consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, exsudação, densidade de massa e adesão inicial (CARASEK, 2010). A trabalhabilidade é alterada no momento em que a argamassa entra em contato com o substrato, devido à influência das propriedades dos substratos (absorção de água, rugosidade, conectividade dos poros etc.) e às condições externas relacionadas ao movimento de evaporação da água presente na argamassa (CARASEK, 2010, 2019; LI *et al.*, 2020; VAZ).

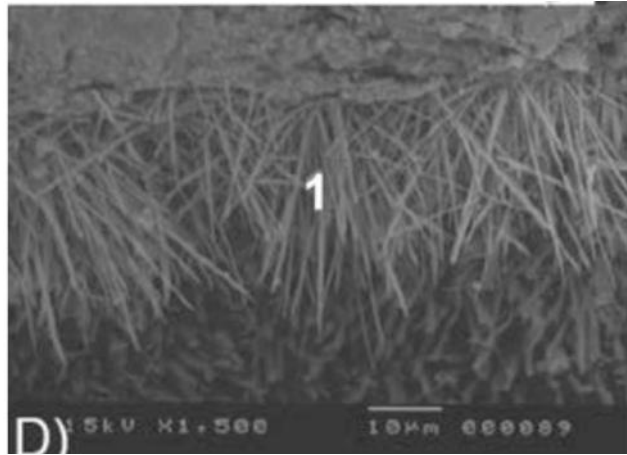
Quando a argamassa entra em contato com o substrato, parte da água de amassamento penetra no substrato. Essa água, muitas vezes, contém, em dissolução ou em estado coloidal, aglomerantes presentes na composição da argamassa (CARASEK, 2010; POLITO, 2013).

Estudos demonstraram que a aderência entre o substrato e a argamassa está relacionada ao intertravamento mecânico proveniente dos produtos de hidratação do cimento na rugosidade e porosidade do substrato, uma vez que, a argamassa, ao endurecer, origina pontos de intertravamento (CARASEK, 1996; POLITO, CARVALHO JUNIOR; BRANDÃO, 2010). A gipsita é a primeira fase a se solubilizar e liberar íons sulfato e aluminatos e, ao entrar em contato com o substrato e sofrer a sucção capilar, é arrastada para a zona de interface de forma mais precoce do que os demais produtos.

Esse fato ocorre em função da elevada presença dos elementos cálcio (Ca), enxofre (S), alumínio (Al) e ferro (Fe) na interface (CARASEK, 1996). Segundo Polito, Carvalho Junior e Brandão (2010), a formação de etringita tende a uma direção de formação, geralmente perpendicular à interface, e estas etringitas apresentam dimensões superiores às encontradas na argamassa, conforme Figura 2. Os autores explicam que a formação do cristal de etringita não permite que outros cristais se formem na interface por falta de espaço (POLITO; CARVALHO JUNIOR; BRANDÃO, 2010).



Figura 2 – Microscopia eletrônica de varredura dos cristais presentes na zona de interface argamassa/substrato

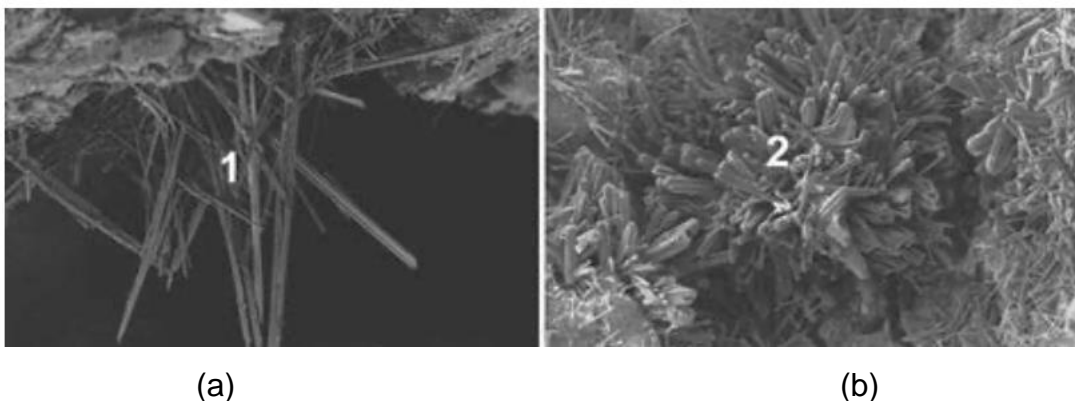


Fonte: Polito, Carvalho Junior e Brandão (2010, p. 15).

Outro ponto que os autores abordam é que, em argamassas com cal, a formação de etringita também é afetada, modificando o comprimento e a largura dos cristais, o que resultará em um aumento do intertravamento mecânico (POLITO; CARVALHO JUNIOR; BRANDÃO, 2010). Na Figura 3, é possível visualizar os cristais de etringita através de microscopia eletrônica de varredura com adição de cal e sem.

Figura 3 – Microscopia eletrônica de varredura de cristais de etringita na interface argamassa/substrato

Legenda: (a) cristais de etringita de argamassa de cimento Portland; (b) cristais de etringita de argamassa de cimento Portland e cal.



Fonte: Polito, Carvalho Junior e Brandão (2010, p. 15).

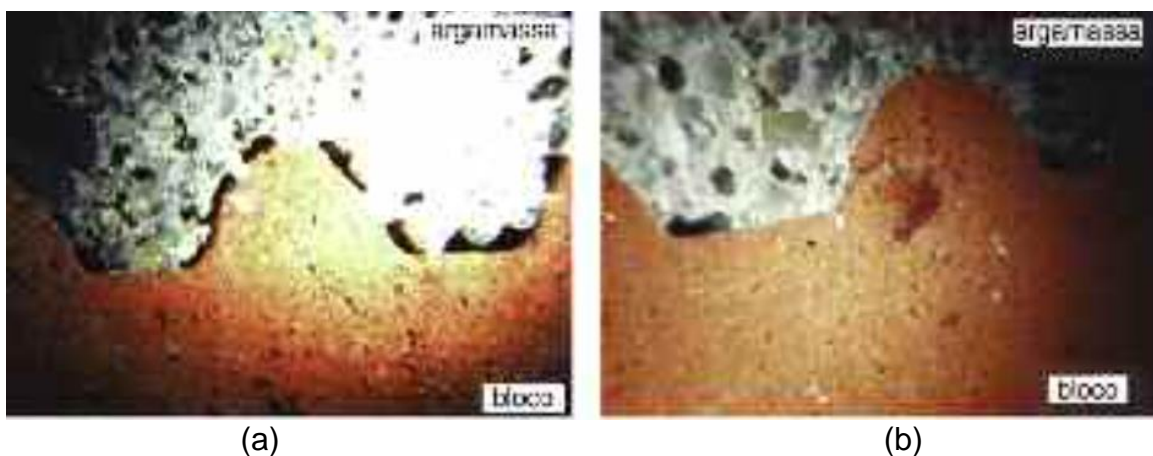
Os materiais que constituem a argamassa têm influência significativa na resistência de aderência. O tamanho das partículas é um dos parâmetros influentes, ou seja, associado ao cimento: quanto menor for o tamanho das partículas do cimento,

maior será a resistência de aderência. Nesse caso, cimentos que apresentem maior finura, como, por exemplo CP V e CP II-F 40, possuirão maiores valores de resistência de aderência quando utilizado em argamassas de revestimento. No entanto, o elevado consumo de cimento CP V resultará em maior calor de hidratação, o que, em argamassas de revestimento, é um ponto negativo devido à retração e à fissuração, fato este que pode prejudicar a resistência de aderência e a durabilidade (COSTA; CARDOSO; JOHN, 2016).

A cal também é um aglomerante com elevada finura e apresenta propriedades interessantes para as argamassas, como retenção de água e plasticidade. Dessa forma, as argamassas contendo cal apresentam maior extensão de contato e menor perda de água e fissuração. Esse efeito é beneficiado pela elevada retenção de água que a cal fornece à argamassa e pelo processo de endurecimento da cal que ocorre através da carbonatação. As fissuras que poderiam ser desenvolvidas ao longo da vida útil, ao carbonatar o revestimento, são mitigado quando há a presença de cal na composição da argamassa. Portanto, conclui-se que argamassas de cimento apresentam maior resistência de aderência, mas podem não ser duráveis devido à propensão à retração e fissuração; já as argamassas mistas de cimento e cal apresentam maior extensão de contato e maior durabilidade, sendo recomendado sempre o uso desta última. Na Figura 4, é possível observar a extensão de contato entre as argamassas e o substrato (CARASEK, 1996; 2010).

Figura 4 – Imagens obtidas em lupa estereoscópica da extensão de contato argamassa/substrato

Legenda: (a) argamassa de cimento; (b) argamassa de cimento e cal.



(a)

(b)

Fonte: Carasek (1996, p. 169-170).

As características do agregado miúdo também podem influenciar na resistência de aderência (ARNOLD; KAZMIERCZAK, 2009). Areias com granulometrias muito

grossas diminuem a extensão de contato, visto que grãos com diâmetros elevados não conseguem penetrar nos vales da rugosidade superficial e podem inibir a entrada dos grãos de cimento (COSTA; CARDOSO; JOHN, 2016). No entanto, o contrário também é prejudicial, areias muito finas podem diminuir a resistência de aderência.

Entretanto, ainda não há uma explicação concisa do efeito que ocorre, havendo, na literatura, duas hipóteses: i) com a sucção de água do bloco, os grãos finos da areia irão penetrar na porosidade do substrato, ocupando os espaços que os grãos de cimento iriam hidratar e criar ancoragem mecânica, dessa forma, devido ao fato de a areia não hidratar, esse efeito seria prejudicado; ii) com adição de partículas pequenas, o empacotamento das partículas é mais eficiente, ocasionando uma porosidade reduzida na argamassa, ou seja, poros com diâmetros pequenos (COSTA; CARDOSO; JOHN, 2016). Em consequência, segundo a teoria de poros ativos, caso o diâmetro dos poros da argamassa seja inferior ao do substrato, a sucção de água ocorrerá do substrato para a argamassa, não permitindo a penetração dos produtos de hidratação do cimento nos poros do substrato e reduzindo a ancoragem mecânica (CARASEK, 2010).

Elevadas rugosidades superficiais influenciam significativamente na força de adesão, podendo diminuir a área de contato efetiva, caso a argamassa não apresente uma viscosidade adequada, em razão do aumento da distância entre as partículas. Em contrapartida, a rugosidade causa uma força de atrito entre o fluido e o sólido, desde que o fluido apresente uma viscosidade ideal para determinada superfície (THORNTON; CUMMINS; CLEARY, 2017). Portanto, a força de adesão entre a argamassa e o substrato diminui com o aumento da rugosidade até que o tamanho dos picos e vales se torne maior ou semelhante ao tamanho das partículas (LI *et al.*, 2020).

### **2.1.2 Métodos de análise de resistência de aderência**

A caracterização da aderência de revestimentos de argamassa em macroescala ocorre por diversos ensaios, sendo o mais utilizado o ensaio de resistência à tração direta, conhecido como ensaio *pull of*. No Brasil este ensaio é regido por duas normas, a NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) que define o método de ensaio, a quantidade de corpos de prova, o cálculo de resistência de aderência e as formas de ruptura, e a NBR 13749

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a), a qual estabelece as espessuras admissíveis para os revestimentos internos e externos.

Para a realização do ensaio, é usualmente utilizado o equipamento aderímetro, especialmente em análises *in situ*, conforme apresenta a Figura 5. O ensaio costuma apresentar uma elevada variabilidade nos resultados, fato relacionado com a forma de preparo das amostras, o desnivelamento de prumo durante o ensaio e a velocidade de aplicação de carga (VAZ; CARASEK, 2019).

Figura 5 – Ensaio de resistência de aderência



Fonte: Registrada pela autora (2022).

Tendo em vista os diversos fatores que resultam em erros na determinação da tensão de aderência entre a argamassa e o substrato com o ensaio *pull-off* previsto nas normas NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) e EM 1015-12, pesquisadores vêm propondo ensaios alternativos para essa determinação.

Botas, Veiga e Velosa (2017) desenvolveram um novo método para ensaio de tração em argamassas, no qual utilizaram uma máquina de ensaio com aplicação de carga controlada. Os autores observaram que métodos convencionais apresentavam coeficientes de variação e desvio-padrão dos resultados elevados, que poderiam comprometer a confiabilidade do estudo. Portanto, propuseram um método por meio do qual foram moldadas amostras com diâmetro de 50 mm e altura de 20 mm, as

quais foram acopladas na máquina de ensaios (Figura 6). Concluíram que, dessa forma, o coeficiente de variação (CV) reduziu quando comparado com outros tipos de ensaios para tração. Ainda, observaram que o novo método apresentou menores coeficientes de variação em argamassas de cal. Os autores estudaram o impacto de amostras quadradas e redondas nos resultados e chegaram à conclusão de que amostras redondas apresentam maior dispersão nos resultados. A variação dos resultados está relacionada também com o processo de preparo das amostras, no qual as que não precisaram de cortes prévios apresentaram menores coeficientes de variação (BOTAS; VEIGA; VELOSA, 2017).

Figura 6 – Método de ensaio de resistência à tração direta

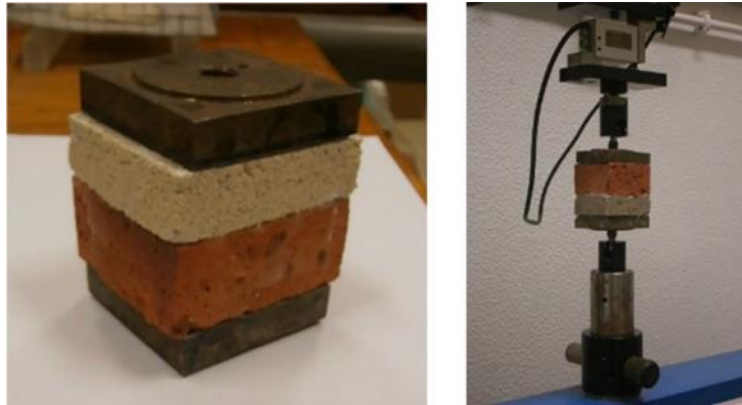


Fonte: Botas, Veiga e Velosa (2017, p. 7).

Santos *et al.* (2020) utilizaram um método, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal, o qual foi adaptado do ensaio de resistência à tração direta para o uso de uma prensa hidráulica com controle de velocidade de aplicação de carga. Desse modo, os autores precisaram adaptar também os métodos de aplicação das pastilhas, conforme apresentado na Figura 7.

Os autores concluíram que o novo método apresentou maior sensibilidade de leitura, captando valores de argamassas com resistência consideravelmente baixas e reduziu a variabilidade dos resultados, efeitos relacionados à precisão do ensaio (SANTOS *et al.*, 2020).

Figura 7 – Método de ensaio de resistência de aderência



Fonte: Santos *et al.* (2020, p. 4).

## 2.2 DURABILIDADE DE REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA

A NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b) define que a durabilidade é a capacidade da edificação e de seus sistemas de desempenhar seus objetivos ao longo do tempo sob condições de uso e de manutenções específicas. Logo, a durabilidade segundo a norma é definida pelo tempo de duração de um material exposto a intempéries e ao uso previamente estabelecido sem apresentar manifestações patológicas que comprometam o seu desempenho ou ponha em risco a edificação.

As argamassas de revestimentos são consideradas os materiais com maior exposição direta a intempéries, os quais são expostos a ações de diversas solicitações, como ação do vento, vibrações, ciclos de molhagem e secagem, ciclos de aquecimento e resfriamento, deformações provenientes de carregamentos, carbonatação etc., as quais podem afetar o seu desempenho no estado fresco e endurecido e influenciar a deterioração do revestimento (KAZMIERCZAK *et al.*, 2016; LUNARDI, 2021). Na Figura 8, estão apresentadas as principais solicitações às quais os revestimentos de argamassa estão expostos. Diversos são os fatores que afetam a durabilidade do material, contudo, as características do material, isto é, da argamassa e do substrato, as condições do meio e o uso são os principais, ainda podendo ocorrer de forma simultânea (CARASEK, 2010).

Figura 8 – Solicitações sob revestimentos de argamassa



Fonte: Bonin (1999) *apud* Kazmierczak *et al.* (2016, p. 150).

Na literatura, o principal fator interligado com a durabilidade de revestimentos de argamassa é a água (GROOT, LARBI, 1999; LUNARDI, 2021; SENTENA, KAZMIERCZAK, KREIN, 2018). Quando a água é associada a um material poroso, como é o caso dos revestimentos de argamassa, sua penetração pode ocorrer de forma mais significativa em pouco tempo, gerando repetitivas solicitações em um curto intervalo de tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Dessa forma, alguns autores afirmam que materiais de construção civil expostos diretamente a intempéries devem apresentar pouca absorção de água e elevada conectividade entre os poros, a fim de garantir que a água absorvida seja rapidamente expelida (CARASEK, 1996; GROOT, 1999).

Há muitos processos de degradação dos revestimentos, alguns caracterizados como processos que beneficiam a matriz cimentícia, como, por exemplo, a carbonatação, e outros caracterizados como processos de deterioração, como os ciclos de molhagem e secagem e as variações de temperatura, os quais prejudicam a matriz e diminuem sua vida útil. A seguir, são detalhados esses dois processos.

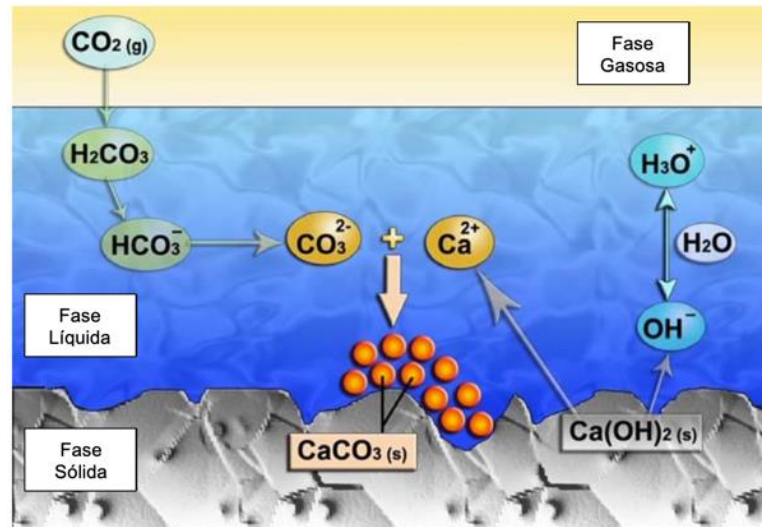
### 2.2.1 Carbonatação

A carbonatação é um processo físico-químico que ocorre nas matrizes cimentícias graças à entrada de  $\text{CO}_2$  e à combinação deste agente com os produtos de hidratação presentes na fase líquida intersticial que se encontra nos poros, a qual é rica em sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e cálcio ( $\text{Ca}^+$ ). Para que o processo de carbonatação ocorra, é imprescindível a entrada de  $\text{CO}_2$  e umidade nos poros da matriz cimentícia ao longo da sua vida útil. Portanto, as propriedades da matriz cimentícia, como porosidade, homogeneização, disponibilidade de hidróxido de cálcio e de óxido de cálcio, além das condições ambientais do entorno e condições de exposição, são fatores que influenciam de forma significativa neste processo (POSSAN, 2010).

A água presente nos poros desempenha um papel fundamental na carbonatação, contribuindo para as reações químicas ou as impedindo. A água é o meio no qual todas as reações de carbonatação ocorrem, no entanto, caso os poros estejam saturados, a água impedirá a entrada de  $\text{CO}_2$  e evitará o processo de carbonatação (PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1990). Portanto, o processo de carbonatação ocorre através da penetração do  $\text{CO}_2$ , que se solubiliza na presença de água e origina o ácido carbonático. Esta dissociação das moléculas de  $\text{CO}_2$  provoca uma diminuição na concentração de hidroxilas presentes na matriz, causando a queda do pH. O ácido carbonático se combina com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) precipitado nos poros, originando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), o qual precipitará de forma sólida no interior dos poros (PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1990). Na Figura 9, está apresentado de forma esquemática esse processo.

Segundo Papadakis, Fardis e Vayenas (1990), o principal componente que carbonata na matriz cimentícia é o hidróxido de cálcio, mas todos os produtos de hidratação do cimento são possíveis de carbonatação sendo os mais frequentes o hidróxido de potássio (KOH), o hidróxido de sódio (NaOH) e os silicatos alcalinos. Os processos físico-químicos, assim como os balanços químicos com cada produto de hidratação do cimento, são descritos na literatura de forma precisa no livro “*Durability of building materials and components*” (PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1990), e em outros trabalhos, como os de Thiery (2005), Possan (2010), Lunardi (2021), etc.



Figura 9 – Processo de carbonatação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 

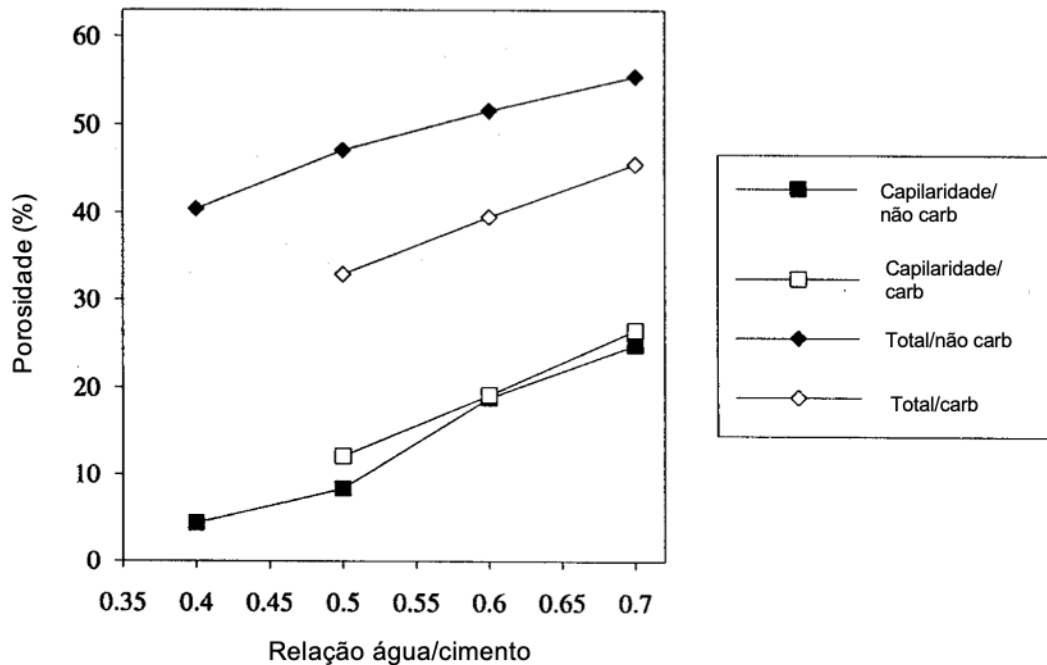
Fonte: Adaptado de Thiery (2005, p. 10).

Conforme mencionado, o mecanismo de penetração do  $\text{CO}_2$  ocorre através de mecanismos de transporte de gases ou líquidos, influenciado pela estrutura interna da matriz. Dentre os mecanismos de transporte de fluidos estudados, os que se destacam em matrizes cimentícias são a permeabilidade, a absorção capilar, a difusão de íons e gases e a migração de íons, os quais podem agir de forma isolada ou sinérgica (MORANDEAU, THIÉRY, DANGLA, 2014; POSSAN, 2010). Os fatores que influenciam este processo, dependentes da etapa de projeto, são a relação a/c, o teor de cimento, as adições, o processo de moldagem e cura, as tensões, as cargas aplicadas, etc. (HOUST, WITTMANN, 2002; PAPADAKIS, FARDIS, VAYENAS, 1990).

Os efeitos da carbonatação em matrizes cimentícias são, em alguns casos, benéficos para a durabilidade, visto que a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  no interior dos poros auxilia o fechamento e os refinamentos destes, reduzindo a permeabilidade da matriz na faixa de 10 nm a 100 nm (MORANDEAU, THIÉRY, DANGLA, 2015; NGALA, PAGE, 1997; THIERY, 2005; TRACZ, ZDEB, 2019). O volume do  $\text{CaCO}_3$  é cerca de 12% maior do que o volume de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (ISHIDA; MAEKAWA, 2000). Este efeito de diminuição da porosidade influenciará a penetração do  $\text{CO}_2$  ao longo do tempo, uma vez que, ao ocorrer a reação de carbonatação nas camadas superficiais e o  $\text{CaCO}_3$  precipitar nos poros e reduzir a porosidade, o  $\text{CO}_2$  que penetrar posteriormente irá, por consequência, reduzir a taxa de penetração, tornando a carbonatação uma função não linear (BRANCH; EPPS; KOSSON, 2018). Na Figura 10, está demonstrada a

relação de porosidade e a relação a/c em amostras carbonatadas e não carbonatadas, demonstrando o comportamento descrito acima.

Figura 10 – Efeito da carbonatação na porosidade de diferentes relações a/c



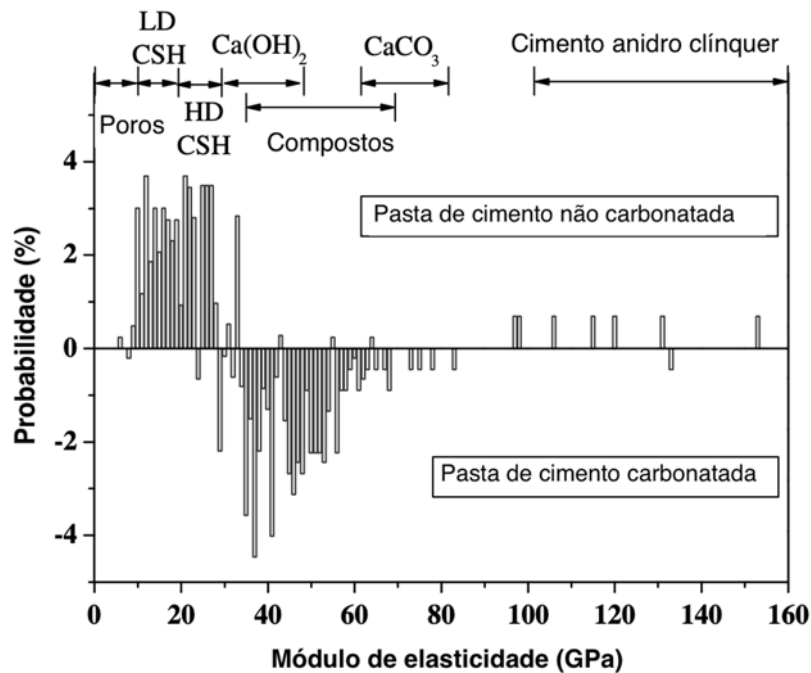
Fonte: Ngala e Page (1997, p. 98).

Com a diminuição da porosidade, as propriedades da matriz cimentícia melhoram, especialmente valores relacionados às propriedades mecânicas (CHI, HUANG, YANG, 2002; ŠAVIJA, LUKOVIĆ, 2016). No estudo desenvolvido por Zhang *et al.* (2020), os autores também observaram a diminuição da porosidade após a carbonatação e avaliaram a resistência à flexão e o módulo de elasticidade, verificando que ambos aumentaram seus valores com a diminuição da porosidade atrelada ao efeito da carbonatação.

Os aumentos nas resistências mecânicas podem estar atrelados, além da porosidade, à alteração microestrutural do gel de C-S-H (PURNELL; SHORT; PAGE, 2001). Estudos analisaram os efeitos da carbonatação no módulo de elasticidade e dureza através do uso de nanoindentadores e observaram que, para ambos, ocorreu um aumento dos valores para amostras carbonatadas (ŠAVIJA; LUKOVIĆ, 2016). Ainda, Han *et al.* (2015) observaram que, anteriormente à carbonatação, os produtos com maior módulo de elasticidade eram grãos anidros, porém, após a carbonatação,

ocorreu a elevação do módulo de elasticidade e a diminuição da quantidade de grãos anidros, conforme observado na Figura 11.

Figura 11 – Módulo de elasticidade e dureza de amostras antes e após a carbonatação



Fonte: Han *et al.* (2015).

Em argamassas, especialmente argamassas mistas de cimento e cal, o processo de carbonatação ocorre de forma mais intensa, pois a cal apresenta em sua composição elevada quantidade de CaO, que, ao hidratar, gera hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), o qual, juntamente com o CO<sub>2</sub>, irá formar carbonato de cálcio. Portanto, com a adição de cal, há maior reserva de hidróxido de cálcio na mistura e maior formação de carbonato de cálcio (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Dessa forma, a redução da porosidade se dá de forma mais expressiva, o que resulta em uma matriz não totalmente carbonatada devido à inibição da entrada de CO<sub>2</sub> à medida que os poros são reduzidos (FERRETTI, BAŽANT, 2006; LAWRENCE, 2006). Autores observaram que, além das alterações citadas, as argamassas mistas após a carbonatação apresentam maior densidade, fato este que pode estar relacionado à elevada quantidade de carbonato de cálcio precipitado (CINCOTTO *et al.*, 2010).

Embora a carbonatação resulte em benefícios à matriz cimentícia, há também efeitos que podem prejudicar o material. A formação de CaCO<sub>3</sub>, por apresentar um

volume superior ao produto  $\text{Ca(OH)}_2$  e em conjunto com a redução da porosidade à medida que a carbonatação ocorre, pode gerar fraturas internas provenientes da precipitação do carbonato de cálcio em poros inferiores ao seu volume, causando fissuras e resultando na retração por depleção capilar (BASTOS, 2001; LADEIRA, 2017) e facilitando a penetração de  $\text{CO}_2$  em profundidades superiores (ABID *et al.*, 2015).

Com o avanço da espessura de carbonatação na amostra, a portlandita é consumida, e, após ser carbonatada, a reserva de  $\text{Ca(OH)}_2$  diminui e o próprio  $\text{CaCO}_3$  é consumido (SCHEMMER, 2020). Embora o carbonato de cálcio seja mais estável do que as reações químicas do hidróxido de cálcio, ele ainda reage com a entrada de  $\text{CO}_2$ . A água carbonatada presente no interior da amostra reage com o  $\text{CO}_2$  gerando  $\text{HCO}_3^-$ , e este último irá reagir com o  $\text{CaCO}_3$  e formar íons de cálcio bicarbonato, o qual é solúvel e pode ser lixiviado para fora da matriz cimentícia (KUTCHKO *et al.*, 2007). O produto gerado, por ser facilmente diluído para fora da amostra, resulta em maior porosidade e permeabilidade, podendo ser superior aos volumes no início da carbonatação (NYGAARD, 2010).

Segundo estudos desenvolvidos por Lunardi (2021), em argamassas de revestimento à base de cimento, o processo de carbonatação trouxe melhora na resistência de aderência. Esse efeito está ligado à diminuição da porosidade e à melhora nas propriedades mecânicas, e, embora a diminuição da porosidade eleve o módulo de elasticidade, este não foi significativo para obter malefícios ao sistema de revestimento. Cornely (2022) observou que, em argamassas de revestimento mistas, o efeito obtido pela exposição à carbonatação foi semelhante ao encontrado por Lunardi (2021), haja vista que em argamassas mistas a reserva alcalina é superior à reserva em argamassas de cimento.

O efeito da carbonatação pode ainda alterar os efeitos da microestrutura através de modificações físico-químicas do material. Essa alteração modifica os processos de adsorção e dessorção do vapor da água, devido à modificação no tamanho, à distribuição e à área superficial dos poros (JOHANNESSON; UTGENANNT, 2001).

O ensaio para verificação da profundidade de carbonatação mais comumente utilizado, em função da facilidade de realização, é a aspensão com fenolftaleína. A fenolftaleína é um composto orgânico de fórmula  $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ , o qual é utilizado como indicador de pH, ou seja, a sua cor é alterada dependendo do pH com o qual entra em

contato. Nesse caso, a fenolftaleína recebe a coloração marsala quando encontra uma superfície com pHs maiores ou iguais a 11, já em pHs mais baixos é incolor (CHINCHÓN-PAYÁ; ANDRADE; CHINCHÓN, 2016). Portanto, na matriz cimentícia, a fenolftaleína indica em cor marsala a região não carbonatada.

## 2.2.2 Degradação da argamassa de revestimento

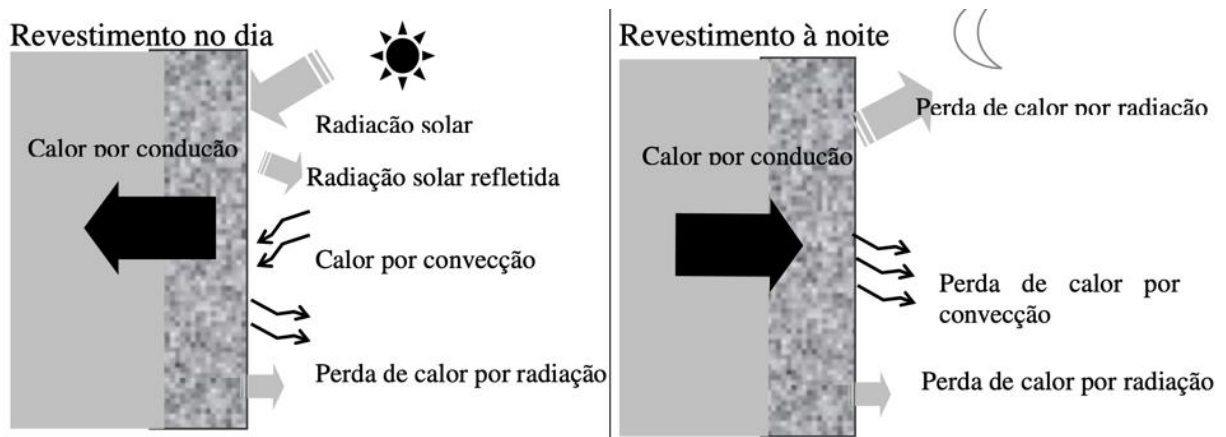
Os efeitos relacionados à degradação de argamassas de revestimento, geralmente em fachadas, são associados ao efeito dos gradientes térmicos aos quais estas argamassas estão submetidas ao longo do dia (SENTENA, 2015), ou seja, está relacionada à interação da argamassa com os fenômenos climáticos (FREITAS; CARASEK; CASCUDO, 2014).

Os efeitos causados pela ação de agentes externos, como chuva, vento, umidade, sol etc., degradam as argamassas de revestimento devido aos efeitos de dilatação e contração, que causam fadiga e diminuem a vida útil das estruturas (JIANG *et al.*, 2017; SENTENA, KAZMIERCZAK, KREIN, 2018). A argamassa tende a aumentar suas dimensões em temperaturas elevadas e a reduzir as dimensões em temperaturas baixas. A intensidade e a forma de movimentação dependem do gradiente térmico do local onde a argamassa está inserida e das propriedades térmicas desta (SENTENA; KAZMIERCZAK; KREIN, 2018). A propriedade do material que mensura o grau de dilatação que um material pode sofrer é o coeficiente de dilatação. Todos os materiais apresentam variação dimensional quando há a variação de temperatura; nas argamassas de revestimento este coeficiente varia de  $10 - 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (ESQUIVEL, 2009). Na Figura 12, estão apresentadas as exposições e transferências de calor que ocorrem em uma fachada de argamassa durante o dia e a noite.

Os revestimentos de argamassa sofrem diferentes exposições dependendo da aplicação. Em ambientes internos, a variação de temperatura é afetada especialmente pelo calor gerado devido ao uso da edificação ou à transferência de calor do revestimento externo. Já em ambientes externos, a argamassa é submetida a variações de temperatura as quais se alteram com o passar dos dias, das estações e dos anos (ESQUIVEL, 2009). Normalmente os revestimentos de argamassa externos sofrem ciclos de temperaturas diários. Este efeito de variação dimensional recorrente ao longo dos anos causará no revestimento o processo de fadiga, que indica o início

da ruptura de um material submetido a um número de ciclos até seu colapso (JIANG *et al.*, 2017). Isto é, o efeito da fadiga causa fissuras no material, as quais são propagadas à medida que novos ciclos ocorram diminuindo a resistência, o que, por sua vez, ocasiona a degradação do revestimento e, portanto, compromete a vida útil da estrutura (LUNARDI, 2021).

Figura 12 – Exposição ao calor de revestimentos de argamassa



Fonte: Esquivel (2009, p. 48).

No Brasil, a NBR 15575 regulamenta o ensaio de envelhecimento acelerado, através da exposição dos revestimentos de argamassa a 10 ciclos de molhagem e secagem nos quais são submetidos à temperatura de  $80 \pm 3$  °C, mantida por um patamar de 1 hora. Posteriormente, os revestimentos são submetidos à molhagem até que atinjam uma temperatura de  $20 \pm 5$  °C (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b). A norma estabelece como método de avaliação a percepção do aparecimento de fissuras e a variação dimensional, no entanto não avalia a fadiga do material. Dehestani, Hosseini e Beydokhti (2020) avaliaram argamassas e concretos submetidos a ensaios de envelhecimento acelerado durante 20 ciclos e concluíram que, quanto mais o material é submetido a ciclos, menor será a resistência à fratura, pois este vai se degradando à medida que o envelhecimento ocorre.

Além da norma brasileira, há diversas normas estrangeiras que avaliam os efeitos de degradação de paredes através de ciclos de calor e choques térmicos com aspersão de água, sendo: C 1185-8 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012), ISO 8336 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2009) e a ETAG 04 (EUROPEAN ORGANISATION FOR

TECHNICAL APPROVALS, 2004). Ao comparar as normas citadas, é possível identificar variações nas metodologias, como a quantidade de ciclos, a temperatura máxima, o tempo de permanência, o uso de restrição, a quantidade de água utilizada para choque térmico etc. No Quadro 1, está apresentado o resumo das diferenças entre as normas (OLIVEIRA; FONTENELLE; MITIDIARI FILHO, 2014).

Quadro 1 – Divergências entre normas para ensaio de envelhecimento acelerado  
(continua)

Categoria	Parâmetros	Detalhamento dos parâmetros		
		NBR 15575-4	C1185-8	ETAG 004
Aquecimento	Método de medição da temperatura do ensaio	Medição direta, feita por meio de termopares posicionados sobre a superfície aquecida do corpo de prova	Medição indireta – medida em corpo de prova de referência/placa metálica preta	Medição direta, feita por meio de termopares posicionados sobre a superfície aquecida do corpo de prova
	Tempo para atingir a temperatura de aquecimento máxima	Não estabelecido	Não estabelecido	1 h
	Temperatura máxima do ensaio	$(80 \pm 3) ^\circ\text{C}$	$(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$	$(70 \pm 5) ^\circ\text{C}$
	Tempo de permanência na fase aquecida	1 h	2 h 55 min	2 h
	Variação admitida da temperatura entre centro e bordas do corpo de prova	$\pm 3 ^\circ\text{C}$	Não estabelecido	Não estabelecido
Resfriamento com água	Temperatura da água	Indefinida, porém até atingir a temperatura superficial do corpo de prova $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$	$\leq 30 ^\circ\text{C}$	$(15 \pm 5) ^\circ\text{C}$
	Quantidade de água	Indefinida	3,79 L/min	$\geq 1,0 \text{ L/m}^2 \text{ min}$ , o que equivale a aproximadamente 6 L/min
	Tempo de aspersão	Indefinido, mas até atingir a temperatura superficial de $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$	2 h 55 min	1 h
	Distribuição sobre a superfície	Uniforme	Uniforme	Uniforme
	Temperatura após o resfriamento do corpo de prova	$(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$	Não estabelecido	Não estabelecido

Quadro 1 – Divergências entre normas para ensaio de envelhecimento acelerado  
(conclusão)

Categoria	Parâmetros	Detalhamento dos parâmetros		
		NBR 15575-4	C1185-8	ETAG 004
Ciclos	Tempo de cada ciclo	Aproximadamente 6h, porém depende da composição da parede	6 h	6 h
	Quantidade de ciclos	10	25	80
	Intervalo entre ciclos	Não estabelecido	5 min	2 h
Corpos de prova	Dimensão	$\geq 3,0\text{m}^2$ (1,2 m x 2,5 m)	$\geq 3,5\text{m}^2$	$\geq 6,0^2$
	Restrição de movimentação das bordas	Sem restrição	Com restrição	Sem restrição
	Cor da superfície	Não estabelecido	Não estabelecido, pois a medição da temperatura máxima de ensaio é feita sobre placa de referência, portanto, a cor da superfície do corpo de prova não influi no ensaio	Não estabelecido

Fonte: Adaptado de Oliveira, Fontenelle e Mitidieri Filho (2014, p. 62).

Segundo Oliveira, Fontenelle e Mitidieri Filho (2014), o uso de restrição das movimentações laterais do corpo de prova ocasiona um aumento nas tensões provocadas pelas variações de temperatura. O uso desta metodologia simula de forma real os efeitos ocasionados em edificações, visto que, quando o revestimento é exposto, suas laterais estão ancoradas em outros elementos da estrutura, não apresentando livre movimentação.

### 2.2.3 Tensões em revestimentos de argamassa

A durabilidade de revestimentos de argamassa está fortemente associada à capacidade do revestimento de suportar tensões ao longo da sua vida útil (MEHTA; MONTEIRO, 2006). As solicitações mais comuns que o revestimento sofre são relacionadas à variação térmica, ao peso próprio e aos carregamentos estáticos e dinâmicos (BAUER; ELTON, 2009), isto é, relacionadas a esforços de tração e cisalhamento (CAMPOS, 2014).



A tensão é definida como a intensidade de determinada força aplicada em uma área específica (BEER *et al.*, 2011). Já as deformações são relacionadas ao desgaste ocorrido no material sob determinada aplicação de tensão (MEHTA; MONTEIRO, 2006). As deformações são interligadas com o módulo de elasticidade, posto que este é um parâmetro mecânico o qual avalia a rigidez do material, ou seja, é a medida de tensão necessária para que o material apresente deformações (SINGH; NAGAR; AGRAWAL, 2016). O módulo de elasticidade é um parâmetro fundamental para garantir a eficiência das argamassas, pois um valor elevado está relacionado à baixa capacidade do material de se deformar. No caso das argamassas, considerando a exposição a intempéries, conforme mencionado na seção anterior, é necessário que a argamassa apresente uma elasticidade adequada para suportar as variações dimensionais sem afetar a durabilidade e a vida útil da edificação (ESQUIVEL, 2009; MARQUES *et al.*, 2020). Argamassas de revestimento contendo cal em sua composição normalmente apresentam módulo de elasticidade que variam de 1,5 a 10 GPa (MARQUES *et al.*, 2020; POLITO, 2008; VEIGA, 2017).

Os esforços predominantes em argamassas de revestimento são de tração e de cisalhamento, porém, estes podem ser aplicados de forma isolada ou simultânea, sendo esta forma a mais usual nas edificações devido a impactos ou movimentações higroscópicas, aos desgastes superficiais (associados a fatores de degradação), à ação da gravidade e a eventuais aplicações (CARASEK, 2010). Esses esforços apresentam influência tanto na interface quanto ao longo da espessura do revestimento e influenciarão na resistência de aderência.

Ao longo da vida útil do material, com a exposição do revestimento a tensões de tração e cisalhamento, provenientes de ciclos repetitivos de carregamentos, o material iniciará seu processo de fadiga e, ao final da resistência limite, sofrerá fissuração (JIANG *et al.*, 2017). Após a formação das fissuras, estas tendem a se propagar. Há duas formas de este fenômeno ocorrer: pela propagação da fissura mantendo o mesmo nível de carregamento ou devido a novos carregamentos. Dessa forma, é necessário ter conhecimento sobre a força a qual causou a fissura, a fim de obter o coeficiente de intensidade do estresse, uma vez que, em intensidades elevadas, a fissura tende a se propagar mesmo anteriormente a novas solicitações (ANDERSON, 2017).

O estresse causado em revestimentos de argamassa se inicia, principalmente, pela face exterior em contato com o meio externo e sofre as variações dimensionais,

bem como as aplicações de tensões (CARASEK, 2010). À medida que a argamassa é submetida a novos esforços, as fissuras tendem a se propagar em direção à interface, causando anomalias e prejudicando tanto a fachada da edificação em sua estética quanto a durabilidade do próprio edifício, já que pode ocorrer deslocamento do revestimento (MARQUES *et al.*, 2020). Vale ressaltar que a literatura abrange estudos aplicando diferentes ensaios em argamassas sem consideram a sua exposição às intempéries.

Embora alguns pesquisadores utilizem imagens para avaliar os efeitos de degradação dos materiais de construção civil, a verificação e análise de fissuras é um método ainda não estipulado em norma. Existem métodos fotográficos e análise que utilizam o AutoCad (KOPPE, 2016), no entanto, esta é uma metodologia que demanda cuidados específicos, pois é influenciada pelo operador. Outro método que vem sendo utilizado em materiais de construção civil é a técnica de correlação de imagem digital (HOWLADER, MASIA, GRIFFITH, 2021; LIU, XIAO, SINGH, 2021; ZHAO *et al.*, 2021).

#### **2.2.4 Análise de fissuras pela correlação de imagem digital**

A CID é um método utilizado em diversas áreas de pesquisa, como metais, filmes finos, ligações interfaciais, biomecânica e ortodôntica e tem sido utilizada em alguns estudos na análise de materiais de construção civil (LIU, XIAO, SINGH, 2021; MAUROUX *et al.*, 2012; ZHAO *et al.*, 2021). É um método de análise de imagem sem contato, podendo ser 2D e 3D, e que permite avaliar todo o campo de deformações de interesse, por meio de comparações em imagens antes da deformação, durante a deformação e após ela (YOON *et al.*, 2021). Esta tecnologia foi desenvolvida em 1980 a partir da fotogrametria e é continuamente aprimorada e adequada a diferentes áreas do conhecimento (PETERS; RANSON, 1982; SUTTON, ORTEU.; SCHREIER, 2009; SUTTON, *et al.*, 1983). Essa técnica chama a atenção dos pesquisadores pelo custo-benefício quando comparada a técnicas com uso de transdutor de deslocamento variável linear (LVDT) ou *strain gates*, bem como por ser sem contato e, portando, poder ser aplicada juntamente a outro ensaio (SMRKIĆ; KOŠČAK; DAMJANOVIĆ, 2018).

Por ser uma técnica atraente, foi amplamente aprimorada para análise de tensões e deformações com precisão (ABSHIRINI; SOLTANI; MARASHIZADEH,

2016). Alguns autores a utilizaram para o cálculo de fatores de intensidade de tensão e tenacidade da fratura (CATALANOTTI *et al.*, 2010; DUBOIS *et al.*, 2012).

O método de CID é baseado na comparação de imagens antes das deformações e após elas, e um bloco de pixels que apresentam coloração igual é mapeado entre as imagens, a fim de identificar seu deslocamento (LIU *et al.*, 2015). Inicialmente cria-se uma malha de pontos sob uma superfície, a qual, após o carregamento, irá se deformar. A malha de pontos capturada por uma câmera digital resultará em pixels com tonalidades que variam de 1 a 255 na escala de cores. É indicado que haja elevado contraste entre o fundo e os pontos, bem como que estes sejam aleatórios e desordenados (SMRKIĆ; KOŠČAK; DAMJANOVIĆ, 2018).

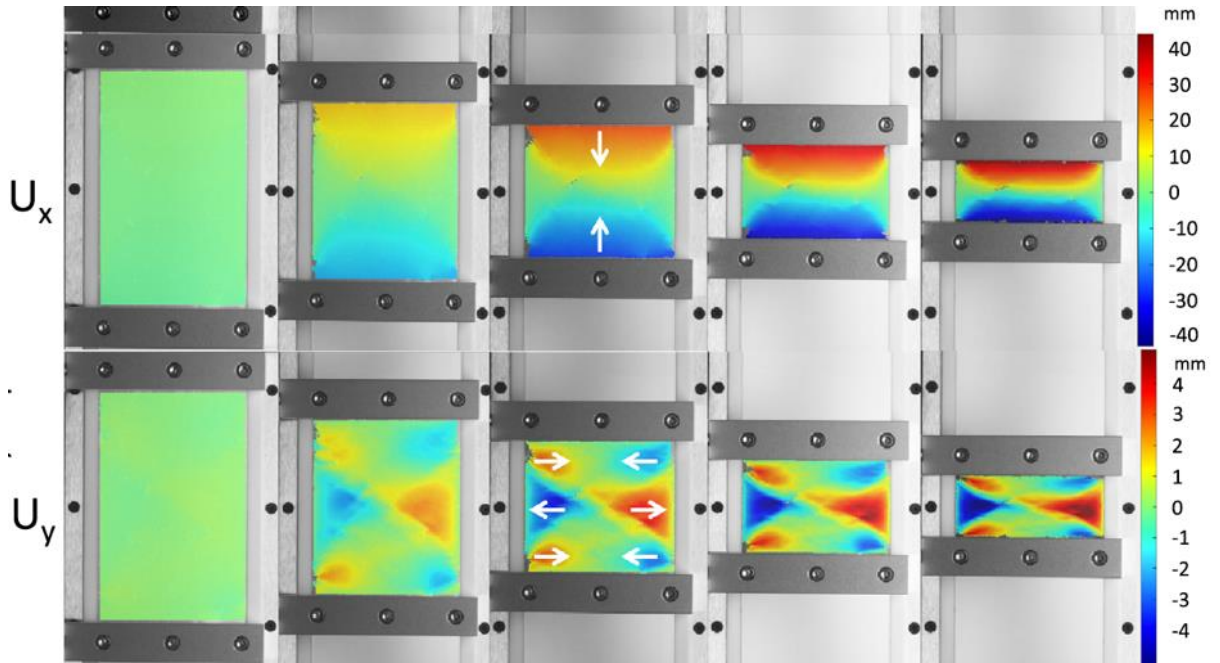
Os *softwares* utilizados para computar os resultados agrupam os pixels da imagem referência e criam subconjuntos de pixels com tonalidades iguais. Em seguida, utilizando a imagem deformada, medem cada pixel e seu deslocamento em comparação à imagem referência. Por fim, os *softwares* criam deslocamentos médios a partir dos valores de cada pixel que compõem o subconjunto (LECOMPTE *et al.*, 2006) e, após, calculam o coeficiente de correlação entre as imagens (ABSHIRINI; SOLTANI; MARASHIZADEH, 2016).

A formulação matemática no qual os *softwares* são baseados pode ser encontrada de forma detalhada na literatura (PETERS, RANSON, 1982; SUTTON, ORTEU, SCHREIER, 2009; SUTTON *et al.*, 1983). Os resultados são expressos através de mapas de coeficientes de variação, relacionados com a deformação dos pontos após a aplicação da tensão, conforme apresentado na Figura 133, em que Vora *et al.* (2018) analisaram os sentidos dos deslocamentos e compararam com os ensaios de compressão.

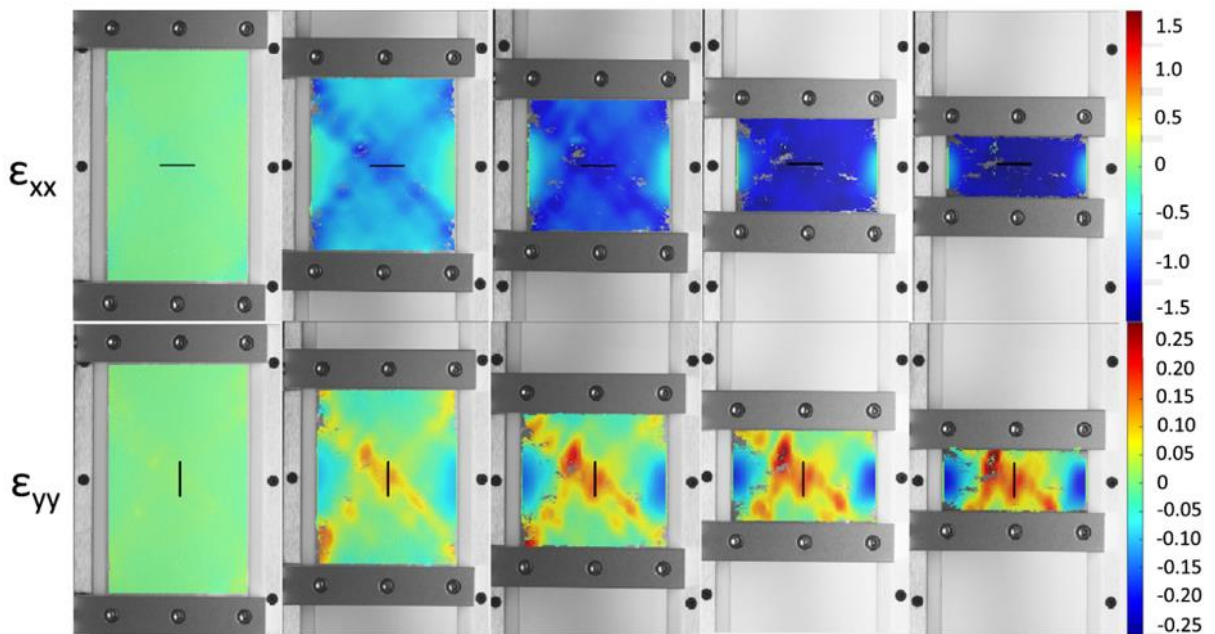
Na Figura 133a, estão apresentados os resultados que Vora *et al.* (2018) obtiveram em um ensaio de compressão quanto aos deslocamentos, em que o eixo X positivo é de cima para baixo e o eixo Y é positivo da esquerda para a direita. Os resultados são condizentes com o esperado para ensaio de compressão. Já na Figura 133b, está apresentada a escala de cores para o tipo de esforço, em que os valores abaixo de zero indicam compressão e os valores acima de zero indicam os esforços de tração/cisalhamento. A partir da CID, é possível obter resultados de deslocamentos, deformações específicas através de extensometria digital, análise de esforços de tração e compressão, entre outros (VORA *et al.*, 2018). O método é aplicado na área de construção civil em argamassas de revestimento (HOWLADER,

MASIA, GRIFFITH, 2021; MAUROUX *et al.*, 2012), argamassa de reparo (ZHAO *et al.*, 2021), barras corrugadas (SPENCER *et al.*, 2021), concreto reforçado (FAYYAD; LEES, 2014), entre outros materiais.

Figura 13 – Resultados esperados em correlação de imagem digital



(a)



(b)

Fonte: Vora *et al.* (2018, p. 98).

Este método apresenta diversas vantagens quando comparado a métodos com o uso de LVDT ou *strain gates*, sendo os principais: o custo-benefício, pois, para aplicação da técnica, é necessário uma câmera de boa qualidade e o *software* específico, no entanto não há limites de processamento, diferentemente dos LVDT ou *strain gates* que podem, em alguns casos, ser utilizados apenas uma vez; a capacidade de análise de toda a face (com método 2D) ou toda a amostra (com método 3D), visto que, no método de LVDT, há o risco de a fissura não ocorrer na linha de leitura; ser uma técnica sem contato, evitando que os sensores alterem o deslocamento. Contudo, esta técnica apresenta algumas limitações (SMRKIĆ; KOŠČAK; DAMJANOVIĆ, 2018).

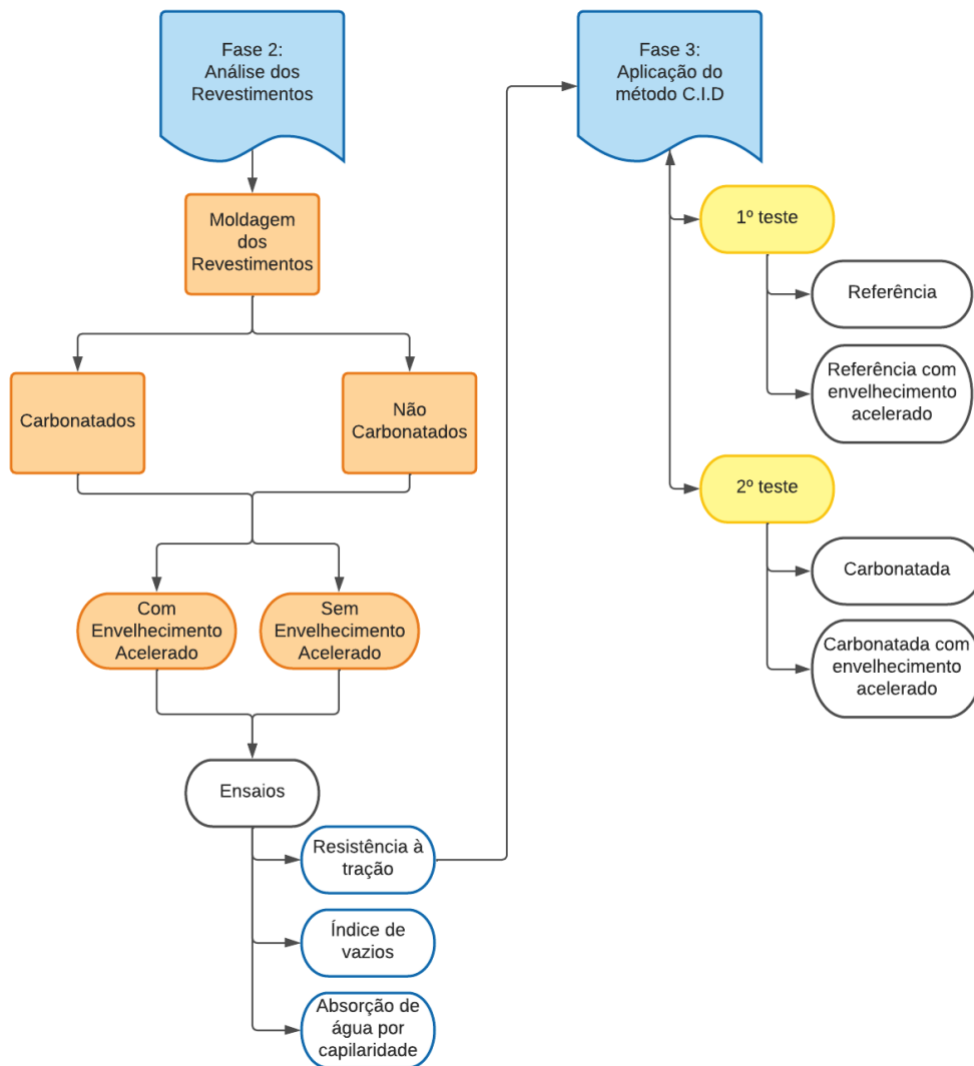
Tendo em vista que a técnica é baseada na correlação de imagens, ou seja, compara a movimentação dos pixels da imagem referência com a imagem deslocada, qualquer movimento que não seja o deslocamento próprio do ensaio será lido como resultado. Portanto, não pode haver movimentações externas da amostra após o início do ensaio sem que seja pela força exercida do equipamento. A câmera não pode se deslocar devido a ventos ou contato entre o operador e o equipamento, caso contrário, as leituras não serão precisas (SMRKIĆ; KOŠČAK; DAMJANOVIĆ, 2018). Deve-se tomar cuidado com a distorção de imagem da câmera e com a possibilidade de o erro da câmera ser superior ao deslocamento da amostra, sob o risco de haver interferências e o resultado não ser fidedigno (SMRKIĆ; KOŠČAK; DAMJANOVIĆ, 2018).

Outra limitação da técnica é a criação da malha de pontos. Crammond, Boyd, Dulieu-Barton (2013), Iecompte *et al.* (2006); Liu *et al.* (2015); Smrkić; Koščak; Damjanović (2018) mostraram que a malha de pontos apresenta forte ligação com a precisão dos resultados. Os autores indicam que a malha de pontos deve ser aleatória, com elevado contraste entre os pontos e o fundo, a fim de evitar que a escala de cores seja semelhante, pois o *software* poderá agrupar subconjuntos com dimensões elevadas. A iluminação deve ser constante para que a tonalidade dos pontos permaneça igual durante todo o ensaio. A densidade de pontos e o tamanho destes devem ser compatíveis com o deslocamento esperado da amostra, caso contrário a leitura não será precisa, ou seja, quanto menor o deslocamento menor o tamanho dos pontos.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é descrito o programa experimental de forma detalhada e precisa para atender aos objetivos descritos no capítulo 1. O programa experimental foi dividido em três fases, sendo: fase 1, caracterização dos materiais (blocos cerâmicos, argamassa no estado fresco e no estado endurecido); fase 2, ensaios dos revestimentos de argamassas associados a ensaios de carbonatação e envelhecimento acelerado; e fase 3, aplicação do método de correlação de imagem digital (CID) juntamente com o ensaio de resistência à tração. Na Figura 144, está apresentado o fluxograma das fases 2 e 3.

Figura 14 – Fluxograma do programa experimental: fases 2 e 3



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

### 3.1 FATORES E VARIÁVEIS

Os fatores e variáveis são definidos com base nos objetivos propostos nesta pesquisa, compreendendo os limites do trabalho.

#### 3.1.1 Fatores de controle com níveis variáveis

Os fatores de controle descrevem os grupos a serem analisados nas variáveis de respostas. No Quadro 2, está apresentada a subdivisão do trabalho, em quatro grupos de variáveis, definidas com as seguintes nomenclaturas: referência envelhecido (REF E), referência não envelhecido (REF), carbonatado envelhecido (CARB E) e carbonatado não envelhecido (CARB).

Quadro 2 – Fatores de controle para a análise de comportamento dos revestimentos

Variável	Envelhecimento	Nomenclatura
Referência	Sim	REF E
	Não	REF
Carbonatado	Sim	CARB E
	Não	CARB

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

#### 3.1.2 Fatores fixos

Os fatores fixos da pesquisa foram definidos como:

- tipo de cimento: CP II F 40
- tipo de cal: CH I
- traço: 1:1:4 (cimento:cal:areia);
- índice de consistência: 260 mm  $\pm$  10 mm;
- processo de moldagem;
- processo de cura úmida;
- processo de envelhecimento acelerado;
- processo de carbonatação.

Os materiais e os parâmetros definidos para esta pesquisa estão justificados ao longo da seção 3.1.

### 3.1.3 Variáveis de respostas

As variáveis de respostas são baseadas nos objetivos específicos da pesquisa. Foram avaliados três ensaios principais para cada nível de variável (referência, referência com envelhecimento acelerado, carbonatado e carbonatado com envelhecimento acelerado) e para cada substrato. No Quadro 3, está apresentada a quantificação das amostras.

Quadro 3 – Variáveis de respostas

Variáveis de respostas	Nº de repetições em uma variável	Nº de repetições totais
Resistência de aderência	20	160
Absorção por capilaridade	5	40
Índice de vazios	3	24
Módulo de elasticidade dos revestimentos	20	160

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

## 3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa para confecção dos revestimentos de argamassa de cimento e cal estão descritos a seguir.

### 3.2.1 Cimento

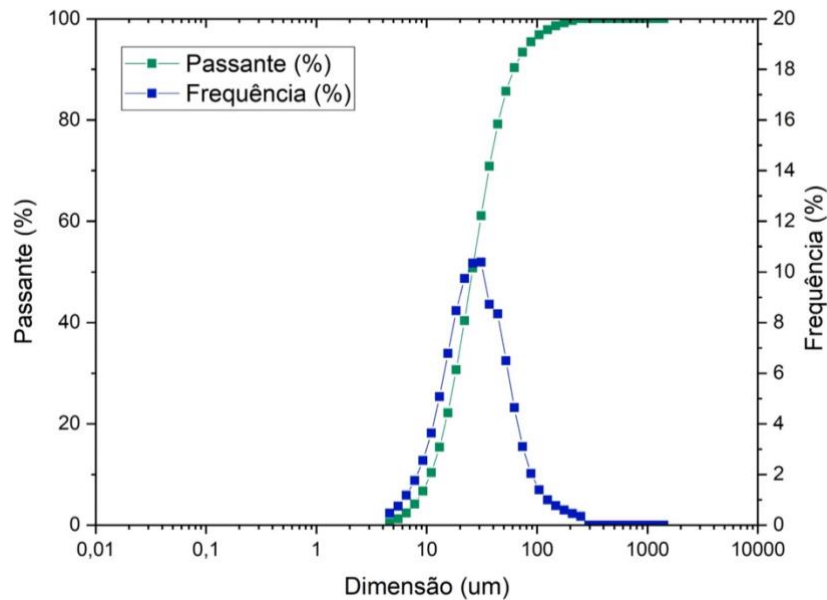
O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland II F 40 da marca Votorantim. Este cimento apresenta elevada hidratação inicial e final, além de menor demanda de água. Ainda, auxilia na resistência de aderência por apresentar um teor de fíler de 6% a 10%, melhorando a extensão de contato entre a matriz cimentícia e o substrato. É de fácil acesso, visto que é usualmente utilizado no estado do Rio Grande do Sul. Para maior controle científico, todo o cimento foi coletado de um único lote e diretamente dos silos da empresa.

O material foi caracterizado quanto à granulometria, por meio do ensaio de granulometria a laser, a fim de detectar as partículas mais finas. Para tal ensaio, foi utilizado como dispersante o álcool isopropílico. Na Figura 155, está apresentada a



curva granulométrica, na qual se obteve um D10 6,00  $\mu\text{m}$ , D50 14,33  $\mu\text{m}$  e D90 28,49  $\mu\text{m}$ .

Figura 15 – Granulometria do cimento CII-F 40



Fonte: Laboratório de Caracterização e Validação de Materiais Unisinos (LCVmat) (2022).

O material foi caracterizado quimicamente através de fluorescência de raio X (FRX), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química do cimento

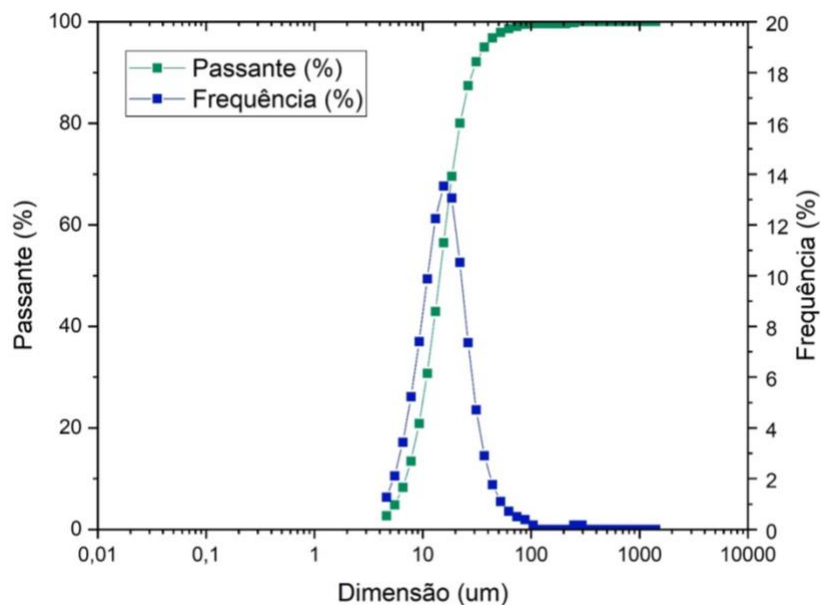
Elemento	(%)
Na <sub>2</sub> O	0,486
MgO	3,709
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,477
SiO <sub>2</sub>	13,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,124
SO <sub>3</sub>	1,723
K <sub>2</sub> O	0,761
CaO	45,531
TiO <sub>2</sub>	0,236
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,009
MnO	0,063
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,403
ZnO	0,02
SrO	0,087
L.O.I	6,272

Fonte: Laboratório de Caracterização e Validação de Materiais Unisinos (LCVmat) (2022).

### 3.2.2 Cal

A cal escolhida para esta pesquisa foi do tipo CH I por ser a mais pura encontrada no mercado. A cal foi coletada de um único lote e doada pela empresa Hidracal. Após o recebimento, foi realizada a caracterização física através de granulometria a laser com o uso de álcool isopropílico como dispersante. A Figura 16, observa-se que o material apresentou D10 10,85  $\mu\text{m}$ , D50 25,85  $\mu\text{m}$  e D90 61,41  $\mu\text{m}$ . Ao comparar os valores obtidos com a granulometria do cimento, conclui-se que a cal apresenta grãos com maiores dimensões do que o cimento.

Figura 16 – Granulometria da cal CH I



Fonte: Laboratório de Caracterização e Validação de Materiais Unisinos (LCVmat) (2022).

A caracterização química ocorreu através da análise de FRX, conforme Tabela 2, além da caracterização disponibilizada pelo fabricante, conforme apresentado na Tabela 3. A cal foi utilizada na mistura em forma de pasta, portanto, foi imersa em água para hidratação durante as 24 horas antes da moldagem.

Tabela 2 – Caracterização química da cal

Elemento	(%)
Na <sub>2</sub> O	N.D.
MgO	30,555
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,359
SiO <sub>2</sub>	0,818
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,205
SO <sub>3</sub>	0,037
K <sub>2</sub> O	0,125
CaO	41,205
TiO <sub>2</sub>	0,018
MnO	0,029
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,312
SrO	0,000
L.O.I	23,258

Fonte: Laboratório de Caracterização e Validação dos Materiais Unisinos (LCVmat) (2022).

Tabela 3 – Caracterização química e física da cal

Análises químicas	%
Perda ao fogo	21,4
Sílica + resíduo insolúvel	3,54
Óxido de cálcio (CaO)	41,54
Óxido de magnésio (MgO)	28,78
Óxidos totais (CaO+MgO)	70,32
Carbonato residual (CO <sub>3</sub> )	3,81
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	3
Soma dos óxidos na base não voláteis	95,21
Hidróxido de cálcio disponível (Ca(OH) <sub>2</sub> )	N/D
Óxidos totais não hidratados	4,13
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	N/D
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	N/D
Umidade	0
Análise física	
Retenção em peneira ABNT – 018 (1,000 mm)	N/D
Retenção em peneira ABNT – 030 (0,600 mm)	0
Retenção em peneira ABNT – 050 (0,300 mm)	N/D
Retenção em peneira ABNT – 200 (0,075 mm)	1,2

Fonte: Disponibilizada pelo fabricante (Hidracal) (2021).

### 3.2.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa foi a areia fina, de origem quartzosa. O material foi peneirado, e utilizou-se apenas o passante na peneira #2,36 mm, a fim de uniformizar a granulometria. Para a produção das argamassas, toda a areia foi seca em estufa a 100 °C; posteriormente a areia foi estocada em recipientes vedados.

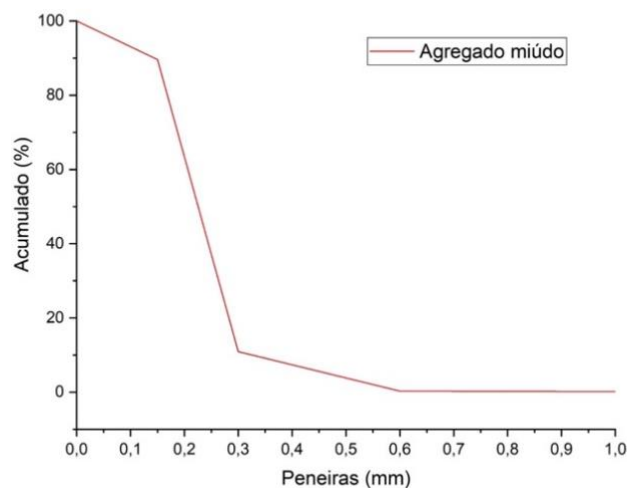
A caracterização deste material ocorreu conforme três normas: NBR 16972 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021c), a qual determina a massa unitária e o volume de vazios de agregados de construção civil; NBR 16916 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b), que determina a densidade de massa e absorção de água de agregados miúdos; e NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b), que determina a composição granulométrica dos agregados. Os resultados dos ensaios descritos estão apresentados na Tabela 4 e na Figura 17.

Tabela 4 – Resultado da caracterização do agregado miúdo

Ensaio	Resultado	Unidade
Índice de vazios	99,94	%
Massa unitária	1,52	g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	0,79	%
Densidade em condição seca	2,62	g/cm <sup>3</sup>
Densidade em condição saturada	2,64	g/cm <sup>3</sup>
Módulo de finura	1,009	-
Dimensão máxima característica	1,18	mm

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 17 – Granulometria da areia



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Ao realizar ensaios-piloto e com base em pesquisas anteriores, foi possível perceber que esta composição granulométrica atende às necessidades para esta argamassa, não ocorrendo segregação ou exsudação por excesso de materiais finos.

### 3.2.4 Água

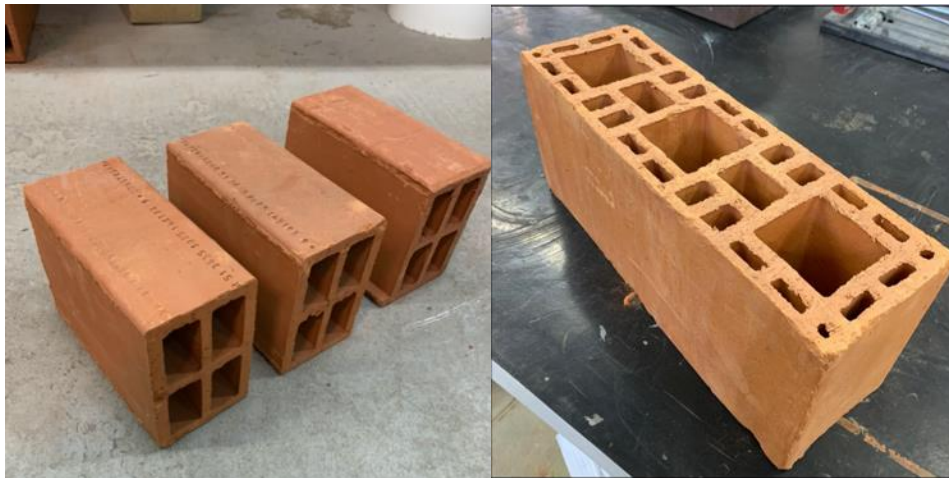
A água utilizada foi proveniente da rede pública da cidade de São Leopoldo, onde a Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) está localizada.

### 3.2.5 Substratos cerâmicos

Nesta pesquisa, foram utilizados blocos cerâmicos provenientes de duas olarias distintas predefinidos através de trabalhos anteriores do Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem (GMAT), desenvolvidos por Tonietto *et al.* (2021), Arnold *et al.* (2021) e Oliveira (2022). Ambos os blocos são estruturais e de face lisa. Os substratos utilizados na pesquisa estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Blocos cerâmicos utilizados na pesquisa

Legenda: (a) olaria 1; (b) olaria 2



(a)

(b)

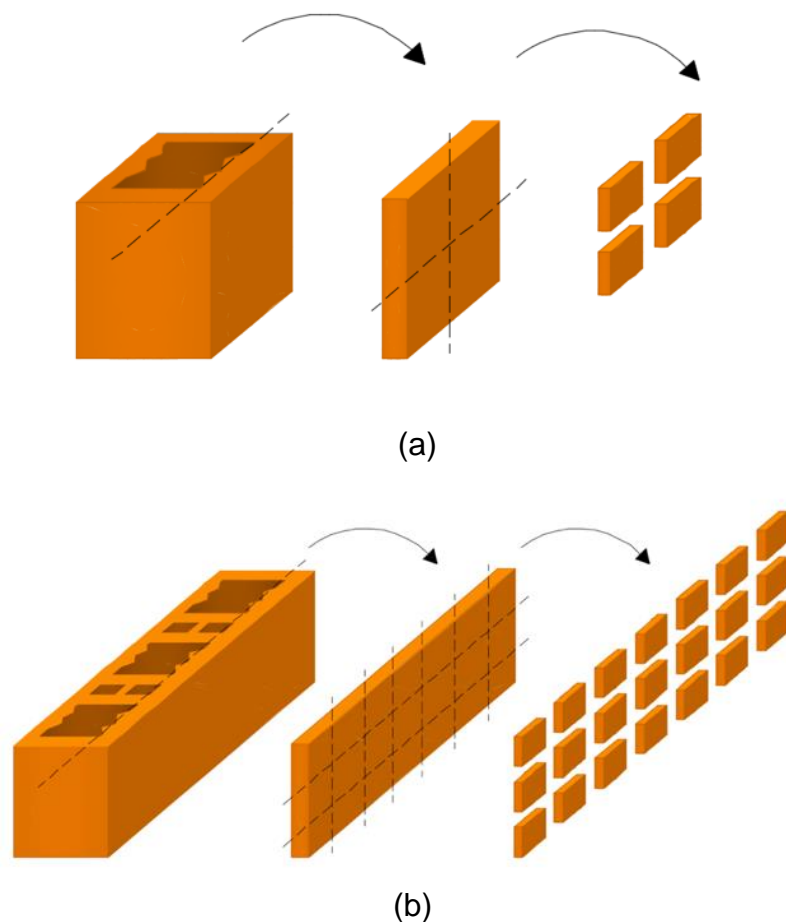
Fonte: Registrada pela autora (2023).

A caracterização dos substratos cerâmicos foi dividida em dois processos. Inicialmente foram realizados os ensaios descritos pela NBR 15270-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017a), que determina os métodos de ensaios para caracterização física (massa seca, massa úmida, índice de absorção de água, índice de absorção de água inicial, resistência à compressão e massa específica aparente), utilizando os substratos em tamanho convencional e três corpos de prova por olaria.

O intuito deste trabalho é realizar uma caracterização mais detalhada sobre as os substratos e posteriormente realizar a moldagem na mesma área caracterizada, a fim de correlacionar as propriedades medidas com a resistência de aderência. Portanto, a moldagem ocorreu em substratos com dimensões reduzidas. Logo, após o corte das faces, estas foram cortadas em dimensões de 50 x 70 mm, conforme demonstrado na Figura 19. As peças foram caracterizadas quanto à absorção de água por capilaridade e quanto à rugosidade.

Figura 19 – Esquema de corte dos blocos cerâmicos

Legenda: (a) Esquema de corte dos blocos da olaria 1; (b) esquema de corte dos blocos da olaria 2.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os substratos foram caracterizados quanto à resistência à tração superficial, conforme metodologia descrita por Menegotto (2020) e aplicada por Lunardi (2021) e Cornely (2022). Este ensaio tem como objetivo obter a resistência superficial do bloco, visto que, em ensaios de resistência de aderência que visam atingir valores prescritos

em norma de 0,30 a 0,50 MPa, para ruptura na interface, caso a resistência superficial do substrato apresente valores inferiores aos esperados pela interface entre a argamassa de revestimento e o substrato, há elevada tendência de a ruptura ocorrer no substrato, comprometendo a análise da aderência.

### 3.2.5.1 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado em cada uma das peças após o corte, totalizando 80 amostras por olaria. O ensaio ocorreu conforme metodologia descrita pela RILEM TC 116 PDC (1999). Os tempos de medição foram adaptados, uma vez que materiais cerâmicos possuem maior absorção de água nos primeiros minutos de contato com a água. Portanto, realizou-se mais leituras na primeira hora de contato. Os tempos utilizados foram baseados em trabalhos desenvolvidos por Valentini (2018) e Lunardi (2021), sendo leituras de: 1, 2, 5, 10, 30 e 60, 2, 4, 6 e 24 horas após o contato com a água. O preparo da amostra ocorreu inicialmente com a secagem em estufa a  $100 \pm 5$  °C até a estabilização de massa, que durou em torno de 48 horas, e posterior armazenagem em sala climatizada, com temperatura de  $23 \pm 2$ °C e umidade em 60%, para equilíbrio de temperatura da amostra, por período de aproximadamente 7 dias. Em seguida, foram isoladas as laterais com fita adesiva reforçada, com o intuito de a absorção de água ocorrer somente pela face desejada, e a parte superior foi isolada com balão impermeável, a fim de permitir a saída de ar durante o processo e evitar que houvesse o aumento da pressão devido à passagem de água por capilaridade. Na Figura 20, está apresentado o ensaio em andamento.

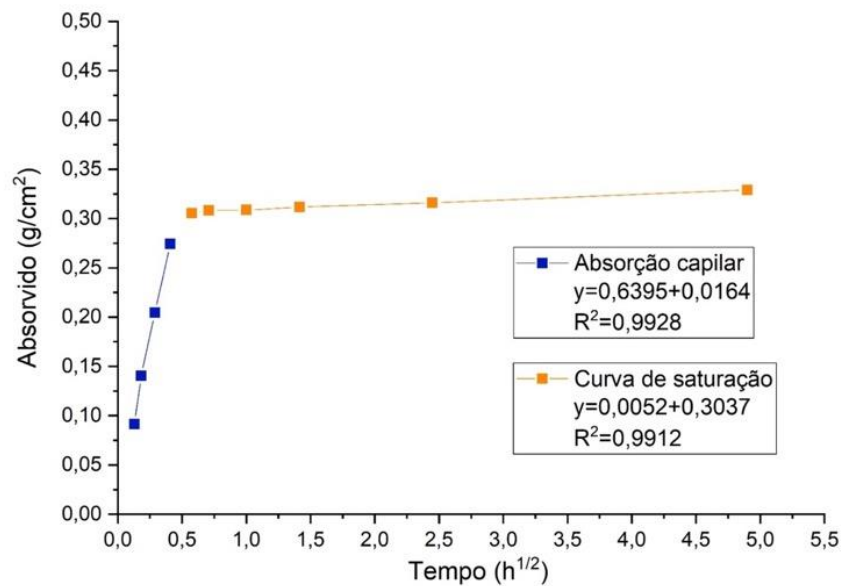
O coeficiente de capilaridade é calculado a partir da inclinação da reta de absorção capilar. O ensaio teve andamento até que se atingisse pelo menos três leituras com variação de 0,5 g, a fim de garantir que a amostra tenha saturado. Na Figura 211, está apresentado um dos gráficos obtidos para o cálculo. Posteriormente gerou-se gráficos com análises de desvio-padrão e coeficiente de variação (CV).

Figura 20 – Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Registrada pela autora (2023).

Figura 21 – Gráfico obtido no ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

### 3.2.5.2 Rugosidade

O ensaio de caracterização quanto à rugosidade foi realizado por meio dos métodos de cálculo descritos por Tonietto *et al.* (2022) e seguindo a metodologia descrita por Scalco *et al.* (2022) para a aquisição dos dados. Este método consiste em adquirir uma nuvem de pontos da superfície empregando análise de fotogrametria



digital, no qual são criados modelos 3D a partir de imagens bidimensionais. Este ensaio foi realizado em amostras provenientes de duas faces de cada olaria de estudo. O procedimento para obtenção dos parâmetros de rugosidade ocorreu em duas etapas: inicialmente a aquisição das fotos e a reconstrução da nuvem de pontos a partir das fotos (fotogrametria), em seguida a análise da nuvem de pontos em processamento no *software*.

As fotos foram obtidas por meio de uma câmera Canon modelo EOS Rebel T6i, tendo um miniestúdio com fundo, paredes e teto verde para auxiliar no contraste da amostra e uma mesa giratória com marcações angulares em 360° a fim de girar a amostra em diferentes ângulos sem a mover (uma foto a cada 15°, totalizando 24 fotos por amostra). Para ajustar a iluminação ideal para as fotografias, foram utilizadas barras de LED. Após a aquisição das fotos, ocorreu o processamento dos dados pelo *software* 3D Agisoft – Metashape, obtendo-se a nuvem de pontos esparsos e a nuvem de pontos densos, utilizadas para a geração do modelo 3D. Quanto maior a densidade da nuvem de pontos maior será a resolução e o detalhe das áreas de pico e de vale. Na Figura 22, está apresentado o ensaio em andamento.

Figura 22 – Captura de imagens para o ensaio de rugosidade



Fonte: Registrada pela autora (2023).

O coeficiente de rugosidade considera uma nuvem densa de pontos com informações de coordenadas de posição tridimensional. O *software* lê cada um dos pontos individualmente e obtêm os valores necessários para o cálculo de rugosidade média ( $R_a$ ). A  $R_a$  é a média aritmética dos valores obtidos pela soma das distâncias

entre os pontos de medição da rugosidade até a linha de ajuste do perfil (TONIETTO *et al.*, 2019).

Compreende-se que o valor de Ra não seja suficiente para caracterizar a rugosidade de um substrato, visto que é um parâmetro que determina um valor linear através de um plano de ajuste. Dessa forma, observou-se que, para correlacionar a extensão de contato da argamassa e do substrato e compreender a real área de contato que o substrato pode fornecer ao sistema, o valor de área do vale apresentaria informações mais precisas ao estudo. Tonietto *et al.* (2022) definem área de vale como um parâmetro para identificar qual superfície apresenta maior potencial de adesão, uma vez que este parâmetro pode indicar as dimensões e quantidades de grãos de cimento necessárias para preencher determinada área. A suposição abordada pelos autores é de que, se uma área apresenta maiores valores, é provável que esta superfície favoreça a melhor adesão entre a matriz cimentícia e o substrato.

### 3.3 MÉTODOS

Os métodos utilizados para realizar o programa experimental proposto e atingir os objetivos específicos estão apresentados ao longo desta seção.

#### 3.3.1 Preparo das argamassas

As argamassas foram dosadas através de ensaios-piloto a fim de averiguar a relação a/c ideal para atingir um espalhamento de  $260 \pm 10$  mm apresentado na normativa NBR 13276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016a). Este é um espalhamento o qual apresenta resultados de resistência de aderência conforme previsto em norma (LUNARDI, 2021; VALENTINI, 2018). Foram ensaiadas diferentes relações a/c, de 0,60, 0,65, 0,70, 0,8 e 0,90, a fim de obter a consistência desejada, sendo a relação a/c 0,80 a adotada para a pesquisa. Outro ponto decisivo para a escolha da argamassa para este trabalho foi a resistência de aderência. Foram testados dois traços, 1:1:4 e 1:1:6, com o objetivo de que o revestimento obtivesse uma maior probabilidade de ruptura na interface e não na argamassa. Optou-se pela utilização do traço 1:1:4.

As misturas foram realizadas em uma argamassadeira de bancada, seguindo os tempos de mistura especificados pela NBR 16541 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA

DE NORMAS TÉCNICAS, 2016b). As argamassas foram produzidas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC), localizado na Unisinos, em ambiente controlado com temperatura ambiente de  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $60 \pm 5\%$ .

### 3.3.2 Caracterização da argamassa no estado fresco

#### 3.3.2.1 Índice de consistência

O índice de consistência foi realizado com base na NBR 13276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016a), e, por meio de ensaios-piloto, foi estipulado o valor de  $260 \pm 10$  mm (Figura 233). O ensaio foi realizado subsequentemente à preparação da argamassa. Para cada ensaio, foram realizadas três repetições.

Figura 23 – Ensaio de índice de consistência



Fonte: Registrada pela autora (2023).

#### 3.3.2.2 Densidade de massa

A densidade de massa é regida pelo ensaio descrito na NBR 13278 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b). O valor é apresentado em  $\text{kg/m}^3$  (Figura 244).

Figura 24 – Ensaio de densidade de massa



Fonte: Registrada pela autora (2023).

### 3.3.2.3 Teor de ar incorporado

A determinação do teor de ar incorporado pode ocorrer através de cálculos matemáticos ou do método pressométrico. Objetivando maior precisão dos resultados, optou-se por utilizar o segundo método. Portanto, foi adaptado o ensaio de concreto fresco para a argamassa estudada, descrito na NBR 16887 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020) (Figura 255).

Figura 25 – Ensaio de teor de ar incorporado



Fonte: Registrada pela autora (2023).

### 3.3.2.4 Retenção de água

O ensaio de retenção de água consiste na determinação de massa em um recipiente predefinido antes da sucção de água e após ela, conforme descrito pela NBR 13277 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a) (Figura 266).

Figura 26 – Ensaio de retenção de água



Fonte: Registrada pela autora (2023).

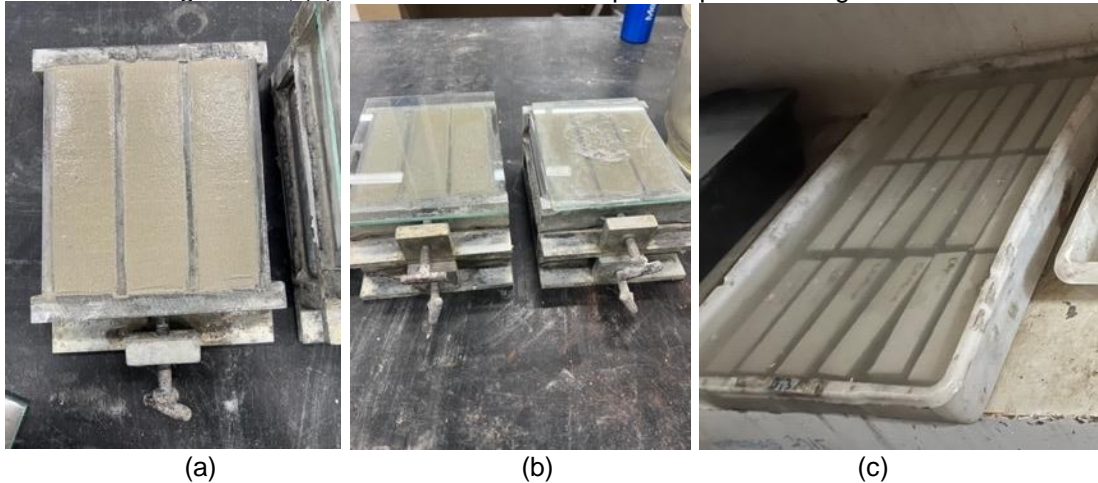
### 3.3.3 Caracterização da argamassa no estado endurecido

A argamassa, após caracterização no estado fresco, foi moldada em corpos de prova de 40 x 40 x 160 mm (Figuras 27a e 27b) para caracterização no estado endurecido. Os corpos de prova foram desmoldados após 48 horas da moldagem e submetidos à cura submersa por 28 dias e 56 dias (Figura 27c). Foram moldadas amostras para serem submetidas à carbonatação e a envelhecimento acelerado, com o intuito de compreender os efeitos desses processos na durabilidade da argamassa e posteriormente correlacionar com os efeitos gerados na argamassa quando aplicada sobre um substrato cerâmico. Para o ensaio de resistência à tração na flexão e

resistência à compressão, foi utilizada uma máquina universal de ensaios da marca MTS modelo 370.25, com célula de carga de 250kN, com precisão de 0,001.

Figura 27 – Moldagem corpos de prova de argamassa

Legenda: (a) moldagem dos corpos de prova de argamassa; (b) cura inicial dos corpos de prova de argamassa; (c) cura submersa dos corpos de prova de argamassa.



Fonte: Registrada pela autora (2023).

### 3.3.3.1 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão é determinado pela NBR 13279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c). Foram moldados corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 x 40 x 160 mm. O ensaio ocorreu em três corpos de prova (Figura 28).

Figura 28 – Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Registrada pela autora (2023).

### 3.3.3.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão é determinado pela NBR 13279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c). Posteriormente ao ensaio de resistência à tração na flexão, o qual rompeu os prismas pela metade, foram utilizadas as duas extremidades para o ensaio de resistência à compressão, sendo aplicado uma carga de compressão em uma área de 40 x 40 mm (Figura 29). Foram ensaiados em 6 corpos de prova.

Figura 29 – Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Registrada pela autora (2023).

### 3.3.3.3 Densidade de massa aparente

A determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido é descrita pela NBR 13280 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005d).

### 3.3.3.4 Absorção de água total, índice de vazios e massa específica

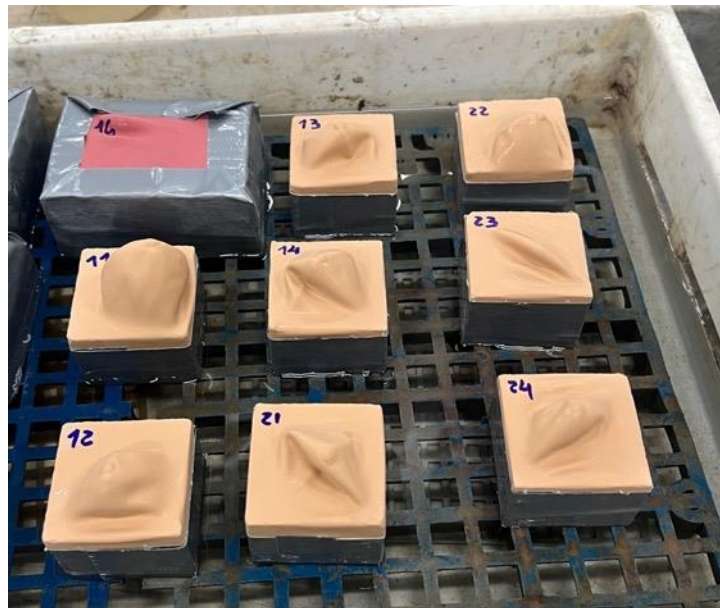
A absorção de água total, o índice de vazios e a massa específica são determinados pela NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). O ensaio foi definido pela submersão de três corpos de prova em

uma panela com água quente, aproximadamente 60 °C, a fim de que esta penetrasse nos poros da argamassa e os preenchesse.

### 3.3.3.5 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada utilizando a normativa da RILEM TC 116 PDC (1999), adaptada para argamassas. Os corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm foram cortados em amostras de 40 x 40 x 30 mm, cujas laterais foram vedadas, bem como uma das faces, a fim de direcionar a entrada de água (Figura 30). Os tempos adaptados da norma foram: 1, 2, 5, 10, 30 e 60 minutos, 2, 4, 6, 24 e 48 horas. Em seguida foi determinado o coeficiente de capilaridade conforme descrito no item de caracterização do substrato. O ensaio ocorreu em 3 amostras.

Figura 30 – Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Registrada pela autora (2023).

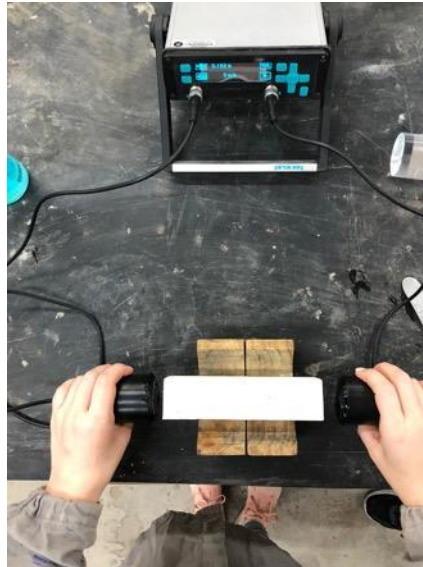
### 3.3.3.6 Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico foi realizado nos mesmos corpos de prova que posteriormente foram submetidos a ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão. Este ensaio é descrito pela NBR 15630 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a). Nele, a velocidade e o tempo de



propagação de ondas ultrassônicas de um lado ao outro do corpo de prova são medidos, sendo possível calcular o módulo de elasticidade (Figura 31). O corpo de prova é inserido no meio dos transdutores, que apresentam uma frequência de vibração de onda longitudinal de 54 kHz.

Figura 31 – Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico



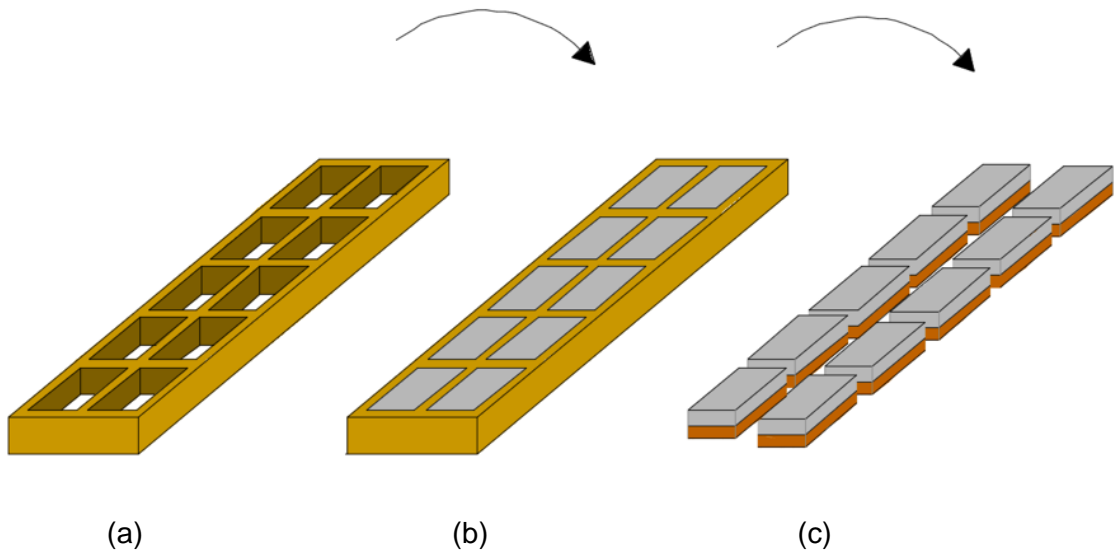
Fonte: Registrada pela autora (2023).

### 3.3.4 Aplicação das argamassas de revestimento nos substratos cerâmicos

A aplicação da argamassa de revestimento ocorreu nos blocos após o corte. Anteriormente à moldagem, os blocos foram secos em estufa até a estabilidade de massa e posteriormente armazenados em uma sala climatizada com temperatura de  $23 \pm 2$  °C e umidade de 60%, a fim de garantir que a peça cerâmica tivesse a umidade equilibrada em toda sua dimensão.

Após a mistura da argamassa, esta foi lançada ao bloco utilizando-se uma caixa de queda com altura predefinida de 1 m, a fim de simular a energia de impacto ocasionada pelo pedreiro durante o lançamento da argamassa na parede de revestimento. Outros pesquisadores como Sentena (2015) e Lunardi (2021) utilizaram esta mesma metodologia. As argamassas foram moldadas utilizando um molde de madeira, confeccionado para esta pesquisa, com dimensões internas de 60 x 80 x 20 mm. Para uma mesma moldagem, são suportadas dez peças cerâmicas, conforme apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Esquema de moldagem dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

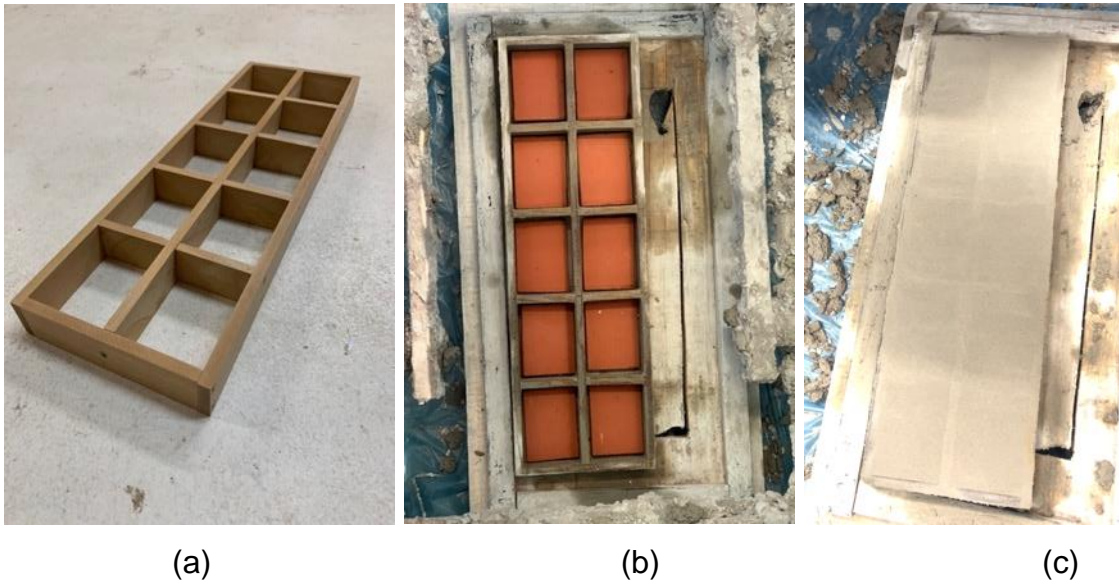
O processo consistiu primeiramente no posicionamento do molde na caixa de queda, e, em seguida, foram posicionado os substratos cerâmicos em cada área de 60 x 80 mm. A moldagem ocorreu com o lançamento da argamassa. Na sequência, foi realizado o nivelamento da amostra com o auxílio de uma régua metálica, retirando os excessos. Após 15 minutos para o substrato da olaria 1 e após 25 minutos para o substrato da olaria 2, foi realizado o desempeno, com o auxílio de uma esponja, a fim de deixar a superfície nivelada e sem fissuras iniciais. Os tempos foram estipulados através de ensaios-piloto, havendo uma variação devido à absorção capilar dos substratos. Após o desempeno, as amostras foram desmoldadas. Na Figura 33, está apresentado o processo de moldagem.

A cura dos revestimentos ocorreu até os 56 dias em câmara úmida com umidade relativa em 100% (

Figura 34). Considerando o cimento utilizado, estimou-se que até os 56 dias de cura ele atingiria quase toda sua hidratação, a fim de não comprometer os resultados dos ensaios posteriores.

Figura 33 – Processo de moldagem

Legenda: (a) molde para moldagem dos revestimentos; (b) substratos posicionados para moldagem; (c) amostras após moldagem, nivelamento e desempenho.



Fonte: Registrada pela autora (2023).

Figura 34 – Processo de cura dos revestimentos em câmara úmida



Fonte: Registrada pela autora (2023).

### 3.3.5 Processo de carbonatação

Os corpos de prova de argamassa e os revestimentos foram curados por 56 dias, e, após, foi realizado o processo de sazonalamento durante 42 dias, a fim de equilibrar a umidade interna da amostra. Segundo dados recomendados pela RILEM

TC 116 PDC (1999), a umidade interna da amostra deve ser entre 50 e 80%, visto que estes são os piores cenários para o processo de carbonatação. Foi definido 70% de umidade interna, com base no trabalho de Lunardi (2021) e por ser um valor intermediário entre os indicados pela RILEM TC 116 PDC (1999).

O sazonalamento das amostras ocorreu inicialmente com a secagem total de uma amostra de sacrifício em estufa a 100 °C, a partir do qual foi definido o percentual de água total que a amostra tem quando saturada. Em seguida, realizou-se cálculos para a estimativa de peso que cada amostra precisaria atingir para perder o percentual definido e manter uma umidade interna de 70%. Durante o processo de secagem, foi utilizada uma estufa em 60 °C para não danificar a microestrutura. Após a perda de água necessária, as amostras foram armazenadas em uma câmara com controle de umidade com recipientes contendo brometo de sódio e, para evitar a carbonatação anterior ao período previsto, foi utilizada cal sodada como material de sacrifício. O objetivo de armazenar as amostras antes de iniciar o processo de carbonatação é que a umidade interna seja homogeneizada em toda a amostra, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Processo de sazonalamento das amostras

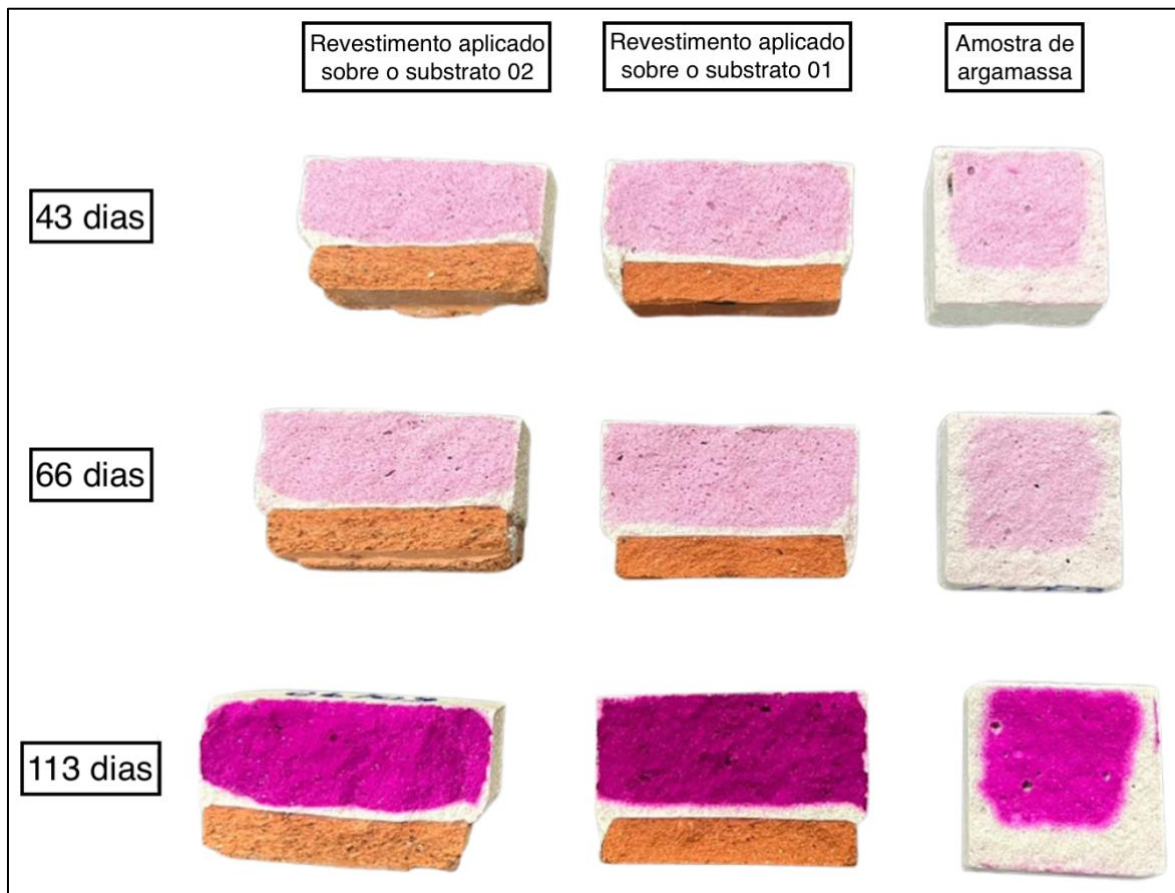


Fonte: Registrada pela autora (2023).

Posteriormente, as amostras foram colocadas na câmara de carbonatação, a qual foi controlada para manter a umidade em 70% com o auxílio de brometo de sódio e cloreto de sódio. A umidade foi monitorada continuamente por meio do uso de sensores do tipo *tinytag*. A concentração de CO<sub>2</sub> adotada para esta pesquisa foi de 3%, valor comumente utilizado na literatura (LUNARDI, 2021). A carbonatação ocorreu em um total de 147 dias, aproximadamente 5 meses.

A profundidade de carbonatação foi verificada utilizando o indicador químico fenolftaleína. Ao longo do processo, foi rompida uma amostra pela metade e aspergida fenolftaleína. A profundidade de carbonatação foi determinada para a fim de verificar se os revestimentos foram carbonatados para então dar continuidade ao programa experimental. Ao longo dos 147 dias, foi analisada a profundidade de carbonatação e, ao fim, observou-se que ela estava ocorrendo principalmente na interface e de forma lenta, conforme observado na Figura 36.

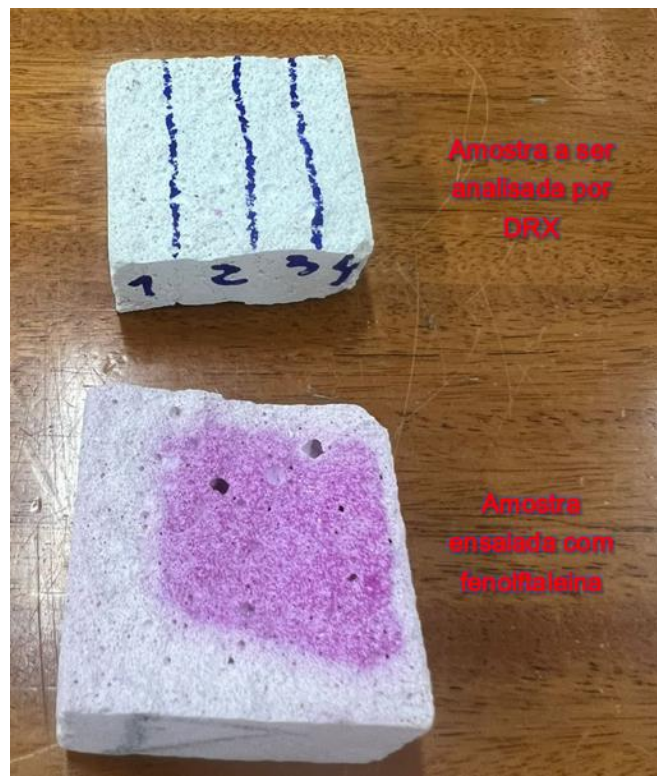
Figura 36 – Profundidade de carbonatação ao longo do tempo



Fonte: Registrada pela autora (2023).

Com o intuito de validar a profundidade de carbonatação identificada por fenolftaleína em argamassas com cal, optou-se por realizar análises de difração de raio X (DRX) em três regiões da argamassa, conforme apresentado na Figura 37. A região 1 representa uma área na qual a fenolftaleína indica a completa carbonatação; a região 2 representa uma área parcialmente carbonatada; a região 3, uma área não carbonatada; e a região 4 foi descartada. Vale ressaltar que as laterais onde já havia carbonatação foram retiradas da análise para as regiões 2 e 3. Posteriormente ao corte, as amostras foram moídas utilizando o gral de ágata e armazenadas em dessecador a fim de evitar a carbonatação até a realização do ensaio.

Figura 37 – Imagem referência para análise de DRX

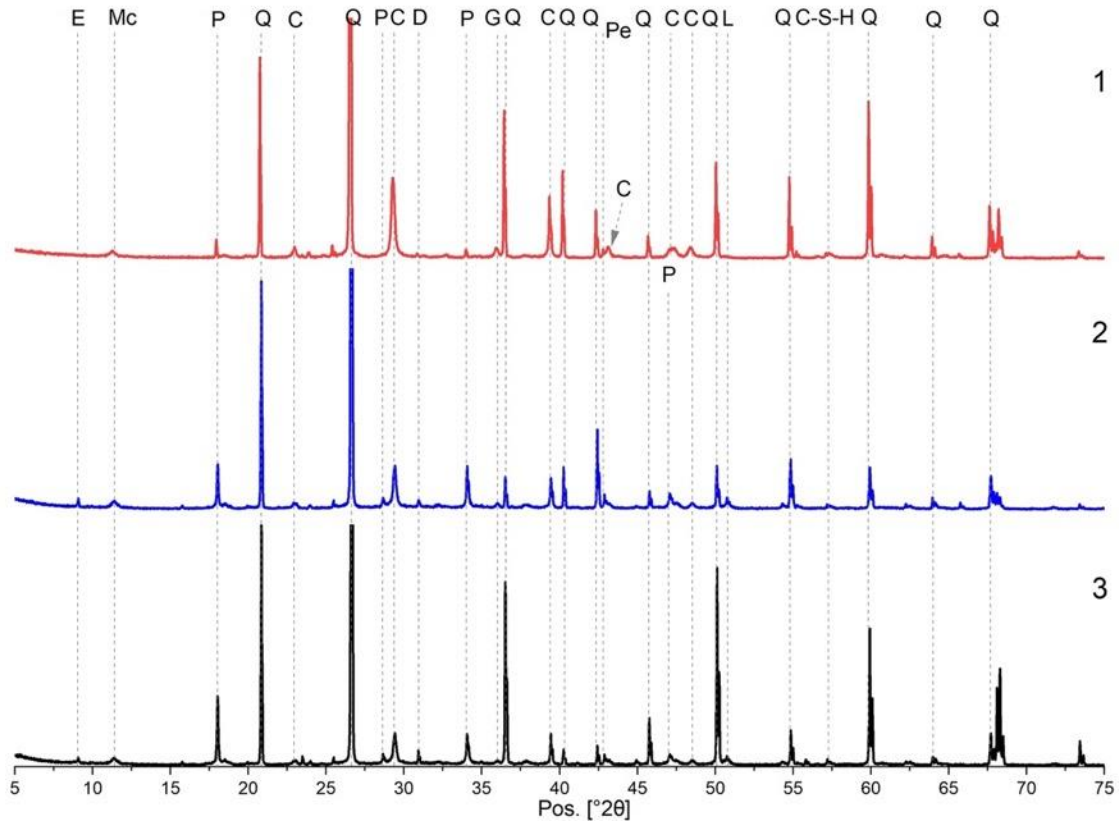


Fonte: Registrada pela autora (2023).

A Figura 38 apresenta os resultados obtidos pela análise de DRX. Nota-se a presença de muitos picos de quartzo, pois a amostra foi proveniente de uma argamassa e, após a moagem, não foi realizado peneiramento, para não influenciar nos resultados. Devido à presença de quartzo, a contagem desse pico é muito maior que nos demais minerais, portanto, para facilitar a visualização, os gráficos são apresentados com contagem no eixo y de 0-5000.

Figura 38 – Análise por DRX da argamassa de revestimento

Legenda: E – etringita; Mc – monocarbonato; P – portlandita; Q – quartzo; C – calcita; D – dolomita; G – gesso; Pe – periclásio; L – larnita; C-S-H – silicato de cálcio hidratado.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Ao analisar a Figura 38, observa-se que, na região 1, os picos de portlandita tiveram sua intensidade diminuída ou a portlandita se tornou calcita. Já na região 2, há uma redução dos picos de calcita e maior intensidade nos picos de portlandita, fato que é intensificado na região 3. Durante o processo de carbonatação, a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) reage com a água e o  $\text{CO}_2$ , originando calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) (RASHID *et al.*, 2023), portanto, o gráfico de DRX indica que, na região no qual a fenolftaleína representa que a amostra está carbonatada, há de fato maior intensidade nos picos de calcita e menor nos picos de portlandita, e este cenário se inverte à medida que se aproxima da região na qual a fenolftaleína indica que não ocorreu carbonatação. Dessa forma, é possível comprovar que a visualização da alteração do pH por meio de aspensão de fenolftaleína é um método adequado para avaliar a profundidade de carbonatação em argamassas mistas de cimento e cal e que os parâmetros de ensaio utilizados não foram suficientes para carbonatar totalmente as amostras de revestimento.

É possível observar que há picos de dolomita, periclásio e larnita. Analisando os resultados de fluorescência de raio-X (seção 3.2.2), observa-se que a cal utilizada apresenta elevada concentração de magnésio, contribuindo para que os picos de dolomita e periclásio se formassem na análise de DRX. Já a larnita é um produto de hidratação que ocorre em materiais com a presença de cal aérea ou cal hidráulica (GULBE; VITINA; SETINA, 2017). Apesar de a intensidade dos picos não ser o único fator para análise quantitativa do DRX, notou-se claramente a tendência de que picos de portlandita e dolomita (região 3) foram diminuindo à medida que carbonatavam e novos picos foram aparecendo, como os de calcita e periclásio (região 1).

### **3.3.6 Processo de envelhecimento acelerado**

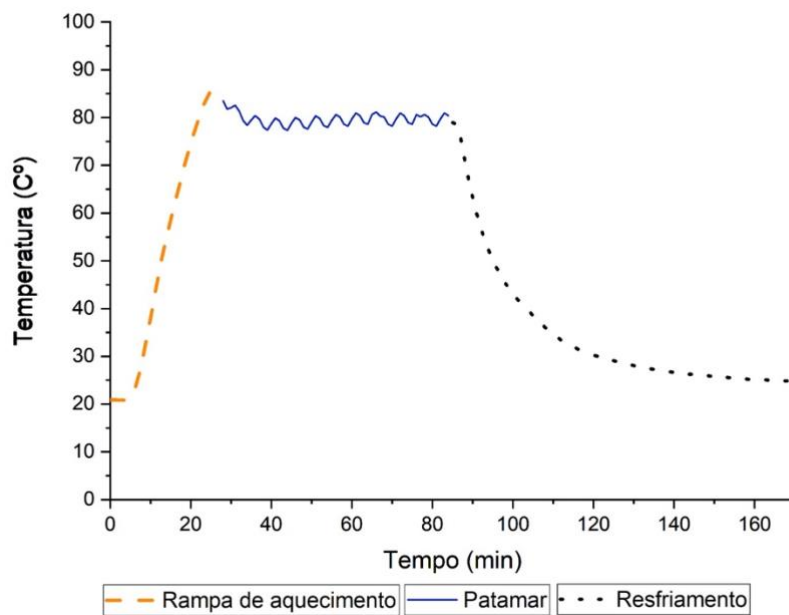
O processo de envelhecimento acelerado foi realizado por meio do uso de caixas térmicas, projetadas por Sentena (2015) e também utilizadas por Lunardi (2021). A caixa térmica utilizada possui dimensões de 50 x 40 x 140 cm. Este método de ensaio foi adaptado da NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b). Os tempos de aquecimento e resfriamento foram testados através de ensaios-piloto para o tamanho das amostras, sendo utilizada uma taxa de aquecimento de 20 °C/min, a fim de atingir uma temperatura de  $80 \pm 5$  °C. As amostras permaneceram nesta temperatura durante 1 hora e foram resfriadas bruscamente por aspersão de água, em temperatura ambiente, com o intuito de gerar um choque térmico e provocar tensões internas. A Figura 39 apresenta o gráfico de monitoramento da temperatura ao longo do ciclo térmico.

A NBR 15575-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a) estipula a realização de 10 ciclos de choque térmico, sem restrição, no entanto, a C 1185-8 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012) e a ISO 8336 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2009) estipulam 25 ciclos, e a ETAG 04 (EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL APPROVALS, 2004) define 80 ciclos. Foi adotada a mesma metodologia de trabalhos anteriores, em que foram realizados 20 ciclos (LUNARDI, 2021). Este procedimento foi realizado por 20 dias, com um ciclo de secagem e molhagem por dia. Considerando que as amostras apresentam tamanho reduzido, é possível que, com a dilatação e retração do material, à medida que se esquentam e resfriam, a variação dimensional seja uniforme, ou seja, não ocasione tensões internas e, por consequência, não ocorra



degradação do material (OLIVEIRA, FONTENELLE; MITIDIERI FILHO, 2014). Algumas normas internacionais, como a C 1185-8 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012) e a ISO 8336 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2009) estipulam dimensões mínimas a fim de simular o real efeito em uma edificação e definem o ensaio com restrição das bordas, visto que, em uma parede real, o revestimento não está livre para se retrair e expandir sem que ocorram tensões internas.

Figura 39 – Tempos de aquecimento e resfriamento definidos

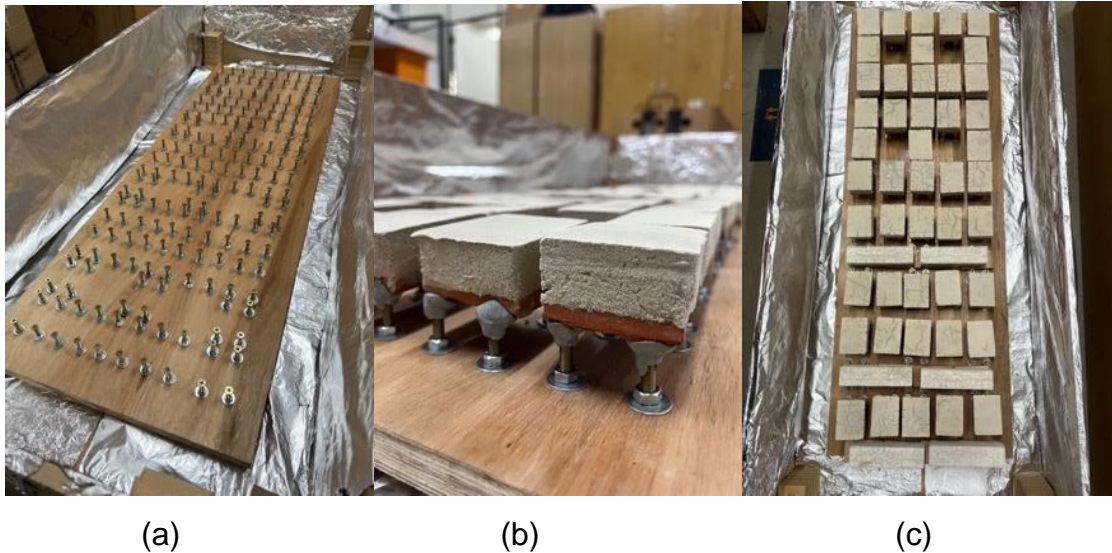


Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Dessa forma, com o intuito de gerar degradações o mais próximo do real efeito em uma edificação, foram criados vínculos para restringir a variação dimensional do substrato (vide Figura 32b), a fim de que as variações dimensionais da argamassa causassem de fato o processo de degradação. As amostras foram coladas utilizando massa epóxi. O esquema está apresentado na Figura 40. Vale ressaltar que a metodologia aplicada para restrição do substrato cerâmico foi implementada pela primeira vez, dessa forma, é necessário que, em trabalhos futuros, sejam averiguadas melhorias a fim de obter resultados mais precisos.

Figura 40 – Restrição de movimentação do substrato nas amostras de revestimento para ensaio de envelhecimento acelerado

Legenda: (a) esquema de parafusos para restrição; (b) amostra colada no suporte; (c) ensaio em andamento.



Fonte: Registrada pela autora (2023).

Esse ensaio ocorreu nas amostras de referência (REF) e nas amostras carbonatadas (CARB). Foram ensaiadas 20 amostras de revestimento aplicadas sobre o substrato 1 e 20 amostras de revestimentos aplicadas sobre o substrato 2, para cada variável. Após o ensaio, as amostras foram secas a 60 °C por 7 dias, no intuito de manter o mesmo padrão de umidade para todas as variáveis (REF, REF E, CARB e CARB E). Compreende-se que, após o envelhecimento acelerado, as amostras apresentam maior teor de umidade interna do que quando comparadas com amostras de referência e as carbonatadas que não foram submetidas à aspersão de água. Portanto, para que as quatro variáveis pudessem ter suas propriedades mecânicas comparadas posteriormente, foi essencial que todas estivessem na mesma condição no momento do ensaio de resistência de aderência.

### 3.3.7 Caracterização dos revestimentos

Os revestimentos foram caracterizados conforme os ensaios descritos a seguir, e cada variável foi avaliada.

### 3.3.7.1 Índice de vazios

O índice de vazios foi realizado conforme a NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), a fim de avaliar o efeito da carbonatação e do envelhecimento acelerado na distribuição dos poros do revestimento.

### 3.3.7.2 Absorção de água por capilaridade

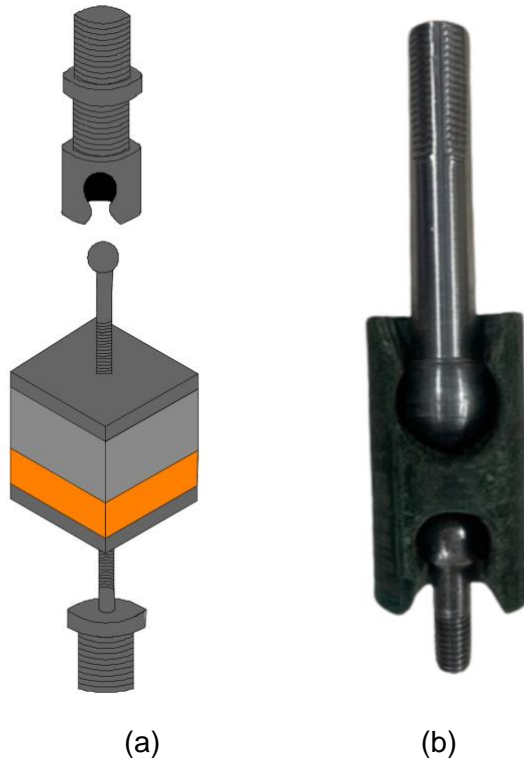
A absorção de água por capilaridade foi realizada conforme a RILEM TC 166 PDC (1999), nos tempos já descritos anteriormente na caracterização da argamassa em estado endurecido, a fim de avaliar a velocidade de penetração de água no revestimento e posteriormente associar com o índice de vazios.

### 3.3.7.3 Resistência de aderência

O ensaio de resistência de aderência foi realizado através de adaptações da NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019). O ensaio foi realizado por Botas *et al.* (2017) e Santos *et al.* (2019) e consiste no uso de uma máquina universal de ensaios. Na presente pesquisa, foi usada máquina da marca MTS, modelo 370.25, com célula de carga de 250kN e precisão de 0,001 kN. Foi utilizada uma velocidade de aplicação de carga de 0,08 mm/s. Foi necessário adaptar os dispositivos da máquina para atender às especificações da amostra, e, dessa forma, criou-se duas peças com rótulas internas que permitissem pequenos ajustes, sendo uma das faces presa à máquina e a outra presa à amostra. Na Figura 41, está apresentado o dispositivo utilizado. Na Figura 41a, está demonstrado um esquema do dispositivo projetado, e, na Figura 41b, consta uma fotografia do sistema de encaixe rotulado construído para o dispositivo. Esta metodologia visou à aplicação uniforme de carga a fim de diminuir os efeitos do operador e realizar o registro conforme metodologia CID.

Figura 41 – Dispositivo para ensaio de resistência à tração direta em máquina universal de ensaios

Legenda: (a) esquema do dispositivo para ensaio de tração; (b) dispositivo para ensaio de tração.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Anteriormente ao ensaio, as amostras foram cortadas em dimensões de 50 x 50 mm e niveladas. Considerando que todo o conjunto precisa estar nivelado para que não haja pontos de aplicação de carga maior ou força cisalhante, a colagem das pastilhas é uma etapa crítica. Utilizou-se uma base de madeira como guia, com furos alinhados e perpendiculares às amostras com a intenção de simular o posicionamento da amostra no equipamento. Inicialmente nivelou-se a mesa onde a base fosse apoiada, e, em seguida, foi nivelada a base. A colagem das pastilhas ocorreu de forma simultânea na superfície superior e inferior com o intuito de nivelar todo o conjunto. Na Figura 42, está apresentado o processo de colagem das pastilhas. Vale ressaltar que a pintura realizada para aplicação do método CID foi protegida antes da colagem para não comprometer as áreas de análise.

Figura 42 – Processo de colagem das pastilhas metálicas

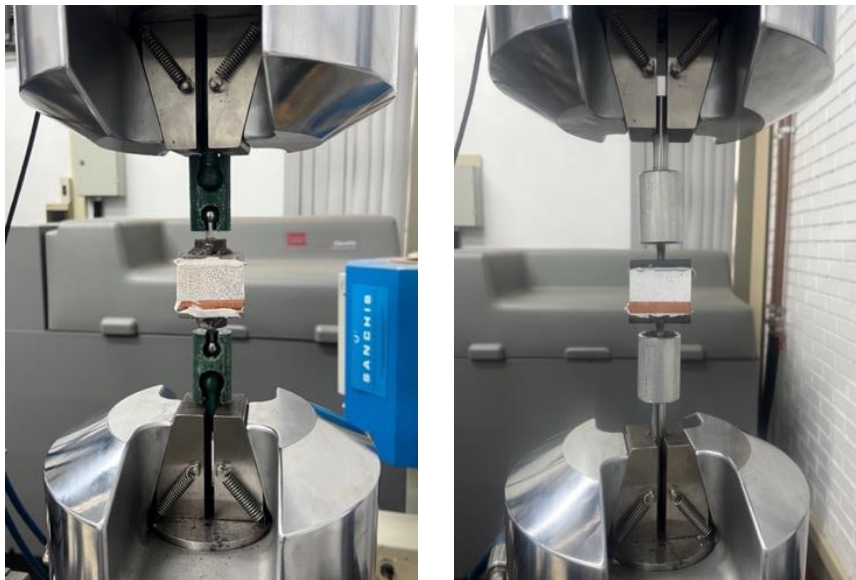


Fonte: Registrada pela autora (2023).

Na Figura 43, está apresentada a amostra no equipamento e durante um ensaio.

Figura 43 – Ensaio de tração adaptado

Legenda: (a) esquema do dispositivo para ensaio de tração; (b) ensaio de tração em andamento.



(a)

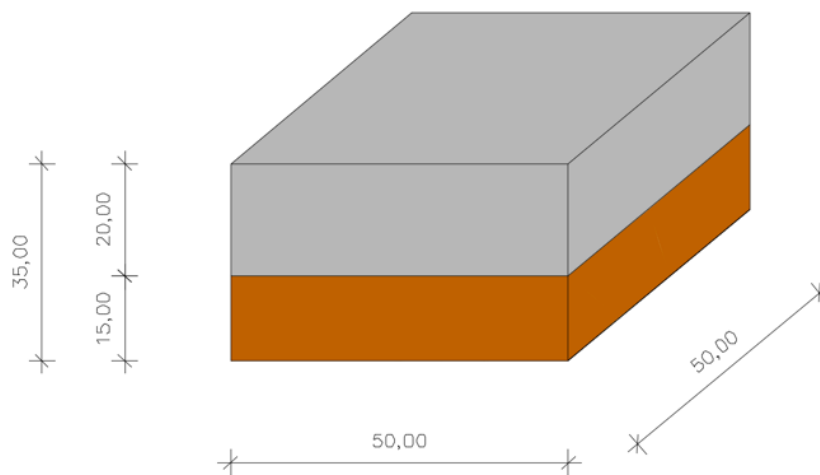
(b)

Fonte: Registrada pela autora (2023).

### 3.3.8 Módulo de elasticidade por correlação de imagem digital

A CID foi implementada neste estudo a fim de se obter o módulo de elasticidade de amostras de argamassa, para então correlacionar com o módulo de elasticidade de amostras de argamassas de revestimento sobre diferentes substratos cerâmicos. Neste estudo, as amostras às quais foi aplicado o método possuíam 20 mm de altura e 50 mm de largura, conforme Figura 44. O tipo de ensaio a ser realizado, neste caso tração direta, implica em pequenos valores de deformação, na ordem de  $\times 10^{-4}$  mm/mm.

Figura 44 – Dimensões da amostra para ensaio de resistência de aderência e aplicação do método de CID



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Cada *frame* obtido durante a filmagem dos ensaios de tração foi relacionado com as respectivas cargas aplicadas nos exemplares por meio do *software* Ncorr, que permitiu a análise das deformações e a estimativa dos módulos de elasticidade dos exemplares. Esta análise foi realizada em conjunto com outro membro da equipe de pesquisa, Benício Lacerda, que realizou um trabalho complementar ao desta dissertação<sup>1</sup>. No *software*, devem ser inseridas as seguintes informações: imagem de referência, quantidade de pontos, área de leitura e as análises a serem avaliadas. Em

<sup>1</sup> Tese de doutorado, qualificada em 05/23, intitulada “Análise das propriedades elásticas ao longo do ensaio de tração em revestimentos de argamassa submetidos à carbonatação e envelhecimento acelerado”, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Unisinos.

seguida, são inseridas todas as imagens do ensaio no *software*, e este calcula o deslocamento e a deformação específica de cada pixel analisado. O *software* Ncorr mapeia a coloração dos pixels, sabendo que cada pixel armazena determinado valor de escala de cinza, variando de 0 a 255. Ao encontrar colorações iguais, são criados os chamados subconjuntos ou janelas de correlação, os quais são correlacionados com os subconjuntos da imagem referência para medir o seu respectivo deslocamento (LECOMPTE *et al.*, 2006). Após a análise, o *software* permite inserir extensômetros virtuais, os quais indicam os valores de deslocamento naquela direção. Utilizando um *software* semelhante ao Ncorr, chamado de GOM Correlate, é possível avaliar a qualidade da malha.

A preparação das amostras consistiu inicialmente na aplicação de uma fina camada de gesso, na ordem de micrometros, que apresenta baixa resistência à tração e não compromete a medição das deformações causadas na argamassa, conforme apresentado na Figura 45. O intuito de aplicar o gesso é nivelar a superfície e garantir que o foco da câmera seja adequado e permita leituras com boa qualidade durante o ensaio, tendo em vista que a área definida de captura de imagens é na ordem de 20 mm X 25 mm e que, nesta dimensão, a rugosidade da superfície pode impedir a obtenção de um foco adequado.

Figura 45 – Aplicação de camada de gesso sobre a superfície da argamassa



Fonte: Registrada pela autora (2023).

Posteriormente o gesso foi lixado com lixas de grana 300, 500 e 600, e, com o auxílio de um microscópio ótico, observou-se a rugosidade superficial a fim de garantir maior nivelamento.

Considerando que o tamanho dos pontos ideais é significativamente pequeno, visto que deve ser compatível com o tamanho das deformações esperadas, para a pintura dos pontos foi utilizado um conjunto de agulhas, comumente utilizado na área da dermatologia para procedimento de microagulhamento. O conjunto de agulhas é composto por 36 pontas, conforme apresentado na Figura 46.

Figura 46 – Conjunto de agulhas utilizadas para pintura da malha de pontos

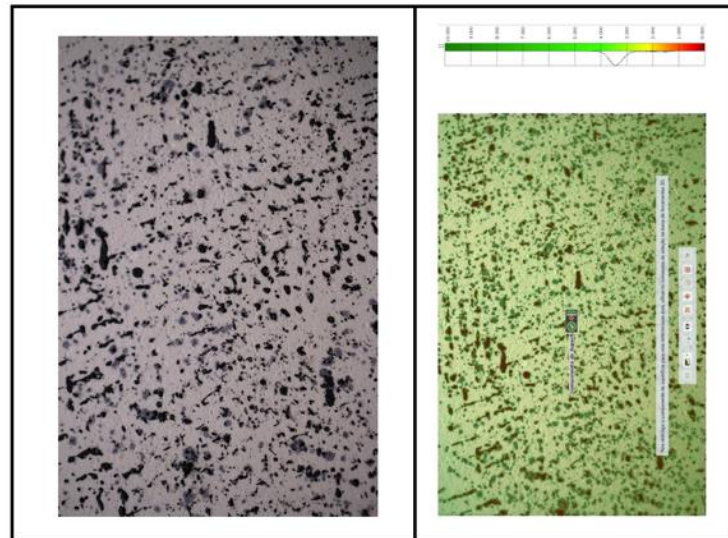


Fonte: Registrada pela autora (2023).

A pintura da malha de pontos consistiu na utilização de tinta em *spray* aplicada sobre uma superfície lisa e sem contaminações, e as agulhas foram mergulhadas em um recipiente higienizado de vidro e posteriormente submetidas a sucessivas batidas suave na superfície da argamassa. Na Figura 47, estão apresentados o resultado final e o respectivo resultado de qualidade, obtidos por meio do *software* GOM Correlate.



Figura 47 – Definição do método de pintura para aplicação do CID



Fonte: Elaborado pela autora e por Lacerda (2023).

A câmera utilizada para a captura das imagens ao longo dos ensaios foi uma Canon EF-M 28 mm F/3.5 Macro IS STM, ISO 800, f/5, velocidade 1/250, com resolução de 6.960 x 4640 pixels, e a distância focal da amostra para a câmera foi de 30 mm em uma área de amostra de 20 x 20 mm. Tendo em vista que o interesse de análise é na direção do carregamento, optou-se por adequar a maior quantidade de pixels na direção de interesse a fim de obter um erro inferior, resultando em um erro de 0,00033 mm/pixel, ou seja,  $\times 10^{-4}$  mm/pixel. Foi realizado o disparo da câmera através de *software* Camera Connect (versão 3.1.1.4.4), instalado em dispositivo móvel, para que não houvesse influência de movimentações devido ao contato com a câmera durante o ensaio. As imagens foram capturadas uma a cada 5 segundos até o momento de ruptura. Para iluminação, foram utilizadas quatro fitas de led com alta intensidade, na cor branca. Na Figura 48, está apresentado o cenário para os ensaios de resistência de aderência com aplicação do método CID.

Figura 48 – Cenário para ensaio de resistência de aderência com aplicação do método CID após reajustes



Fonte: Registrada pela autora (2023).

Na Figura 49, está apresentada a amostra após o processo de aplicação do gesso, lixamento e polimento da superfície, aplicação da pintura da malha de pontos e colagem das pastilhas metálicas.

Figura 49 – Amostra finalizada para ensaio de resistência de aderência com aplicação do método CID

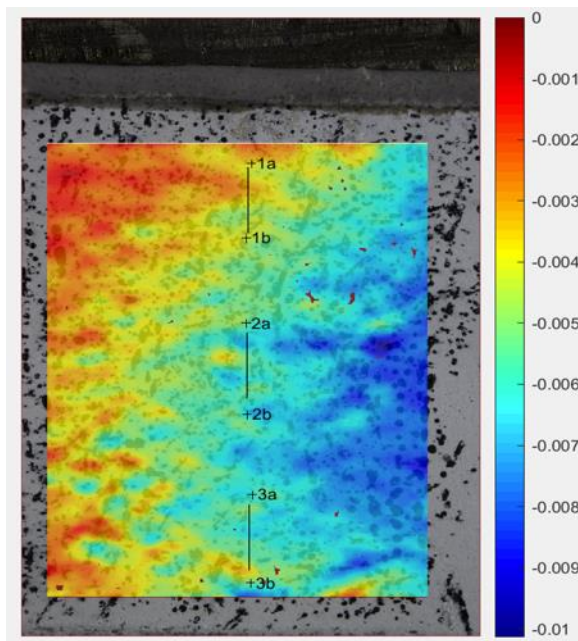


Fonte: Registrada pela autora (2023).

O ensaio consistiu inicialmente na captura de uma imagem com escala e numeração, para obter os tamanhos reais e identificar a amostra para posterior correlação. Foi utilizada a câmera na amostra, como já apresentado anteriormente, a tela do computador que monitora o ensaio foi filmada de forma simultânea, com o intuito de correlacionar a deformação da amostra com a tensão no mesmo instante.

Com o intuito de compreender o efeito da exposição das argamassas de revestimento submetidas à carbonatação e ao envelhecimento acelerado, foram inseridos três extensômetros virtuais: o primeiro, na região superior; o segundo, na região central da argamassa; e o terceiro, na região próxima à interface, conforme está apresentado na Figura 50, em que 1a e 1b representam o extensômetro superior, 2a e 2b representam o extensômetro central e 3a e 3b representam o extensômetro inferior.

Figura 50 – Posição dos extensômetros



Fonte: Elaborada pela autora e por Lacerda (2023).

A partir da correlação entre os *frames* obtidos da tela do computador e as fotos, foi possível obter a carga no momento em que a foto foi tirada e verificar as tensões aplicadas e a deformação na mesma imagem. O cálculo do módulo de elasticidade é definido pela NBR 8522 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017b), conforme Equação 1. Ainda, a obtenção dos valores de módulo de

elasticidade pode ser realizada através da plotagem do gráfico tensão versus deformação, o qual fornece a equação da reta linear.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$E$  – módulo de elasticidade (MPa);

$\sigma$  – tensão aplicada (MPa);

$\varepsilon$  – deformação específica (mm).

O método de CID foi testado e aprimorado ao longo do programa experimental. As amostras REF e REF E foram ensaiadas conforme uma metodologia inicial, a partir da qual se obteve resultados errôneos. A metodologia descrita anteriormente ocorreu de forma eficiente, portanto esta nova metodologia foi aplicada apenas nas variáveis CARB e CARB E. Os ensaios-piloto estão descritos de forma detalhada no Apêndice A.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados foi dividida em caracterização dos substratos, caracterização da argamassa em estado fresco e em estado endurecido aplicado nas quatro variáveis de estudo e no sistema de revestimento também aplicado nas quatro variáveis de estudo. Para todos os ensaios, foram excluídos os resultados que atingiram valores superiores a  $\pm 50\%$  da média.

### 4.1 SUBSTRATO

Os substratos foram caracterizados conforme a NBR 15270:2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017a), e, para o ensaio de resistência à tração superficial, foi considerada a NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), de modo que foram ensaios nas dimensões de fábrica. Na Tabela 5, estão apresentados os resultados da caracterização dos substratos das duas olarias de estudo.

Tabela 5 – Caracterização dos substratos

Blocos da olaria 1			
Ensaio	Resultado	Desvio-padrão	Unidade de medida
Absorção de água total	17,72	1,17	%
Absorção de água inicial	1,67	0,11	(g/194 <sup>2</sup> )/min
Área bruta	144,97	1,9	cm <sup>2</sup>
Área líquida	2416,67	40,01	cm <sup>2</sup>
Resistência à compressão	4,65	1,29	MPa
Resistência à tração superficial	0,23	0,03	MPa
Blocos da olaria 2			
Ensaio	Resultado	Desvio-padrão	Unidade de medida
Absorção de água total	11,37	0,99	%
Absorção de água inicial	15,32	1,41	(g/194 <sup>2</sup> )/min
Área bruta	839,43	5,68	cm <sup>2</sup>
Área líquida	2731,5	24,09	cm <sup>2</sup>
Resistência à compressão	7,1	0,6	MPa
Resistência à tração superficial	0,91	0,14	MPa

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Observa-se que para, nas amostras da olaria 1, os valores apresentados atendem à norma, com exceção da resistência à compressão. O bloco utilizado foi um bloco estrutural de classe EST80, ou seja, com resistência à compressão de 8 MPa. No entanto, conforme caracterização, a resistência efetiva atingiu metade do valor esperado. Contudo, visto que o intuito deste trabalho é avaliar a resistência à tração do sistema de revestimento, vale ressaltar que a resistência à tração superficial é um dado de extrema importância nas análises. Lunardi (2021) cita que, caso a resistência de aderência na interface entre a argamassa e o substrato seja superior à resistência à tração do substrato, a forma de ruptura será preferencialmente no substrato. Esse efeito pode prejudicar as análises, uma vez que, quando não há ruptura na interface, não é possível afirmar que foi avaliada a resistência de aderência. As amostras da olaria 1 apresentaram valores de resistência à tração superficial abaixo do estipulado pela norma de resistência de aderência.

Para as amostras da olaria 2, concluiu-se que o substrato atende aos valores descritos em normas. Diferentemente das amostras da olaria 1, este substrato apresenta resistência à tração superficial superior ao intervalo exigido em norma para resistência de aderência do sistema de revestimento (de 0,3 a 0,5 MPa), dessa forma, a forma de ruptura esperada é predominantemente na interface ou na argamassa.

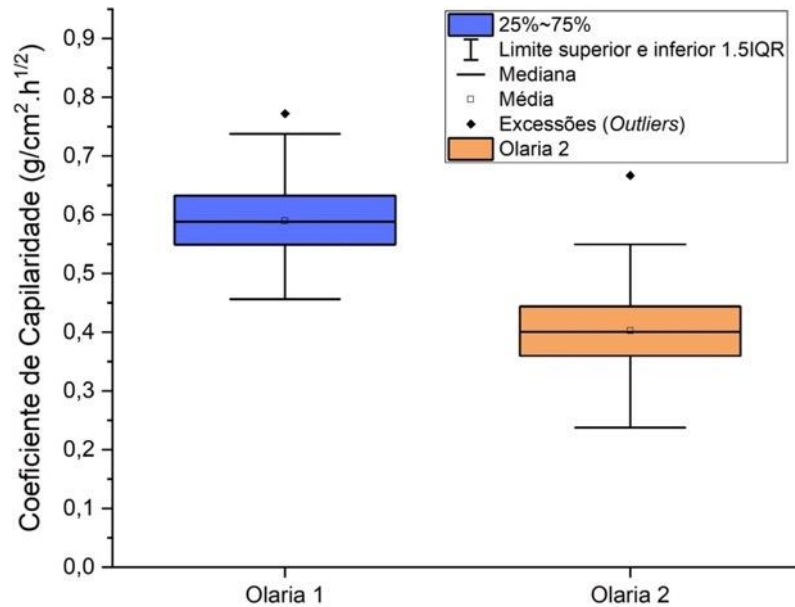
#### **4.1.1 Absorção de água por capilaridade**

Neste trabalho, foram avaliados dois substratos com capilaridades distintas, a fim de correlacionar os valores de capilaridade com as respectivas resistências de aderência. Na Figura 51, estão apresentados a média e os desvios-padrão para cada uma das olarias. Da olaria 1, foram ensaiadas 81 amostras, e, da olaria 2, foram ensaiadas 80 amostras, todas em dimensões de 70 x 50 mm.

Observa-se que a olaria 1 apresentou maiores valores de coeficiente capilar  $0,59 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ , com desvio-padrão na ordem de  $0,063 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ; já a olaria 2 apresentou valores de coeficiente de capilaridade na ordem de  $0,40 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ , com desvio-padrão de  $0,069 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ . Dessa forma, é possível concluir que as amostras da olaria 1 apresentam estrutura de poros internos mais conectados e com dimensões características que acarretam maior força capilar em comparação às amostras da olaria 2. Ambas as olarias apresentaram valores de desvio-padrão considerados

baixos, indicando que, no processo de fabricação, não houve elevada heterogeneidade na formação da estrutura de poros internos.

Figura 51 – Coeficientes de capilaridade das olarias



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Na Tabela 6, estão apresentados os valores de média, a variância e a análise estatística realizados a partir do método ANOVA – fator único com confiança de 5%.

Tabela 6 – Avaliação estatística das olarias quanto ao coeficiente de capilaridade

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Olaria 1	81	47,7328	0,589	0,0039		
Olaria 2	80	32,2074	0,4025	0,0048		
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	1,4029	1	1,4029	317,4738	9,8708E-40	3,9006
Dentro de grupos	0,7026	159	0,0044			
Total	2,1056	160				

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

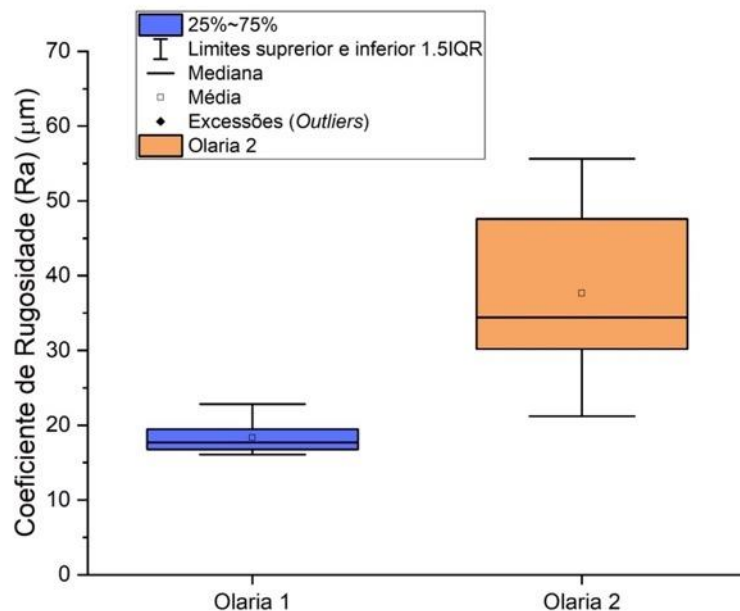
A análise estatística mostrou que as olarias apresentam coeficientes de capilaridade significativamente diferentes entre si. Os dados completos estão disponibilizados no Apêndice B.

### 4.1.2 Rugosidade

A rugosidade superficial de substrato vem sendo caracterizada com o intuito de que sejam compreendidas as influências dessa propriedade na resistência de aderência e para que, posteriormente, seja possível compatibilizá-la com a granulometria da argamassa e garantir maior extensão de contato na interface argamassa/substrato (COSTA, CARDOSO, JOHN, 2016; COSTA, 2014; STOLZ *et al.*, 2016; TORRES, VEIGA, FREITAS, 2018; ZANELATO *et al.*, 2019). Embora existam diversos estudos na literatura, ainda não há normas efetivas para a correta caracterização dessa propriedade.

Nesta pesquisa, o coeficiente de rugosidade e a área de vales foram determinados segundo Tonietto *et al.* (2019), a partir da aquisição de dados por fotogrametria digital. Na Figura 52, está apresentado o valor médio do coeficiente de rugosidade para cada olaria.

Figura 52 – Coeficiente de rugosidade das olarias



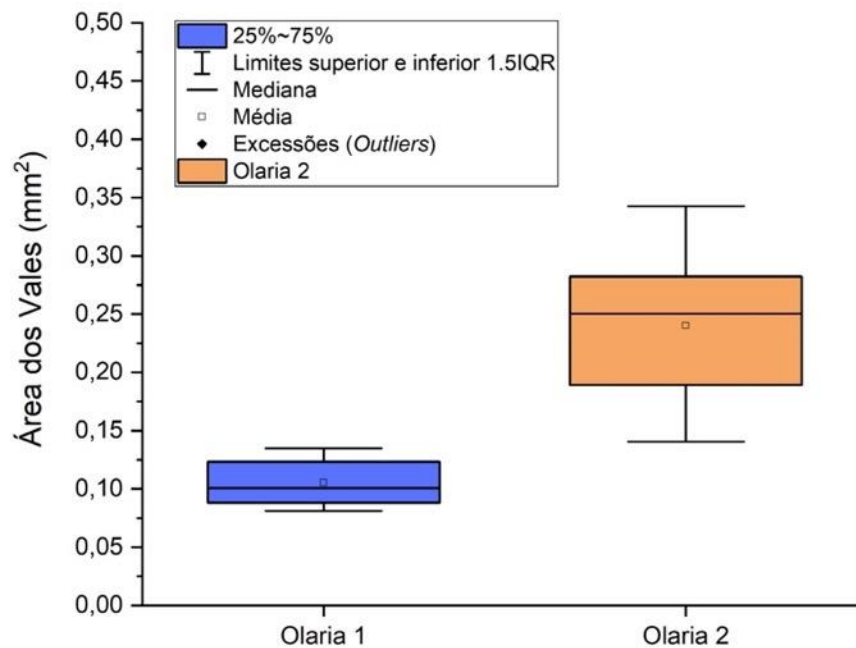
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

As amostras da olaria 1 apresentaram coeficiente de rugosidade médio de 18,34  $\mu\text{m}$  e desvio-padrão na ordem de 2,30  $\mu\text{m}$ . As amostras da olaria 2 apresentaram coeficiente de rugosidade médio de 37,66  $\mu\text{m}$  e desvio-padrão na



ordem de 11,0  $\mu\text{m}$ . Foi possível notar que o material da olaria 1 apresenta menor rugosidade e menor heterogeneidade quando comparado ao da olaria 2. A discrepância pode ser compreendida devido à diferença de composição entre as argilas e aos diferentes processos de queima adotados pelas duas olarias. Na Figura 53, estão apresentados os valores de áreas de vale.

Figura 53 – Área de vale das olarias



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Observou-se que as amostras da olaria 1 apresentaram área dos vales de 0,10  $\text{mm}^2$ , com desvio-padrão de 0,02  $\text{mm}^2$ ; já as da olaria 2 apresentaram área de vale de 0,24  $\text{mm}^2$ , com desvio-padrão de 0,06  $\text{mm}^2$ . É possível concluir que o coeficiente de rugosidade e a área de vales são proporcionais, ou seja, um menor coeficiente de rugosidade resultou em áreas de vales também menores. O coeficiente de rugosidade superior resultou em área de vales também superior.

Nas Tabelas 7 e 8, estão apresentados os valores de média, a variância e a análise estatística realizados a partir do método ANOVA – fator único com confiança de 5%. Através da análise estatística tanto para coeficiente de rugosidade quanto para áreas dos vales, as olarias apresentam valores significativamente diferentes entre si, indicando que seus blocos possuem propriedades de rugosidade diferentes. Os dados completos de rugosidade para cada amostra estão disponibilizados no Apêndice C.

Tabela 7 – Avaliação estatística do coeficiente de rugosidade

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Olaria 1	8	146,7451	18,3431	5,3459		
Olaria 2	16	602,5868	37,6616	121,5715		
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	1990,4314	1	1990,4314	23,5301	7,566E-05	4,3009
Dentro de grupos	1860,9947	22	84,5906			
Total	3851,4261	23				

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

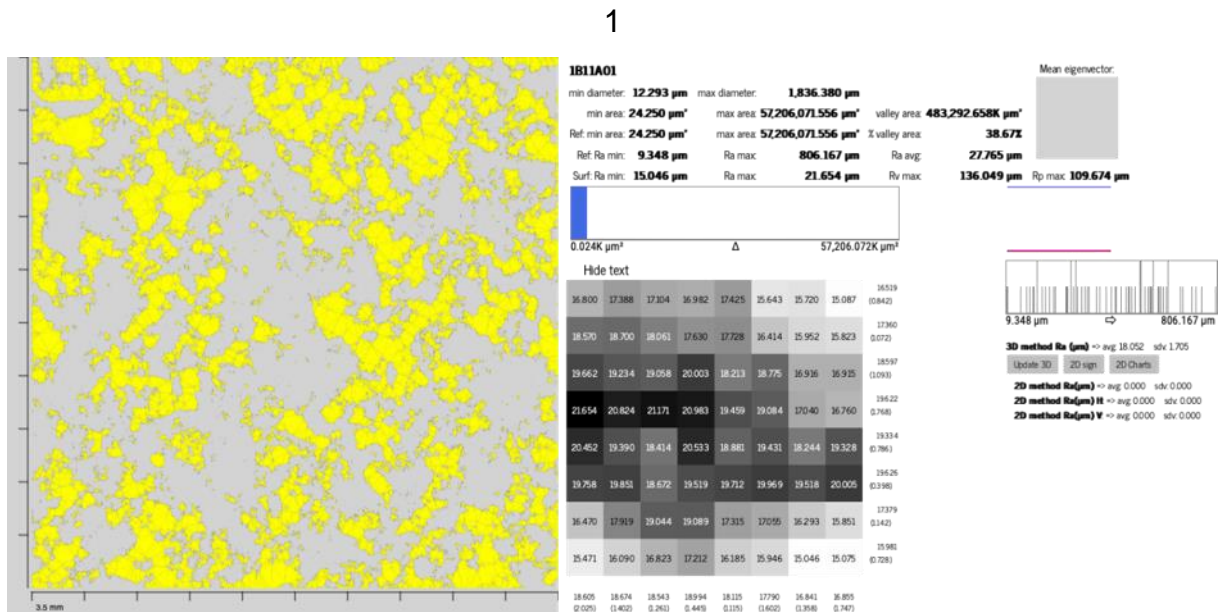
Tabela 8 – Avaliação estatística da área dos vales

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância		
Olaria 1	8	0,8407	0,1050	0,0004		
Olaria 2	16	3,8407	0,2400	0,00387		
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	0,0971	1	0,0971	35,5292	5,342E-06	4,3009
Dentro de grupos	0,0601	22	0,0027			
Total	0,1572	23				

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

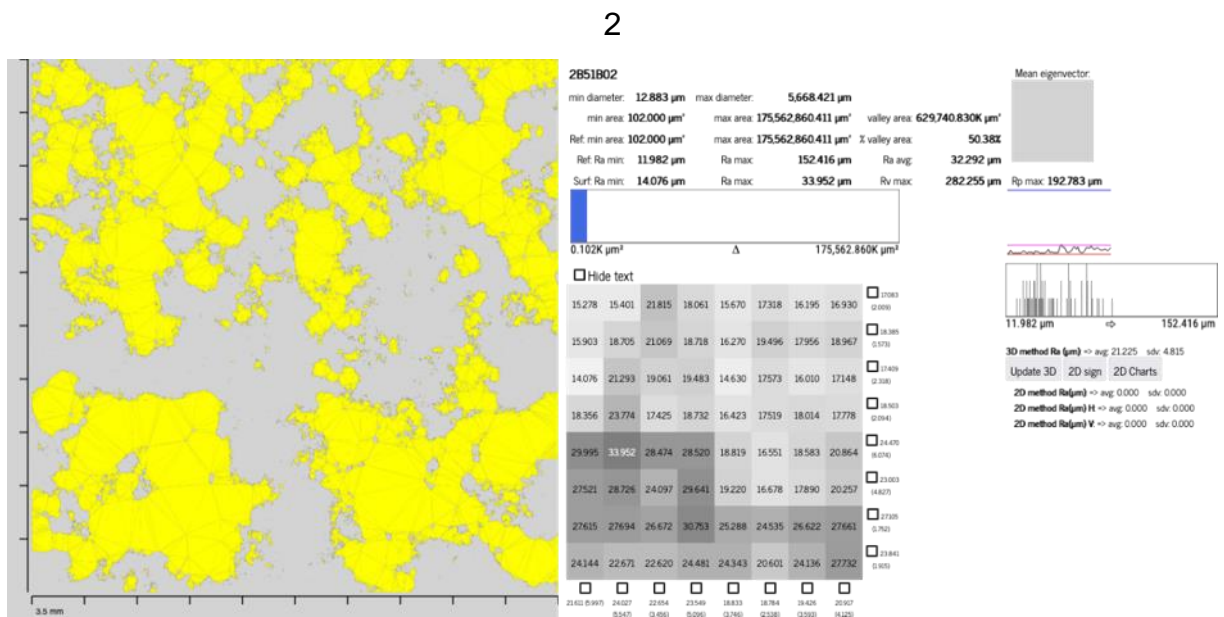
A partir do método de análise de rugosidade utilizado nesta pesquisa, é possível chegar a uma nuvem de pontos a qual permite o mapeamento da superfície para obter assinaturas de rugosidade e a área dos vales (ARNOLD *et al.*, 2021; TONIETTO *et al.*, 2022). Nas Figuras 54 e 55, estão apresentados os resultados de uma das amostras para cada substrato, o restante encontra-se no Apêndice D.

Figura 54 – Assinatura de rugosidade e área de vales de uma amostra do substrato



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 55 – Assinatura de rugosidade e área de vales de uma amostra do substrato



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

O substrato 1 apresentou área de vales menores e em maior quantidade, enquanto o substrato 2 apresentou área de vales com maior extensão.

## 4.2 ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

As argamassas foram caracterizadas no estado fresco e endurecido, sendo, neste último, expostas a quatro situações distintas, totalizando quatro variáveis: referência, referência com envelhecimento acelerado, carbonatado e carbonatado com envelhecimento acelerado.

### 4.2.1 Caracterização da argamassa em estado fresco

Na Tabela 9, estão apresentados os resultados da caracterização da argamassa utilizada para este estudo, uma argamassa com relação a/agl 0,8, traço unitário 1:1:4.

Tabela 9 – Caracterização da argamassa no estado fresco

Ensaio	Resultado	Desvio-padrão	Unidade de medida
Índice de consistência	256,00	1,53	mm
Densidade de massa	2012,59	10,48	g/cm <sup>3</sup>
Teor de ar incorporado	9,00	0,15	%
Retenção de água	97,32	0,6	%

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que a argamassa utilizada apresenta trabalhabilidade adequada para realizar a moldagem de forma efetiva, conforme visto em trabalhos realizados anteriormente (LUNARDI, 2021; VALENTINI, 2018). O uso da cal altera algumas características do material quando comparado com argamassas cujo ligante é exclusivamente o cimento, porém, quanto às propriedades de densidade de massa e retenção de água, além de atenderem às normas prescritas, estão de acordo com a literatura (STOLZ *et al.*, 2016). O teor de ar incorporado obtido é elevado, embora existam estudos que obtiveram valores superiores ao encontrado, comprovando que é um efeito relativo quando se utiliza a argamassa para revestimentos (COSTA *et al.*, 2020), pois a quantidade de vazios auxilia na redução do módulo de elasticidade, garantindo maior suporte de cargas e movimentações sem que o material fissure.

#### 4.2.2 Caracterização da argamassa em estado endurecido

As argamassas no estado endurecido foram ensaiadas nas quatro variáveis de estudo: referência, referência com envelhecimento acelerado, carbonatado e carbonatado com envelhecimento acelerado. Na

Tabela 10, está apresentado um resumo dos resultados das argamassas. Foi realizada análise estatística em todos os ensaios para avaliar se existiu diferença significativa entre os valores, utilizando o método ANOVA com significância de 5%. Os dados completos para cada amostra e cada variável estão disponibilizados no Apêndice E.

Tabela 10 – Caracterização da argamassa no estado endurecido

Ensaio	Referência	Referência com envelhecimento acelerado	Carbonatado	Carbonatado com envelhecimento acelerado	Unidade de medida
Absorção de água total	16,97 (0,15)	16,58 (0,32)	14,84 (0,28)	14,91 (0,17)	%
Índice de vazios	29,49 (0,24)	29,6 (0,45)	26,91 (0,39)	28,98 (0,25)	%
Coefficiente de capilaridade	0,51 (0,08)	0,72 (0,13)	0,94 (0,07)	0,99 (0,11)	g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup>
Módulo de Elasticidade	10,17 (0,42)	11,46 (0,41)	10,91 (0,29)	10,63 (0,19)	GPa
Densidade de Massa	1711,81 (11,75)	1767,75 (10,93)	1780,89 (2,95)	1796,31 (8,44)	kg/cm <sup>3</sup>
Resistência à tração na flexão	2,89 (0,11)	2,61 (0,38)	2,99 (0,53)	2,42 (0,15)	MPa
Resistência à compressão	5,65 (1,01)	9,54 (1,42)	6,54 (0,49)	6,8 (0,71)	MPa

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

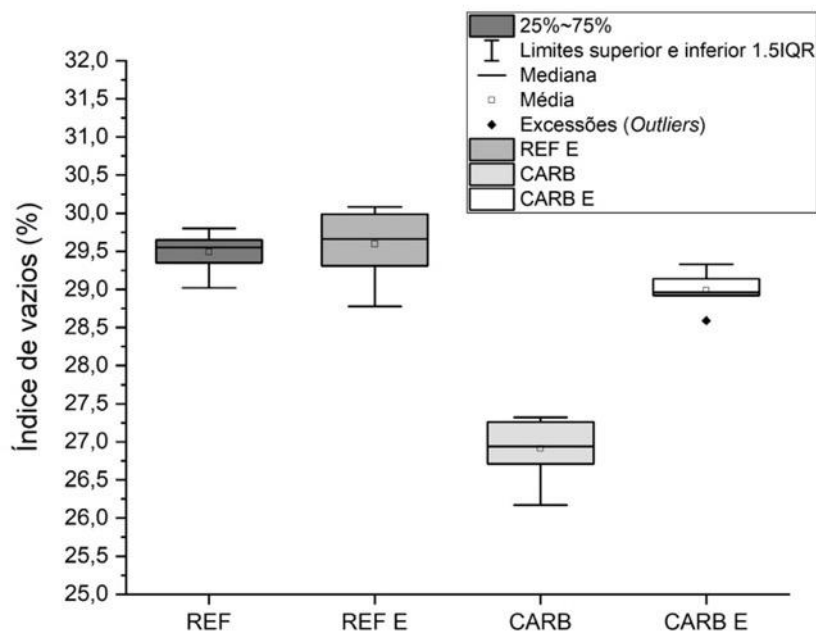
Os resultados que apresentaram maiores diferenças estatísticas foram absorção de água, índice de vazios, coeficiente de capilaridade e resistência à compressão. Os demais resultados apresentaram valores semelhantes entre as variáveis, o que não condiz com a literatura. Nas seções a seguir, são apresentados os resultados e uma análise mais detalhada.

#### 4.2.2.1 Absorção de água

A absorção de água de uma argamassa é de extrema importância quando o tema é durabilidade. A capacidade e a velocidade do fluxo de água têm influência direta na vida útil do material e são os principais agentes degradantes dos revestimentos de argamassa (FREITAS, CARASEK, CASCUDO, 2014; JIANG *et al.*, 2017; SENTENA, KAZMIERCZAK, KREIN, 2018). A argamassa desse estudo foi caracterizada quanto à absorção total, ao índice de vazios e à absorção de água por capilaridade. Os resultados de absorção de água total apresentaram valores semelhantes entre si, mas, avaliando-se estatisticamente através do método ANOVA com confiança de 5%, somente as argamassas carbonatadas (CARB) e argamassas carbonatadas com envelhecimento acelerado (CARB E) não apresentaram diferenças significativas entre si. É possível observar que a maior diferença ocorreu entre as argamassas de referência (REF e REF E) comparadas com as argamassas carbonatadas (CARB e CARB E), sendo possível concluir que, após a carbonatação, houve redução da absorção de água total.

Na Figura 56, estão apresentados os resultados de índice de vazios para as quatro variáveis.

Figura 56 – Índice de vazios das argamassas nas quatro variáveis



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

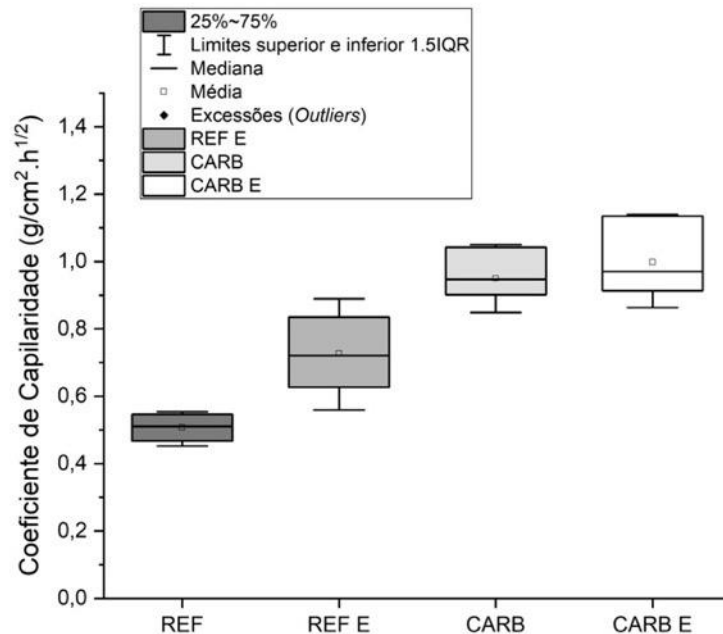
O índice de vazios indica a porcentagem de vazios que a amostra apresenta. Na Figura 56, observa-se que a argamassa de referência (REF) apresentou índice de vazios de 29,49% e a argamassa de referência com envelhecimento acelerado (REF E) apresentou índice de vazios de 29,60%, indicando que não houve diferença significativa entre eles. Visto que, nas amostras de argamassa moldadas nas dimensões de 40 x 40 x 160 mm, não foram realizadas o processo de restrição, é possível que as variações dimensionais de expansão e retração tenham ocorrido de forma homogênea ao longo da amostra, sem causar danos significativos na estrutura dos poros e sem causar propagação das fissuras superficiais que ocorreriam. Já para as argamassas carbonatadas (CARB), houve uma redução significativa do índice de vazios, resultando valores de 26,91%, considerando que, durante o processo de carbonatação, houve a redução da porosidade devido à formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (MORANDEAU, THIÉRY, DANGLA, 2015; NGALA, PAGE, 1997; THIÉRY, 2005; TRACZ, ZDEB, 2019) e ao endurecimento da cal (OLIVEIRA *et al.*, 2017) a porcentagem de vazios na amostra foi reduzida. No entanto, para a argamassa com envelhecimento acelerado (CARB E), houve um crescimento de índice de vazios, com resultado de 28,98%, em comparação à argamassa CARB. Esse efeito pode ser explicado através do efeito do envelhecimento acelerado e devido ao fato de a argamassa estar mais rígida após o processo de carbonatação. A propagação de pequenas fissuras resultou em um aumento do índice de vazios, mas ainda com valores inferiores aos encontrados nas argamassas REF e REF E.

Embora o índice de vazios e a absorção de água total sejam valores importantes na caracterização de argamassas, não é possível utilizá-los para estimar a velocidade de sucção de água dessa argamassa. Dessa forma, a absorção de água por capilaridade apresenta valores mais precisos a respeito da conectividade entre os poros. Na Figura 57, estão apresentados os resultados das argamassas quanto à absorção por capilaridade.

Na Figura 57, fica nítido que o comportamento da capilaridade não seguiu o mesmo observado nos resultados de índice de vazios, permitindo concluir que não são parâmetros proporcionais. As argamassas REF apresentaram coeficiente de capilaridade de  $0,51 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ , já as argamassas REF E apresentaram coeficiente de capilaridade de  $0,72 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ . A hipótese referente ao aumento na capilaridade após o envelhecimento acelerado é de que houve o endurecimento da cal e alguns

macroporos foram preenchidos e resultaram em mesoporos e nanoporos, ambos com maior força capilar.

Figura 57 – Coeficiente de capilaridade das argamassas nas quatro variáveis



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Dessa forma, o índice de vazios permaneceu semelhante ao das argamassas REF, mas houve maior impacto na capilaridade. As argamassas CARB apresentaram coeficiente de capilaridade de  $0,94 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ , e as argamassas CARB E apresentaram coeficiente de capilaridade de  $0,99 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ . Não houve diferença significativa entre elas, no entanto, ambas apresentaram valores superiores aos das argamassas REF e REF E. A hipótese apresentada anteriormente é possível de ser aplicada neste caso, visto que a hidratação das amostras aconteceu de forma submersa, portanto, a cal que precisa de  $\text{CO}_2$  para carbonatar somente reagiu após o período de cura (provavelmente refinando macroporos e transformando-os em mesoporos, com maior atividade capilar), e forma mais intensa durante a carbonatação, pois foi exposta ao  $\text{CO}_2$ . Desse modo, a hipótese é que houve maior precipitação de  $\text{CaCO}_3$  preenchendo os macroporos e aumentando a força capilar. Devido à cal ter sido hidratada durante a carbonatação e o processo de envelhecimento não ter restrição, a diferença entre o CARB e CARB E não foi significativa.



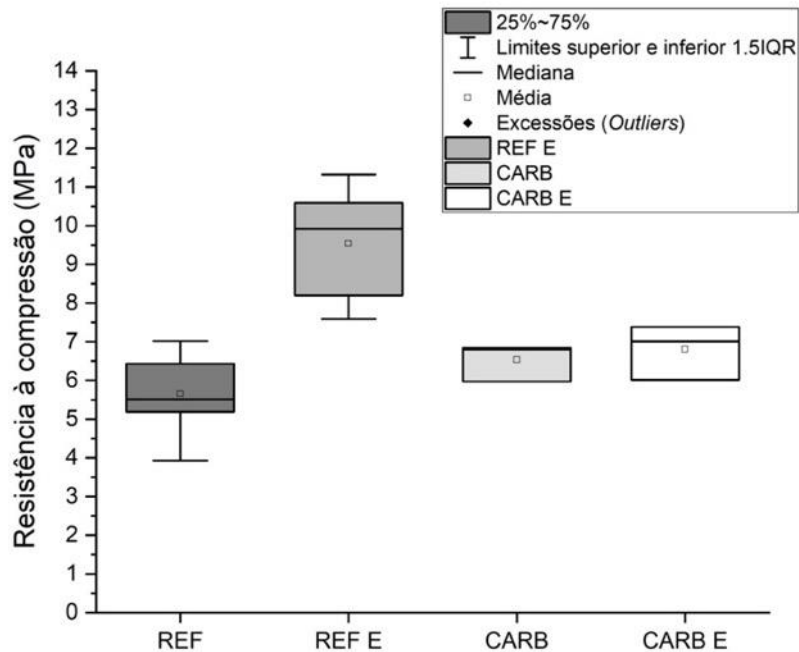
#### 4.2.2.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas de argamassas são parâmetros utilizados pelas normas para caracterizar o material, embora não sejam parâmetros proporcionais aos encontrados para argamassas de revestimento. O módulo de elasticidade encontrado para as argamassas REF foi de 10,17 GPa e, para argamassas REF E, foi de 11,46 GPa, diferença que pode estar atrelada ao endurecimento da cal, o qual aumenta a rigidez do material. Ambos os valores são encontrados na literatura (CORNELLY, 2022; POLITO, 2008). No entanto, os valores de módulo de elasticidade para as argamassas CARB e CARB E, que foram 10,91 e 10,63 GPa, respectivamente, não mostraram diferenças significativas entre si. Observando as pequenas diferenças entre os valores de módulo de elasticidade, não é possível afirmar se a exposição à carbonatação e ao envelhecimento podem alterar de forma significativa o módulo de elasticidade.

Os resultados referentes à densidade de massa das argamassas foram significativamente diferentes entre si. Ao observar os valores apresentados na Tabela 10, é possível perceber que a argamassa REF foi a que apresentou menor densidade de massa e a argamassa CARB E, a que apresentou maior densidade de massa. Isso indica que o processo de carbonatação seguido de envelhecimento auxiliou no endurecimento da cal (através da carbonatação), visto que o carbonato de cálcio apresenta volume e peso superiores ao hidróxido de cálcio (ISHIDA; MAEKAWA, 2000). Esse efeito foi ainda maior nas amostras carbonatadas. Já para os valores de resistência à tração na flexão, não houve diferenças significativas entre as variáveis. Os resultados da resistência à compressão das argamassas estão apresentados na Figura 58.

Observa-se, na Figura 58, que a argamassa REF apresentou uma resistência à compressão média de 5,65 Mpa, o que se encontra dentro dos parâmetros descritos na literatura para argamassas mistas e com teor de ar incorporado mais elevado (STOLZ *et al.*, 2016), e a argamassa REF E apresentou uma resistência à compressão de 9,54 MPa. A hipótese é que, devido ao fato de a argamassa ter tido uma cura de 56 dias submersa, a cal não carbonatou durante esse período.

Figura 58 – Resistência à compressão das argamassas nas quatro variáveis



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Porém, após o sazonalamento, mantendo a amostra em 70% de umidade inteira e submetida ao ensaio de envelhecimento acelerado, o qual tem acesso ao CO<sub>2</sub> e à água, a cal reagiu com estes compostos e endureceu, reduzindo a porosidade e, por consequência, elevando a resistência à compressão. Novamente cabe ressaltar que os danos previstos de serem ocasionados no processo de envelhecimento não foram efetivos em função de a amostra não ter sido restrita, ocorrendo a expansão e retração de forma livre e uniforme, de modo que as fissuras ocorreram de forma superficial, não alterando as propriedades mecânicas.

Já as argamassas CARB e CARB E apresentaram resistências à compressão média de 6,54 e 6,80 MPa respectivamente. Quando comparadas, não houve diferença significativa, reforçando a percepção de que o processo de envelhecimento não gerou danos significativos. No entanto, vale ressaltar que, entre a argamassa REF e a argamassa CARB, também não foram observados resultados significativamente distintos, o que não condiz com os resultados encontrados na literatura, os quais indicam que, após a carbonatação, há um aumento da resistência à compressão (CINCOTTO *et al.*, 2010; FERRETTI, BAŽANT, 2006; LAWRENCE, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

### 4.3 SISTEMA DE REVESTIMENTO

Nesta seção, serão abordados os resultados referentes às amostras de argamassas moldadas sobre dois tipos de substratos cerâmicos em corpos de prova de 50 x 70 mm e 50 x 50 mm, sendo avaliadas as amostras carbonatadas e não carbonatadas e com e sem envelhecimento acelerado. Serão apresentados, primeiramente os resultados referentes às amostras aplicadas sobre o substrato da olaria 1; em seguida, os resultados referentes às amostras aplicadas sobre o substrato da olaria 2 e, por fim, a comparação entre eles, para os três grupos de ensaios analisados. Os dados completos para cada amostra e cada variável estão disponibilizados no Apêndice F.

#### 4.3.1 Absorção de água

Considerando que as amostras de argamassas moldadas em suportes metálicos e aplicadas sobre substratos cerâmicos apresentam absorção de água distintas, os revestimentos foram caracterizados quanto à absorção de água total, ao índice de vazios e à absorção de água por capilaridade. Na Tabela 11, estão apresentados os valores de absorção de água total para as argamassas aplicadas no substrato 1 e no substrato 2 das quatro variáveis de estudo.

Tabela 11 – Resultado de absorção de água total para os revestimentos

Substrato	Variável	Absorção de água total (%)	Desvio-padrão (%)
1	REF	13,429	0,197
	REF E	14,633	0,195
	CARB	13,554	0,059
	CARB E	13,877	0,136
2	REF	12,660	0,326
	REF E	13,431	0,402
	CARB	12,976	4,596
	CARB E	12,525	0,334

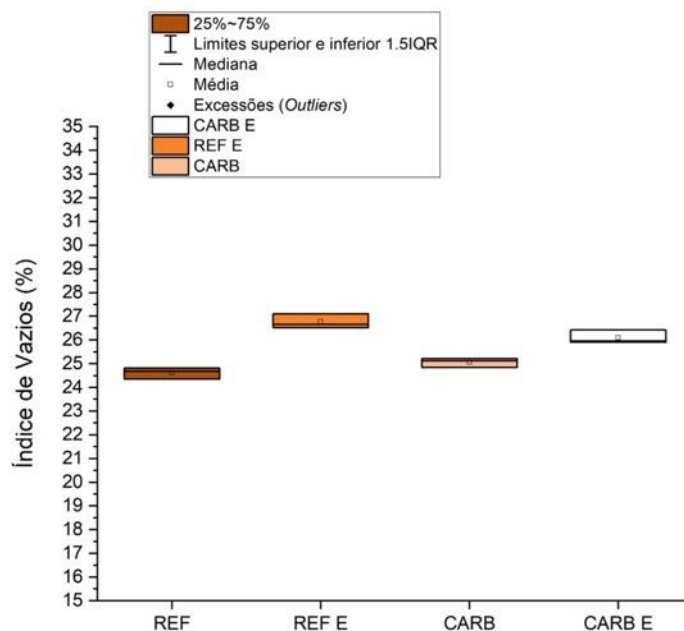
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Por meio da análise estatística ANOVA, com nível de confiança de 5%, concluiu-se que, para os revestimentos aplicados sobre o substrato 1, os valores se

encontram significativamente diferentes, com exceção das variáveis REF e CARB, as quais apresentam valores bastante semelhantes. Já para os revestimentos aplicados sobre o substrato 2, os valores não apresentaram diferenças significativas, com exceção das variáveis REF E e CARB E. Nota-se que, quando comparados os valores da absorção de água total dos revestimentos com a absorção de água total das argamassas prismáticas (apresentado no item 4.2.2.1), há uma leve redução nos valores. A hipótese é que, com a sucção de água do substrato, a argamassa perca água livre, reduzindo a relação  $a/agl$  e, por consequência, a quantidade de poros internos.

Em relação às amostras aplicadas no substrato 1, ocorreu um aumento da absorção total quando as amostras foram submetidas ao envelhecimento acelerado, fato que pode ter ocorrido devido ao aumento das fissuras internas provocadas pelas variações de temperatura e pelo choque térmico, porém, entre a variável REF e a variável CARB, não houve diferenças significativas. Já para as amostras aplicadas no substrato 2, estas não sofreram influências das condições de exposição (envelhecimento acelerado e carbonatação) para os resultados de absorção total. Na Figura 59, está apresentado o gráfico de índice de vazios para as amostras aplicadas sobre o substrato 1.

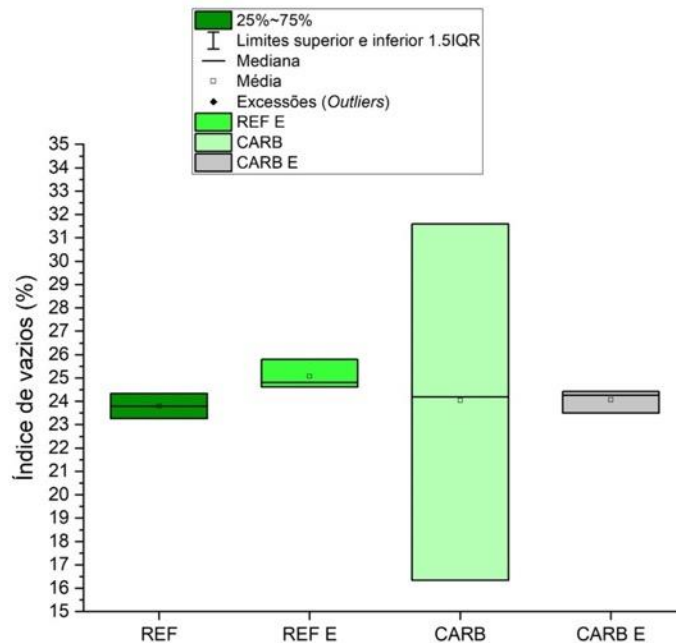
Figura 59 – Índice de vazios para amostras aplicadas no substrato 1



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Considerando que o cálculo de absorção de água total é proporcional ao cálculo de índice de vazios, há um comportamento semelhante. Observa-se que, após o envelhecimento acelerado, as amostras apresentaram maior índice de vazios. A amostra REF obteve um resultado de 24,62% de índice de vazios, e a REF E, de 26,77%. A CARB obteve um resultado de 25,06%, e o CARB E apresentou resultado de 26,10%. No entanto, entre as amostras REF e CARB, não há variações significativas, permitindo concluir que a carbonatação não alterou a porcentagem de vazios. Na Figura 60, está apresentado o gráfico de índice de vazios para as amostras aplicadas no substrato 2.

Figura 60 - Índice de vazios para amostras aplicadas no substrato 2

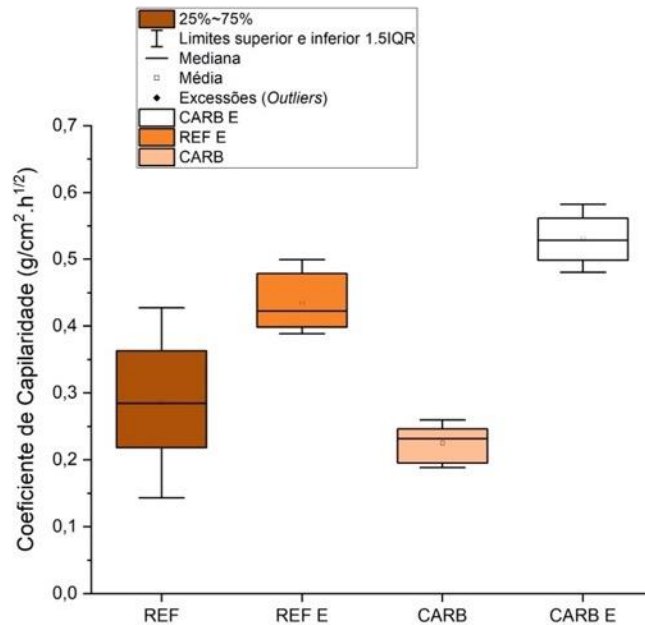


Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A partir do gráfico da Figura 60, fica nítido que não há diferenças significativas entre os valores de índice de vazios quando submetidos ao envelhecimento acelerado e à carbonatação. A amostra REF apresentou índice de vazio de 23,80%; a REF E, de 25,07%, a CARB, de 24,04%; e a CARB E, de 24,06%, além disso, para a amostra CARB, o desvio-padrão foi elevado. No entanto, os valores de absorção de água e índice de vazios, muitas vezes, não representam a velocidade de sucção de água, conforme mencionado anteriormente, e, dessa forma, os valores de coeficiente de capilaridade apresentam-se de forma mais eficiente para análise do material,

excepcionalmente quando as amostras estão aplicadas sobre o substrato, visto que estas modificam sua estrutura de poros, diferentemente das amostras de argamassas moldadas de forma isolada. Na Figura 61, estão apresentados os valores de coeficiente de capilaridade para as amostras aplicadas sobre o substrato 1.

Figura 61 – Coeficiente de capilaridade para amostras aplicadas no substrato 1



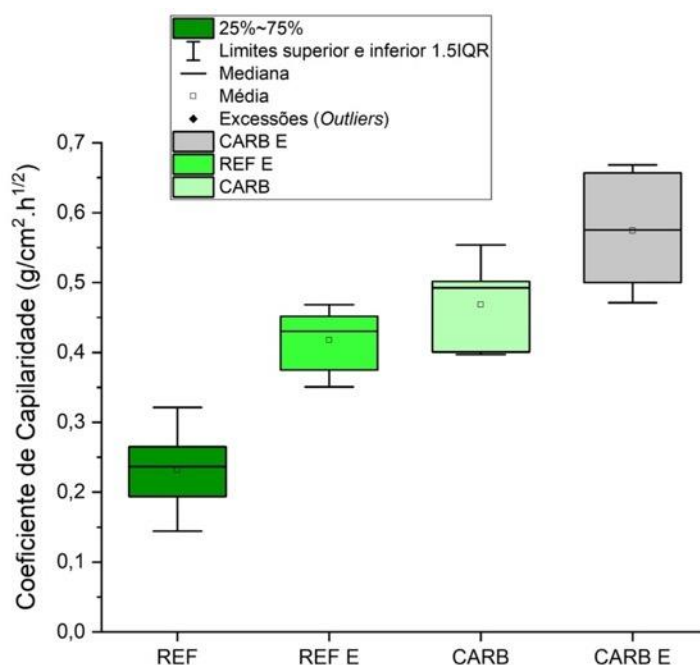
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Ao analisar o gráfico da Figura 61, observa-se que há um aumento na força capilar após o envelhecimento acelerado. A amostra REF apresentou valor de  $0,29 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ; REF E, de  $0,44 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ; a CARB, de  $0,23 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ , e a CARB E, um valor de  $0,53 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ . Tais valores corroboram os resultados obtidos no índice de vazios, permitindo concluir que de fato houve aumento na porosidade devido ao processo de expansão e retração ocasionado pelos aquecimentos e resfriamento. Vale ressaltar que o valor de CARB E foi o mais elevado entre as variáveis, visto que, durante o processo de carbonatação, a argamassa atinge maior módulo de elasticidade e resulta em uma estrutura mais rígida, de modo que, ao ser submetida a cargas internas, pode apresentar maior facilidade de propagação de fissuras. É possível concluir que a carbonatação não alterou a capilaridade quando comparada com as amostras REF, embora tenha ocorrido diminuição do desvio-padrão, indicando maior heterogeneidade no tamanho dos poros e, após o envelhecimento acelerado,

tanto as amostras REF quanto as amostras CARB aumentaram sua capilaridade devido à origem de fissuras internas provocadas pela expansão e retração.

Na Figura 62, estão apresentados os valores de coeficiente de capilaridade para as amostras aplicadas sobre o substrato 2, onde REF resultou em valores de  $0,24 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$  e, para REF E, ocorreu um aumento nos valores, comportamento semelhante ao das amostras do substrato 1, de  $0,42 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ . Já as amostras CARB e CARB E resultaram em valores de  $0,47 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$  e  $0,57 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$  respectivamente, comportamento diferente do apresentado anteriormente.

Figura 62 – Coeficiente de capilaridade para amostras aplicadas no substrato 2



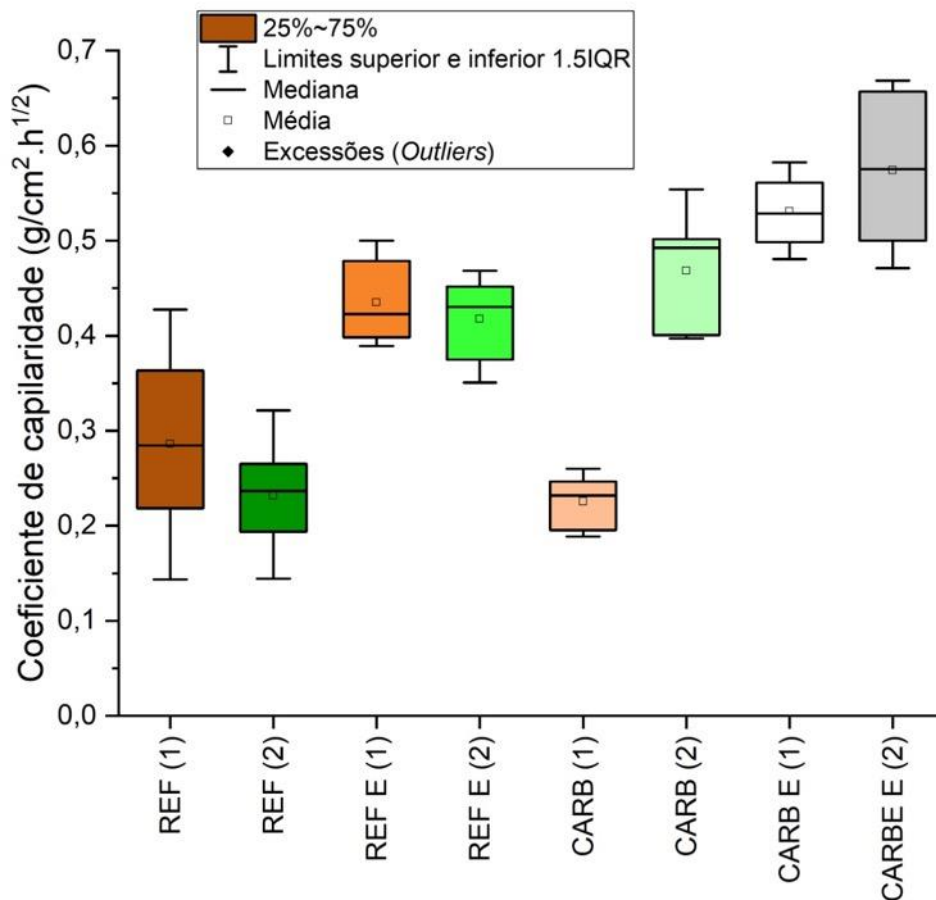
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Existem algumas hipóteses que podem ser sugeridas para explicar este comportamento. Tendo em vista que o substrato 2 apresenta menor coeficiente de capilaridade, portanto, menor perda de água da argamassa para o substrato, a argamassa apresentará maior porosidade, apresentando maior tamanho dos poros, e, após a carbonatação, ocorrerá o refinamento dos poros, o que diminuirá a quantidade de macroporos e aumentará a quantidade de meso e microporos (MORANDEAU, THIÉRY, DANGLA, 2015; NGALA, PAGE, 1997; THIERY, 2005; TRACZ, ZDEB, 2019), elevando a força capilar. Outra hipótese é que, com a elevada quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  disponível para carbonatar, devido à presença de cal, houve

expansão interna, uma vez que o volume do  $\text{CaCO}_3$  é maior que o do  $\text{Ca(OH)}_2$  (ISHIDA; MAEKAWA, 2000); dessa forma, os poros sofreriam tensões e iriam ocasionar fissuras internas provocadas pelo aumento de volume. No entanto, ambas as hipóteses, especialmente a última apresentada, não seriam empregadas para as amostras aplicadas sobre o substrato 1, levando ao direcionamento de que houve alguma reação entre as amostras aplicadas sobre este substrato. A carbonatação alterou a porosidade interna e elevou o coeficiente de capilaridade tanto para as amostras CARB como para as CARB E. Ao realizar análise estatística ANOVA com grau de confiança de 5%, concluiu-se que os resultados são significativamente distintos entre si, em todas as combinações. Na Figura 63, está apresentada a comparação de todas as variáveis entre os substratos.

Figura 63 – Comparação do coeficiente de capilaridade entre amostras aplicadas em diferentes substratos

Legenda: Amostras aplicadas sobre o substrato 1 (1); amostras aplicadas sobre o substrato 2 (2).



Fonte: Elaborada pela autora (2023).



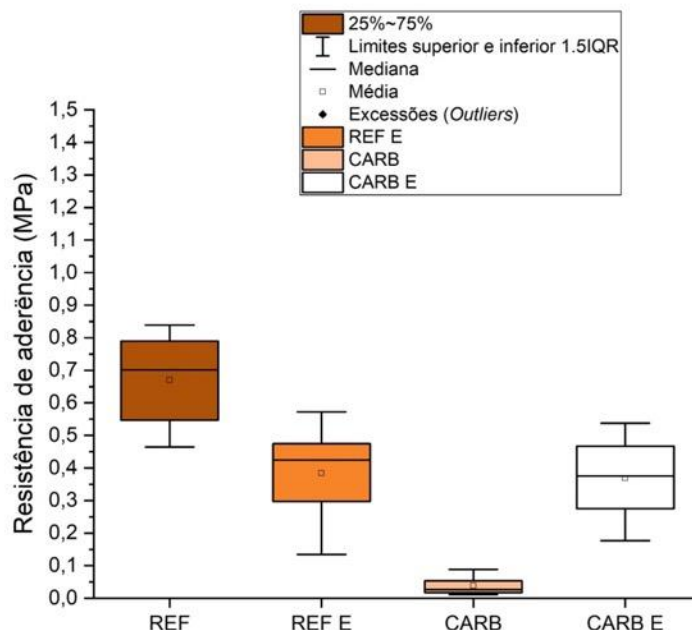
No gráfico da Figura 63, é possível observar de forma clara que o substrato influenciou de forma mais significativa as amostras carbonatadas, resultando em comportamentos distintos para as amostras aplicadas sobre o substrato 1 e para as aplicadas sobre o substrato 2. Todavia, conforme trabalhos desenvolvidos anteriormente no Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem (GMAT) e conforme a literatura, estima-se que provavelmente os resultados de carbonatação da presente pesquisa apresentaram algum erro, cuja causa não foi identificada. Ainda, ao comparar os resultados obtidos nas amostras prismáticas de argamassa (Figura 57) e nas amostras de argamassa quando aplicadas sobre diferentes substratos (Figura 63), observa-se que os comportamentos foram semelhantes, com exceção das amostras CARB aplicadas no substrato 1. Este efeito indica que o substrato não alterou significativamente o coeficiente de capilaridade a ponto de alterar a estrutura de poros.

Ao realizar ANOVA com 5% de confiança entre os pares de cada variável de ambos os substratos, estes não apresentaram diferenças significativas. Assim, é possível afirmar que as diferenças de propriedades dos substratos, isto é, absorção de água capilar e rugosidade, não influenciaram de forma expressiva nos resultados de absorção capilar.

#### **4.3.2 Resistência de aderência**

Conforme já mencionado na metodologia, o ensaio de resistência de aderência foi realizado por meio de um método alternativo, avaliando uma área menor do que a prevista na NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019). Na Figura 64, estão apresentados os valores de resistência de aderência para as amostras aplicadas sobre o substrato 1. Vale ressaltar que, embora a resistência superficial à tração do substrato 1 tenha sido inferior ao esperado de resistência de aderência para os revestimentos, todas as amostras romperam na interface, independentemente do processo de exposição.

Figura 64 – Resistência de aderência para amostras aplicadas no substrato 1



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Analisando o gráfico da Figura 64, observa-se que as amostras REF apresentaram um valor médio de resistência de aderência de 0,69 Mpa, valor este que se encontra dentro do esperado para argamassas de revestimento, superando os valores indicados pela NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) e que apresentou um desvio-padrão de 0,14 MPa com coeficiente de variação (CV) de 20%. É consenso na literatura a elevada heterogeneidade dos resultados de resistência de aderência justifica os valores de CV (VAZ; CARASEK, 2019). As amostras REF E apresentaram valores com média de 0,38 MPa, desvio-padrão de 0,14 MPa e CV de 38%. Comparando com as amostras REF, houve uma diminuição na resistência de aderência, fato ocorrido pelo processo de envelhecimento acelerado. Ressalta-se que a restrição proposta neste trabalho para simular de forma mais eficiente o comportamento dos revestimentos de argamassas submetidos à expansão e retração por ciclagem térmica se mostrou eficaz, uma vez que de fato houve diminuição na aderência provocada pelo aumento de tensões internas e, por consequência, na diminuição das fissuras e propagação destas à medida que novos ciclos térmicos ocorriam. Na análise estatística entre REF e REF E, o método ANOVA com 5% de confiança indicou que há diferenças significativas entre as variáveis.

Conforme mencionado anteriormente e avaliando o gráfico exposto na Figura 64 quanto às amostras CARB, nota-se que estas obtiveram valor médio de resistência de aderência de 0,04 MPa, o que é contrário ao comportamento esperado. Estima-se que algum erro metodológico danificou as amostras durante o processo, o que resultou na exclusão desses resultados nas análises posteriores. Além das hipóteses abordadas na seção 3.2.5, há a hipótese de que o brometo de sódio e o cloreto de sódio colocados na câmara de carbonatação para controle de umidade tenham resultado em uma reação química com a amostra, danificando a interface. A interface composta por certos tipos de materiais pode tornar a força de ligação mais intensa ou com maiores falhas, dependendo da compatibilidade química das reações que ocorrem na região (RASHID *et al.*, 2023).

Já as amostras CARB E, que não obtiveram os mesmos danos que as amostras CARB, apresentaram valores de resistência de aderência de 0,37 MPa, com desvio-padrão de 0,12 MPa e CV de 33%, valores semelhantes ao encontrando nas amostras REF E e coerentes com a literatura que observou que amostras carbonatadas e submetidas a envelhecimento acelerado tendem a reduzir de forma significativa suas propriedades mecânicas (LUNARDI, 2021). Ao realizar a ANOVA com 5% de significância, as amostras CARB E não apresentaram diferença significativa quando comparadas com REF E.

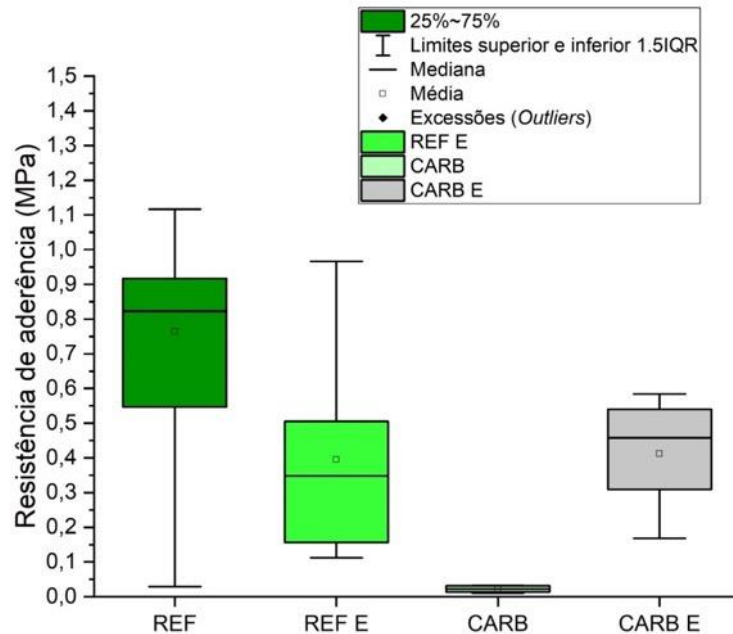
Os valores de resistência de aderência para as amostras aplicadas sobre o substrato 2 estão apresentados na Figura 65.

Com base no gráfico da Figura 65, é possível observar que as amostras REF apresentaram valor médio de resistência de aderência de 0,80 MPa, com desvio-padrão de 0,21 MPa e CV de 26%, valores que atendem ao exigido pela norma. No entanto, o desvio-padrão e o CV são superiores aos encontrados no substrato 1. As amostras REF E apresentaram valor médio de 0,40 MPa, com desvio-padrão de 0,28 MPa e CV de 71%, comportamento semelhante ao encontrado anteriormente para o substrato 1, em que, após o envelhecimento acelerado, houve diminuição da resistência de aderência. Ao realizar ANOVA com 5% de confiança, os valores de REF e REF E foram significativamente distintos entre si.

As amostras CARB apresentaram comportamento semelhante ao exposto nas amostras aplicadas no substrato 1. E, por fim, as amostras CARB E obtiveram valor médio de 0,41 MPa, com desvio-padrão de 0,17 MPa e CV de 42%. Ao realizar análise

estatística por ANOVA com 5% de confiança, não houve diferenças significativas entre REF E e CARB E.

Figura 65 – Resistência de aderência para amostras aplicadas no substrato 2



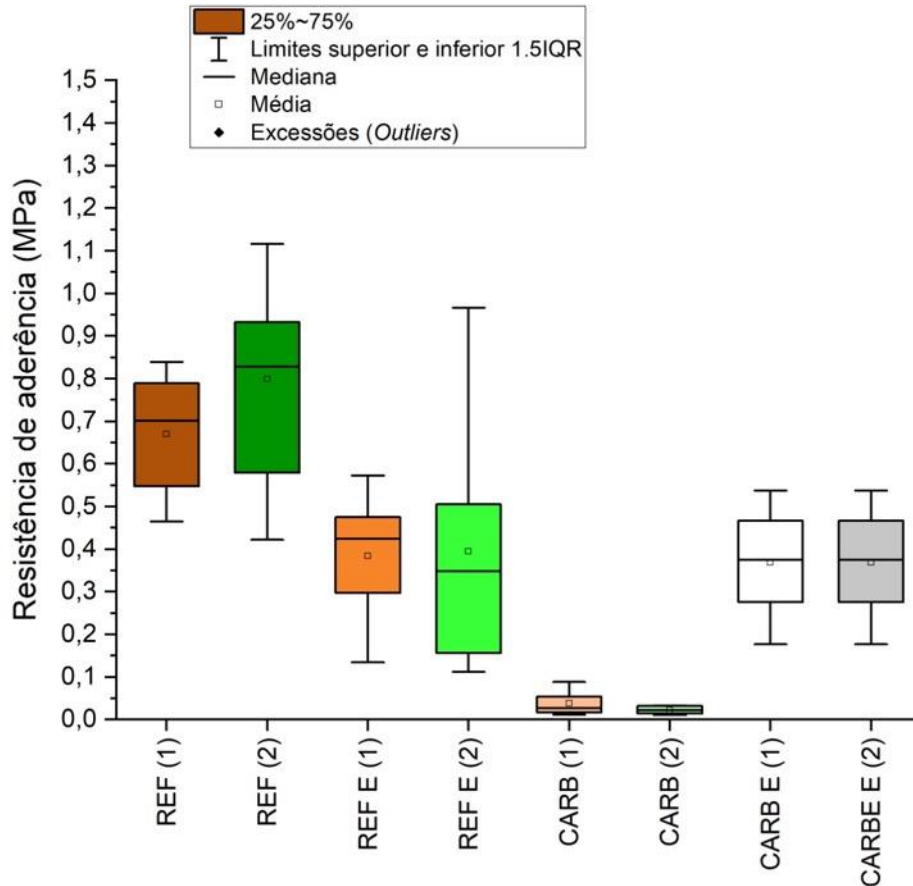
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Na Figura 66, é possível observar de forma global todos os resultados de resistência de aderência para ambos os substratos utilizados na pesquisa.

Observa-se que os comportamentos seguiram a mesma tendência de resultados, porém, é notório que o desvio-padrão das amostras aplicadas sobre o substrato 2 é superior, o que pode ser compreendido pela heterogeneidade da massa cerâmica que refletiu de forma direta nos resultados de aderência. Ao realizar ANOVA com 5% de confiança entre os pares de cada variável de ambos os substratos, não foram verificadas diferenças significativas. A exceção é o par de exemplares de referência, que apresentou diferença significativa, embora seja possível afirmar que as diferenças de propriedades dos substratos utilizados não influenciaram de forma expressiva os resultados de resistência de aderência.

Figura 66 – Comparação da resistência de aderência entre amostras aplicadas em diferentes substratos

Legenda: Amostras aplicadas sobre o substrato 1 (1); amostras aplicadas sobre o substrato 2 (2).

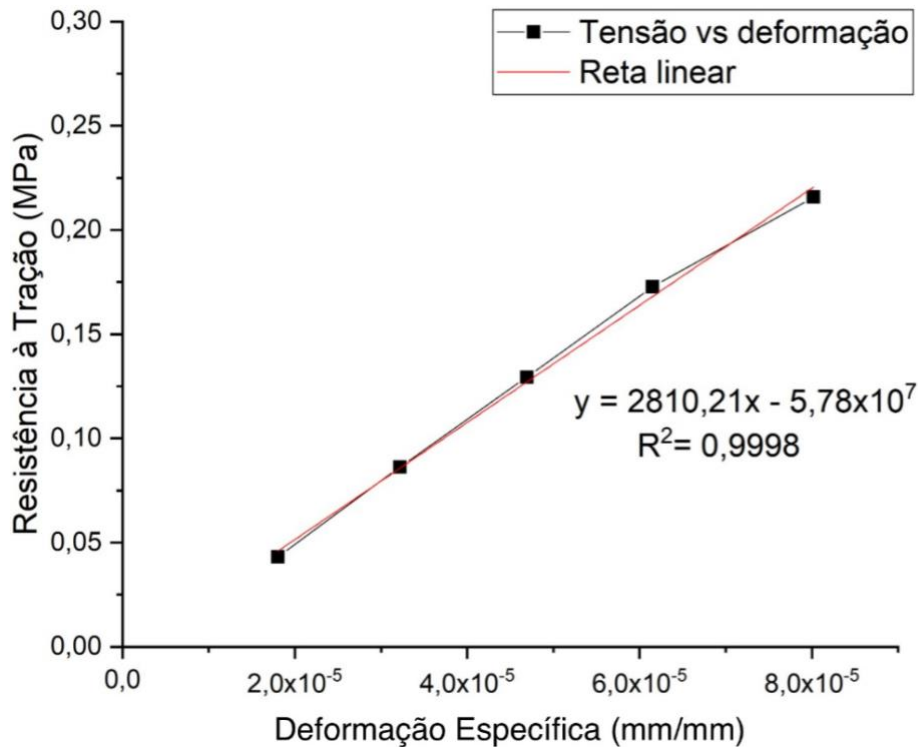


Fonte: Elaborada pela autora (2023).

#### 4.3.3 Módulo de elasticidade por correlação de imagem digital

O método de CID foi realizado nas variáveis CARB e CARB E aplicadas nos dois substratos distintos, assim como em cinco amostras de REF aplicadas sobre o substrato 1, amostras moldadas em número maior. No entanto para o substrato 2 não foram feitas amostras extras.

O cálculo do módulo de elasticidade ocorreu a partir do coeficiente angular da reta linear obtida na construção do gráfico tensão *versus* deformação do ensaio de resistência de aderência, conforme apresentado na Figura 67. O gráfico foi plotado utilizando até 50% da carga final de ruptura. Os dados de tensão de tração foram coletados na máquina de ensaio e compatibilizados com a deformação correspondente obtida em cada imagem através do método CID.

Figura 67 – Gráfico de tensão *versus* deformação obtido para uma amostra

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Considerando que as amostras CARB não apresentaram resultados de resistência de aderência, estas foram desconsideradas do ensaio de CID. Dessa forma, os resultados apresentados serão apenas das amostras REF aplicada no substrato 1 e CARB E aplicada em ambos os substratos.

Realizou-se uma análise nas diferentes alturas da argamassa, de modo a se obter os módulos de elasticidade nas superfícies externa e central da argamassa, bem como na interface. Nas Tabelas 12 e 13, estão apresentados os valores encontrados para cada região das amostras ensaiadas.

Tabela 12 – Módulo de elasticidade determinado a partir da CID para amostras REF na direção vertical

Substrato	Módulo de elasticidade (MPa)		
	Superfície externa	Central	Interface
1	1958,20	1836,20	1553,00
	2448,60	2081,30	1658,60
<b>Média</b>	<b>2203,40</b>	<b>1958,75</b>	<b>1605,80</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Tabela 13 – Módulo de elasticidade determinado a partir da correlação de imagem digital para amostras CARB E na direção vertical

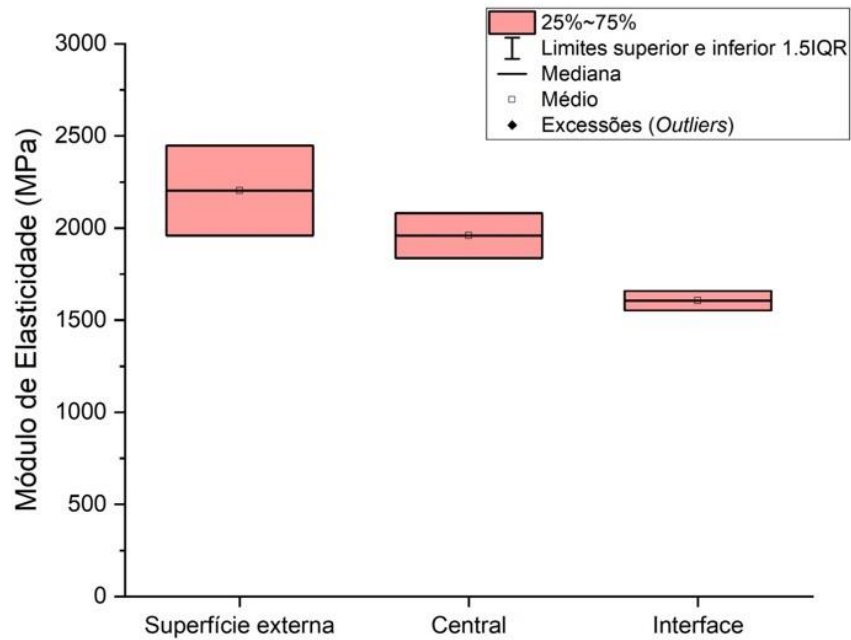
Substrato	Módulo de Elasticidade (MPa)		
	Superfície externa	Central	Interface
1	9394,80	7355,30	6096,10
	6064,50	4487,00	3581,10
	8249,90	6739,50	5614,60
	2342,80	2128,20	1811,70
	2673,00	2088,20	1528,80
<b>Média</b>	<b>5745,00</b>	<b>4559,64</b>	<b>3726,46</b>
2	1912,70	1633,10	1347,60
	2932,40	2508,50	2213,50
<b>Média</b>	<b>2422,55</b>	<b>2070,80</b>	<b>1780,55</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Ao realizar análise estatística por método ANOVA com 5% de confiança, chegou-se à conclusão de que não houve diferenças significativas entre CARB E aplicado no substrato 1 e no substrato 2, assim como não houve diferenças significativas entre as amostras REF e CARB E. Este efeito pode estar atrelado à elevada variabilidade dos resultados entre amostras de uma mesma variável. No entanto, os valores encontrados estão de acordo com a literatura para módulos de elasticidade em argamassa (MARQUES *et al.*, 2020; POLITO, 2008; VEIGA, 2017). Nas Figura 68 e 69, estão apresentados os gráficos com valores médios e desvios-padrão das três regiões de análise do módulo de elasticidade para REF e CARB E, respectivamente.

O desvio-padrão dos resultados apresentados nas Figuras 68 e 69 é elevado, não havendo diferença significativa para afirmar que há mudança no módulo de elasticidade avaliando substratos distintos e em regiões distintas. Pode-se concluir que a variabilidade dos resultados ocorreu de forma menos acentuadas nas amostras aplicadas sobre o substrato 2.

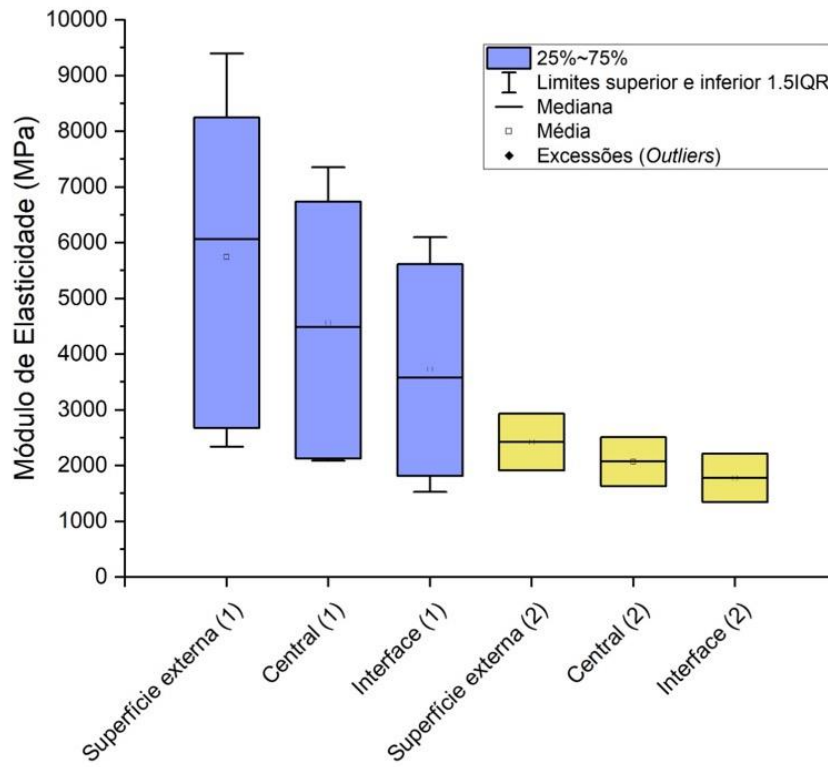
Figura 68 – Módulo de elasticidade médio para as três regiões de análise das amostras REF



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 69 – Módulo de elasticidade médio para as três regiões de análise das amostras CARB E

Legenda: Amostras aplicadas sobre o substrato 1 (1); amostras aplicadas sobre o substrato 2 (2).

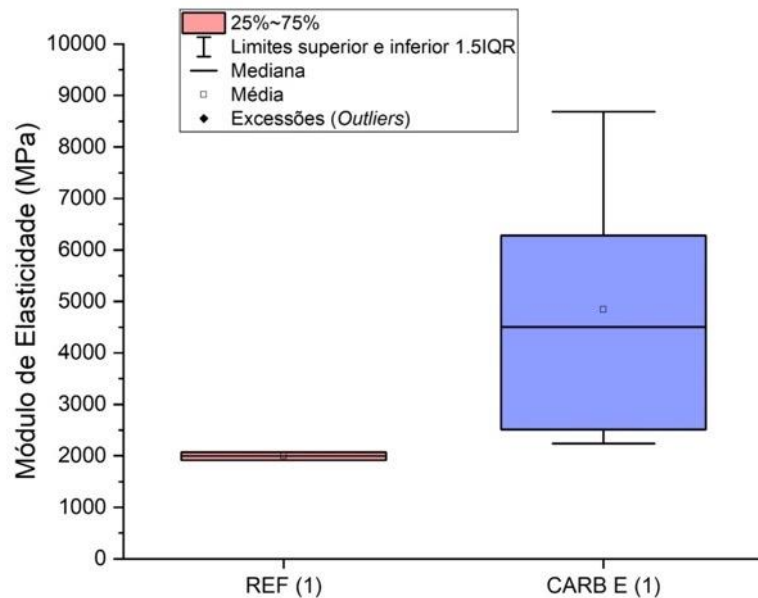


Fonte: Elaborada pela autora (2023).



Na Figura 70, está apresentada a comparação entre REF e CARB E aplicadas em um mesmo substrato, de um extensômetro virtual englobando toda extensão vertical da amostra. Ao realizar ANOVA com 5% de confiança, não houve diferenças significativas entre os valores. No entanto, o valor médio da argamassa quando submetida à carbonatação e ao envelhecimento acelerado apresentou maior módulo de elasticidade, fato que condiz com os valores de resistência à compressão da argamassa apresentados anteriormente, visto que, com o aumento da resistência à compressão, há aumento do módulo de elasticidade.

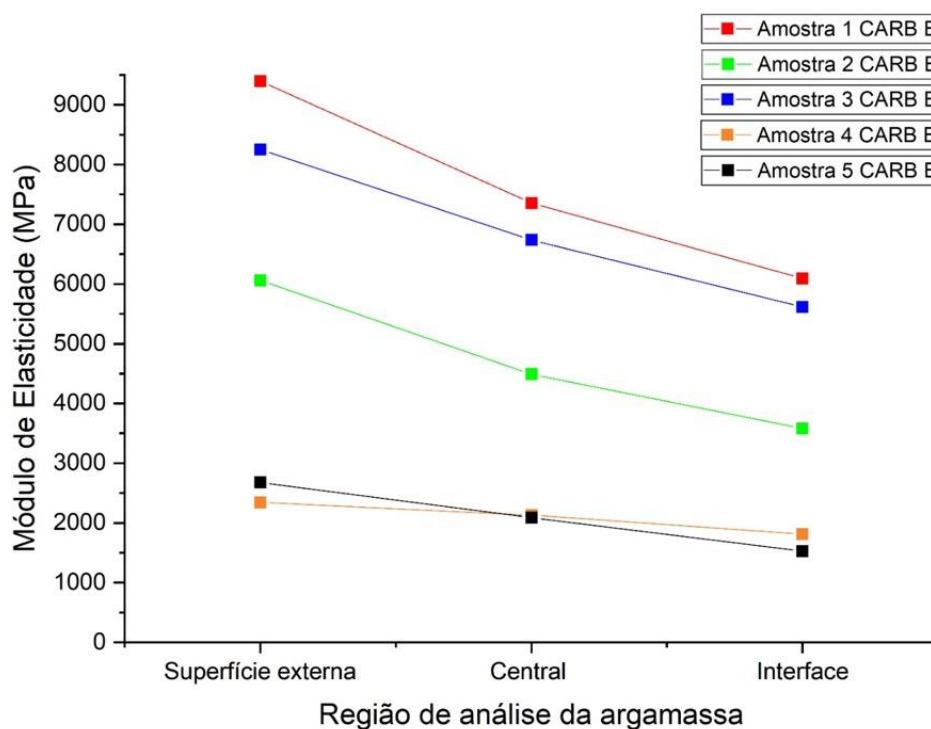
Figura 70 – Comparação do módulo de elasticidade médio entre amostras REF e amostras CARB E



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Embora não tenha havido diferenças significativas entre as amostras, ao se comparar três regiões de uma mesma amostra (região superfície externa, central e interface), o seu comportamento é semelhante, havendo redução no módulo de elasticidade à medida que se aproxima da interface. Na Figura 71, está apresentado um gráfico com todas as amostras da variável CARB E aplicada sobre o substrato 1.

Figura 71 – Avaliação do módulo de elasticidade de três regiões em um mesmo conjunto de amostras



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

As amostras submetidas à carbonatação e ao envelhecimento acelerado resultaram em módulos de elasticidade distintos entre si, uma vez que diversos exemplares de mesmas características apresentaram módulos de elasticidade, determinados na superfície externa, significativamente distintos, variando entre 9,4 e 2,3 GPa, ou seja, houve uma elevada variabilidade nos resultados de módulo, fato que pode estar atrelado ao efeito da carbonatação e do envelhecimento acelerado não ter ocorrido de forma homogênea. No entanto, todas as amostras demonstraram um comportamento semelhante, em que o módulo na superfície externa da amostra resultou em um módulo mais elevado e a parte inferior (próximo da interface) apresentou um módulo reduzido.

Ao analisar o módulo na superfície externa, é possível que, como a argamassa está aderida à pastilha metálica e tanto a cola quanto a pastilha apresentam elevado módulo de elasticidade, a argamassa na parte superior pode estar sendo influenciada pelos agentes externos correspondentes ao ensaio. Já para o módulo da parte inferior da argamassa, ou seja, a interface, o valor foi inferior aos demais, efeito que pode estar relacionado com a influência do substrato na porosidade da zona de interface,

sendo esta uma zona mais fraca do revestimento. Após o processo de envelhecimento acelerado, a zona de interface apresenta maior quantidade de defeitos que influenciam na redução da resistência de aderência, diminuindo por consequência o módulo de elasticidade da região (LUNARDI, 2021).

A fim de compreender melhor as hipóteses abordadas, foi realizada uma análise de extensometria nas três regiões de interesse, no sentido horizontal, tendo em vista que, se a pastilha estivesse influenciando, os valores de módulo o comportamento seriam semelhantes aos obtidos na direção vertical. Nas Tabelas 14 e 15, estão apresentados os valores de módulo de elasticidade no sentido horizontal.

Tabela 14 – Módulo de elasticidade obtido a partir da correlação de imagem digital para amostras REF na direção horizontal

Substrato	Módulo de elasticidade (MPa)		
	Superfície externa	Central	Interface
1	1984,70	1750,50	1481,20
	3102,2	2527,2	1721,1
<b>Média</b>	<b>2543,45</b>	<b>2138,85</b>	<b>1601,15</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Tabela 15 – Módulo de elasticidade obtido a partir da correlação de imagem digital para amostras CARB E na direção horizontal

Substrato	Módulo de elasticidade (MPa)		
	Superfície externa	Central	Interface
1	8236,5	7199,8	6488
	5374,4	5498	2649,5
	7338,7	6610,1	5739,7
	2596,5	2251,2	1966,3
	2718,6	2120,3	1669,3
<b>Média</b>	<b>5252,94</b>	<b>4735,88</b>	<b>3702,56</b>
2	2027,2	1537,3	1583,9
	3014,9	2469,7	2255,6
<b>Média</b>	<b>2521,05</b>	<b>2003,50</b>	<b>1919,75</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os valores de módulo de elasticidade nas regiões superfície externa, central e próximo à interface, nos locais semelhantes aos analisados na vertical, foram semelhantes, isto é, o módulo reduziu à medida que se aproximava da interface. Portanto, é possível concluir que a pastilha metálica restringiu a movimentação da

região superior da amostra tanto avaliando na direção vertical quanto na horizontal, visto que o deslocamento foi inferior e atingiu valores de módulo de elasticidade superiores. Já na interface, o módulo de elasticidade foi inferior aos demais pelo seguinte motivo: durante o processo de envelhecimento acelerado, foi utilizada uma metodologia que restringiu o movimento de expansão e retração do substrato, e apenas na argamassa ocorreram variações dimensionais, causando maior degradação da interface e, por consequência, reduzindo o módulo nesta região.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da degradação de revestimentos de argamassa mista quando submetidas a envelhecimento acelerado e carbonatação, por meio da técnica de correlação de imagem digital (CID) para calcular os respectivos módulos de elasticidade das argamassas aplicadas sobre dois substratos com propriedades distintas.

Com relação às propriedades da argamassa analisadas individualmente, foi possível concluir que, após o envelhecimento acelerado, ocorreu melhora nas propriedades mecânicas, principalmente na resistência à compressão, que apresentou um aumento significativo. Devido às amostras 40 x 40 x 160 mm terem sido curadas submersas em água e cal, não houve a carbonatação da cal, uma vez que esta necessita de água e CO<sub>2</sub>, portanto, no envelhecimento acelerado com a presença de água e calor, houve melhora da resistência à compressão. No entanto, a carbonatação não trouxe melhoras significativas às argamassas e, após o envelhecimento acelerado, as propriedades mecânicas não cresceram na mesma intensidade dos resultados observados nas amostras REF e REF E. Estima-se que a cal não carbonatou totalmente antes do início dos ensaios de caracterização, provavelmente em função do elevado teor de magnésio presente na sua composição e da elevada umidade a que foi submetida, o que diminuiu a velocidade de penetração de CO<sub>2</sub> nos exemplares.

Com o envelhecimento acelerado, ocorreu maior sucção de água por capilaridade, fato intensificado após a carbonatação. Compreende-se que o processo de envelhecimento acelerado acelerou o processo de endurecimento da cal, a qual reduziu as dimensões dos poros da argamassa, elevando a sucção capilar. Após a carbonatação, as argamassas apresentaram maior coeficiente de capilaridade quando comparadas com REF e REF E, concluindo-se que a precipitação de CaCO<sub>3</sub> nos macroporos reduziu seus diâmetros, levando a maior quantidade de meso e microporos, o que contribuiu para maior sucção de água. Vale ressaltar que as amostras de argamassa não foram submetidas à restrição de movimento durante o envelhecimento acelerado, fato que contribuiu para a melhora das propriedades e não para a degradação das amostras.

Nos revestimentos, ao analisar a absorção de água por capilaridade, foi possível notar que tanto as amostras aplicadas no substrato 1 quanto as aplicadas no

substrato 2 apresentaram maior coeficiente de capilaridade após o envelhecimento acelerado, permitindo concluir que o processo de restrição utilizado nesta pesquisa se mostrou eficiente, gerando maiores danos à argamassa, ou seja, maior quantidade de microfissuras as quais resultaram em aumento da sucção de água. É possível concluir que os substratos influenciaram na variação do coeficiente de capilaridade após o processo de carbonatação.

No ensaio de resistência de aderência, observou-se que todos os valores, com exceção do referente à CARB, foram condizentes com o que a NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) estipula. Ao comparar REF e REF E para ambos os substratos, houve diminuição da resistência de aderência, fato que corrobora os resultados obtidos na absorção capilar, visto que, com o aumento de microfissuras após o envelhecimento acelerado, houve queda nas propriedades mecânicas. Esse efeito ocorreu principalmente pela restrição utilizada ter sido efetiva para simular o real efeito de um revestimento de argamassa.

A aplicação do método de CID se mostrou efetiva para obter resultados de módulo de elasticidade em argamassas de revestimento. Não houve diferenças significativas entre os valores de REF e CARB E, visto a elevada variabilidade dos valores, mas, comparando as médias, observa-se que CARB E apresentou maior valor de módulo de elasticidade do que REF E para amostras aplicadas sobre o substrato 1. Esse efeito está ligado ao processo de carbonatação, que tende a elevar o módulo de elasticidade.

Foi avaliado o módulo de elasticidade em diferentes regiões da argamassa e verificou-se que o módulo na região superior dos exemplares (na superfície) apresentou os maiores valores e que, na região de interface com o substrato, o módulo apresentou valores menores. Há a hipótese de que o módulo na região superior foi mais elevado devido à restrição decorrente do engaste entre as pastilhas metálicas e a superfície da argamassa, obtido por meio de adesão com cola epóxi, o que destoa do módulo observado nas outras regiões, isto é, na região central e na inferior. Entre estas duas regiões, foi possível avaliar que o módulo inferior, ou seja, próximo da interface com o substrato, foi o menor devido ao fato de a interface apresentar maiores defeitos e ser uma zona de maior fragilidade. Dessa forma, o módulo central representou o valor da argamassa e o módulo inferior representa o valor da interface. É possível concluir que os módulos de elasticidade nas três regiões atenderam o que a literatura apresenta como valores usuais para argamassas de revestimento.

## 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- a) Avaliar o efeito da carbonatação em amostras de argamassa com diferentes tipos e teores de cales, compreendendo as reações químicas que ocorrem;
- b) Aplicar o método de CID para comparação entre módulo de elasticidade estático e dinâmico;
- c) Validar o método de CID para ensaio de tração considerando a última metodologia utilizada neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABID, K. *et al.* A review on cement degradation under CO<sub>2</sub>-rich environment of sequestration projects. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 27, p. 1149–1157, 2015.
- ABSHIRINI, M.; SOLTANI, N.; MARASHIZADEH, P. On the mode I fracture analysis of cracked Brazilian disc using a digital image correlation method. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 78, p. 99–105, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1185-8**: standard test methods for sampling and testing non-asbestos fiber-cement flat sheet, roofing and siding shingles, and clapboards. Philadelphia, 2012.
- ANDERSON, T L. **Fracture mechanics**: fundamental and applications. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- ARNOLD, D. C. M. *et al.* A critical analysis of red ceramic blocks roughness estimation by 2d and 3d methods. **Remote Sensing**, v. 13, n. 4, p. 1–18, 2021.
- ARNOLD, D. C. M.; KAZMIERCZAK, C. S. Influência da distribuição granulométrica do agregado miúdo e do teor de fíler nas propriedades de argamassas com areia de britagem. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2009, **Anais [...]**. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13277**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13278**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13528**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas: determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13749**: revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: especificação. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-2**: componentes cerâmicos: blocos e tijolos para alvenaria: parte 2: métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575**: edificações habitacionais: desempenho: parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-4**: edificações habitacionais: desempenho: parte 4: sistemas de vedações verticais internas e externas: SVVIE. Rio de Janeiro, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15630**: determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método do ultrassom. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16541**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16887**: concreto: determinação do teor de ar em concreto fresco: método pressométrico. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**: agregados miúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**: agregados: determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**: concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017b.

AZEVEDO, A. R. G. *et al.* Influence of sintering temperature of a ceramic substrate in mortar adhesion for civil construction. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 342–348, 2018.

BARRIOS-MURIEL, J. *et al.* An approach for surface roughness filtering as an alternative to ISO standard. **Procedia Manufacturing**, v. 41, p. 674–681, 2019.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. 2001. 172p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; ANTUNES, G. R. Processo de identificação das manifestações patológicas em fachadas com revestimento cerâmico. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS*, 9., 2012, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2012.

BAUER, E. Avaliação da fissuração em argamassas. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, 8., 2009. **Anais [...]**.2009.

BEER, F. P. *et al.* **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

BELLEI, P. *et al.* Influence of brick and concrete substrates on the performance of renders using in-situ testing techniques. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 102871, Jun. 2021.

BOTAS, S.; VEIGA, R.; VELOSA, A.. Bond strength in mortar/ceramic tile interface: testing procedure and adequacy evaluation. **Materials and Structures**, v. 50, n. 50, 2017.

BRANCH, J. L.; EPPS, R.; KOSSON, D. S. The impact of carbonation on bulk and ITZ porosity in microconcrete materials with fly ash replacement. **Cement and Concrete Research**, v. 103, n. March, p. 170–178, 2018.

CAMPOS, M. O. **Estudo da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto**. 2014. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

CARASEK, H.; VAZ, F. H. B.; CASCUDO, O. Statistical analysis of test methods to evaluate rendering surface properties. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 87–105, 2018.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos**: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação. 1996. 285 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARASEK, H. *et al.* Bond between 19th Century lime mortars and glazed ceramic tiles. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 85–98, 2014.

CARASEK, H. Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais. *In: CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais*: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2010. v. 1.

CATALANOTTI, G. *et al.* Measurement of resistance curves in the longitudinal failure of composites using digital image correlation. **Composites Science and Technology**, v. 70, n. 13, p. 1986–1993, 2010.

CHI, J. M.; HUANG, R.; YANG, C. C. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 10, n. 1, p. 14–20, 2002.

CHINCHÓN-PAYÁ, S.; ANDRADE, C.; CHINCHÓN, S. Indicator of carbonation front in concrete as substitute to phenolphthalein. **Cement and Concrete Research**, v. 82, p. 87–91, 2016.

CINCOTTO, M. A. *et al.* O efeito da carbonatação na porosidade de argamassas de cimento, cal e cimento: cal. *In*: CONGRESSO PORTUGUÊS DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 3., Lisboa. **Anais [...]**. Lisboa: Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassa de Construção, 2010.

CORNELY, K. G. **Avaliação da influência da carbonatação e do ensaio de envelhecimento acelerado por ciclagem térmica em argamassas de revestimento**. 2022. 125p. Projeto de pesquisa (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2022.

COSTA, E. B. C. *et al.* Squeeze flow of mortars on brick substrate and its relation with bond strength. **Construction and Building Materials**, v. 265, 2020.

COSTA, E. B. C.; CARDOSO, F.A.; JOHN, V.M. Efeito do teor e da dispersão de fino calcário na aderência substrato-matriz cimentícia. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 21–34, 2016.

COSTA, E. B.C. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. 2014. 135p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

COSTA, E. B. C.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Influence of high contents of limestone fines on rheological behaviour and bond strength of cement-based mortars. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 1114–1126, 2017.

CRAMMOND, G.; BOYD, S. W.; DULIEU-BARTON, J. M. Speckle pattern quality assessment for digital image correlation. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 51, n. 12, p. 1368–1378, 2013.

CULTRONE, Giuseppe *et al.* Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 24, n. 3, p. 547–564, 2004.

DEHESTANI, A.; HOSSEINI, M.; BEYDOKHTI, A. T. Effect of wetting–drying cycles on mode I and mode II fracture toughness of cement mortar and concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 106, n. July 2019, p. 102448, 2020.

DE FREITAS, V. P. *et al.* Assessing the durability of mortars tiles - A contribution for a prediction model. **Engineering Failure Analysis**, v. 44, p. 36–45, 2014.

DRIVE, C. P. Manufacturing of brick. **Technical Notes on Brick Construction**, p. 1–7, Dec. 2006.

DUBOIS, F. *et al.* Characterization of timber fracture using the digital image correlation technique and finite element method. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 96, p. 107–121, 2012.

ESQUIVEL, J. F. T. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. 2009. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL APPROVALS. **ETAG 004**: Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems With Rendering. Brussels, 2008.

FAYYAD, T. M.; LEES, J. M. Application of digital image correlation to reinforced concrete fracture. **Procedia Materials Science**, v. 3, p. 1585–1590, 2014.

FERRETTI, D.; BAŽANT, Z. P. Stability of ancient masonry towers: Moisture diffusion, carbonation and size effect. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1379–1388, 2006.

FREITAS, J. G.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 57–73, 2014.

GENT, A. N.; LIN, C. W. Model studies of the effect of surface roughness and mechanical interlocking on adhesion. **The Journal of Adhesion**, v. 32, n. 2–3, p. 113–125, 1990.

GOLEWSKI, G. L. Measurement of fracture mechanics parameters of concrete containing fly ash thanks to use of Digital Image Correlation (DIC) method. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 135, p. 96–105, Dec. 2019.

GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, J. F. *et al.* Improving lime-based rendering mortars with admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 271, 2021.

GROOT, C. **Effect of mortar on water brick bond**. [S.l.: s.n.], 1999.

GROOT, C.; LARBI, J. Influence of water flow (reversal) on bond strength development in young masonry. **Heron**, v. 44, n. 2, p. 63–78, 1999.

GULBE, L.; VITINA, I.; SETINA, J. The influence of cement on properties of lime mortars. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 325–332, 2017.

HAN, J. *et al.* Microstructure modification of carbonated cement paste with six kinds of modern microscopic instruments. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 10, p. 04014262, 2015.

HOLT, E. E. Early age autogenous shrinkage of concrete. **VTT Publications**, n. 446, p. 2–184, 2001.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1923–1930, 2002.

HOWLADER, M. K.; MASIA, M. J.; GRIFFITH, M. C. Digital image correlation for the analysis of in-plane tested unreinforced masonry walls. **Structures**, v. 29, n. November 2020, p. 427–445, 2021.

HOWLADER, M. K.; MASIA, M. J.; GRIFFITH, M. C. Digital image correlation for the analysis of in-plane tested unreinforced masonry walls. **Structures**, v. 29, n. November 2020, p. 427–445, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8336**: fibre-cement flat sheets. Geneva, 2009.

ISHIDA, T.; MAEKAWA, K. Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory. **Doboku Gakkai Ronbunshu**, v. 2000, n. 648, p. 203–215, 2000.

JIANG, C. *et al.* Deformation of concrete under high-cycle fatigue loads in uniaxial and eccentric compression. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 379–392, 2017.

JOHANNESSON, B.; UTGENANT, P. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 6, p. 925–931, 2001.

KAZMIERCZAK, C. S. *et al.* Considerações sobre a avaliação da durabilidade de revestimentos de argamassa com incorporação de resíduos por meio de ensaios acelerados com ciclos térmicos. *In*: KAZMIERCZAK, C. S.; FABRICIO, M. M. (org.). **Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: materiais e sustentabilidade**, Porto Alegre: Antac, 2016. p. 147–176.

KENDALL, K. **Molecular adhesion and its applications**. New York: [s.n.], 2001. v. 53.

KIM, W. S. *et al.* Evaluation of mechanical interlock effect on adhesion strength of polymer-metal interfaces using micro-patterned surface topography. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 30, n. 6, p. 408–417, 2010.

KOPPE, A. **Utilização de resíduo à base de polímero superabsorvente e fibra celulósica como agente de cura interna em matrizes de cimento portland**. 2016. 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

KOZICKI, J.; TEJCHMAN, J. Experimental investigations of strain localization in concrete using digital image correlation (DIC) technique. **Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics**, v. 54, n. 1, p. 3–24, 2007.

KUTCHKO, B. G. *et al.* Degradation of well cement by CO<sub>2</sub> under geologic sequestration conditions. **Environmental Science and Technology**, v. 41, n. 13, p. 4787–4792, 2007.

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

LAWRENCE, R. M. H. **A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars**. 2006. 316p. PhD Thesis – University of Bath, Bath, 2006.

LECOMPTE, D. *et al.* Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 44, n. 11, p. 1132–1145, 2006.

LI, X. *et al.* Effect of surface roughness on capillary force during particle-wall impaction under different humidity conditions. **Powder Technology**, v. 371, p. 244–255, 2020.

LIU, Q.; XIAO, J.; SINGH, A. Quantification of plastic shrinkage and cracking in mortars containing different recycled powders using digital image correlation technique. **Construction and Building Materials**, v. 293, p. 123509, 2021.

LIU, X. Y. *et al.* Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation by Shannon entropy. **Optik**, v. 126, n. 23, p. 4206–4211, 2015.

LUNARDI, M. P. **Avaliação multiescalar do efeito da carbonatação na durabilidade de argamassas de revestimento**. 2021. 173p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2021.

MARQUES, Ana Isabel *et al.* Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117216, 2020.

MAUROUX, T. *et al.* Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 7, p. 1014–1023, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. New York: MC Gran Hill Education, 2006.

MELO, A. C. *et al.* Influence of the contact area in the adherence of mortar: ceramic tiles interface. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118274, 2020.

MENEGOTTO, C. W. **Avaliação em multiescala da aderência entre substrato e composto cimentício de revestimento**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Impact of accelerated carbonation on OPC cement paste blended with fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 226–236, 2015.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 153–170, 2014.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 7, p. 995–1007, 1997.

NILSSON, A.; PETTERSSON, L. G.M.; NORSKOV, J. K. **Chemical bonding at surfaces and interfaces**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2008.

NYGAARD, R. **Well Design and well integrity: Wabamun Area CO<sub>2</sub> Sequestration Project (WASP)**. 2010. 1–39 f. 2010.

OLIVEIRA, V. C. **Análise quantitativa da influência da rugosidade e da área de interface entre substratos cerâmicos e revestimento cimentício na resistência de aderência à tração**. 2022. 260p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2022.

OLIVEIRA, L. A.; FONTENELLE, J. H.; MITIDIÉRI FILHO, C. V. Durabilidade de fachadas: método de ensaio para verificação da resistência à ação de calor e choque térmico. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 53–67, 2014.

OLIVEIRA, M. A. *et al.* Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion processes in aerial lime mortar. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 38–48, 2017.

PAES, I. N. *et al.* Influence of water transportation inside a mortar/block system on bonding resistance behavior. **Revista Ingenieria de Construccion**, v. 29, n. 2, p. 175–186, 2014.

PALOMAR, I.; BARLUENGA, G. A multiscale model for pervious lime-cement mortar with perlite and cellulose fibers. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 136–144, 2018.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M.N.; VAYENAS, C. G. Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete. **Durability of Building Materials and Components**. New York City: Springer, 1990.

PETERS, W. H.; RANSON, W. F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. **Optical Engineering**, n. 3, 1982.

PHAN, V. **Relationship between the adhesive properties and the rheological behavior of fresh mortars**. 2013. 162p. PhD Thesis – École Doctorale Sciences Pratiques, Cachan, 2013.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 56, n. 339, p. 237–243, 2010.

POLITO, G. **Avaliação da introdução da cal hidratação nas argamassas aplicadas sobre blocos cerâmicos e sua influência no desempenho e morfologia**. 2008. 181p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

POLITO, G. **Avaliação do perfil de penetração dos compostos hidratados do aglomerante de argamassas aplicadas sobre bloco cerâmico através de análises químicas, microestruturais, mineralógicas e de resistência de aderência**. 2013. 177p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

POLITO, G.; CARVALHO JUNIOR, A. N.; BRANDÃO, P. R. G. Caracterização microestrutural da interface argamassa mista / bloco cerâmico. **Construindo**, v. 2, n. 2, p. 11–17, 2010.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida**. 2010. 263p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PURNELL, P.; SHORT, N. R.; PAGE, C. L. Super-critical carbonation of glass-fibre reinforced cement. Part 1: Mechanical testing and chemical analysis. **Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 32, n. 12, p. 1777–1787, 2001.

QUANJIN, Ma *et al.* Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, n. xxxx, p. 757–763, 2020.

QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. Influência da cal em propriedades mecânicas de argamassas. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TENCOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis, 2005.

RASHID, K. *et al.* Interfacial performance between repairing mortars and substrate lime: bond strength and carbonation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 5, p. 1–10, 2023.

REDA TAHA, M. M.; SHRIVE, N. G. The use of pozzolans to improve bond and bond strength. *In*: CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, 9., 2001, Cidade. **Anais [...]**. Cidade: instituição organizadora, 2001.

SADOWSKI, L. Multi-scale evaluation of the interphase zone between the overlay and concrete substrate: Methods and descriptors. **Applied Sciences**, v. 7, n. 9, 2017.

SANTOS, A. R. L. *et al.* Tensile bond strength of lime-based mortars: The role of the microstructure on their performance assessed by a new non-standard test method. **Journal of Building Engineering**, v. 29, n. July 2019, 2020.



ŠAVIJA, B.; LUKOVIĆ, M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 285–301, 2016.

SCALCO, L. *et al.* Determination of roughness coefficient in 3D digital representations of rocks. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 1–12, 2022.

SCHEMMER, L. B. **Análise da degradação por CO<sub>2</sub> em cimento classe G com nanoalumina para aplicações em poços de armazenamento geológico de carbono**. 2020. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

PIZZI, A. Phenolic resin adhesives. *In*: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcell Dekker, 2003. Cap. 26.

SENTENA, J. A. A. **Discussão sobre métodos acelerados para a avaliação do envelhecimento de revestimentos de argamassa submetidos a ciclos térmicos: aplicação em argamassa com fíler de concreto**. 2015. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

SENTENA, J. A. A.; KAZMIERCZAK, C. S.; KREIN, L. A. Degradação de revestimentos de argamassa com finos de resíduos de concreto por ciclos térmicos. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 211–224, 2018.

SHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and mechanisms of adhesion. *In*: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcell Dekker, 2003. Cap. 3.

SILFWERBRAND, J.; BEUSHAUSEN, H.; COURARD, L. Bond. *In*: BISSONNETTE, B. *et al.* **Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs and pavements**. RILEM, 2011. p. 51-79.

SILVA, A.; BRITO, J. Service life of building envelopes: A critical literature review. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102646, Apr. 2021.

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V. A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 74–87, 2016.

SKARŻYŃSKI, Ł.; SUCHORZEWSKI, J. Mechanical and fracture properties of concrete reinforced with recycled and industrial steel fibers using Digital Image Correlation technique and X-ray micro computed tomography. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 283–299, 2018.

SMRKIĆ, M. F.; KOŠČAK, J.; DAMJANOVIĆ, D. Application of 2D digital image correlation for displacement and crack width measurement on RC elements. **Gradjevinar**, v. 70, n. 9, p. 771–781, 2018.

SPENCER, Ryan *et al.* An innovative digital image correlation technique for in-situ process monitoring of composite structures in large scale additive manufacturing. **Composite Structures**, v. 276, p. 114545, Aug. 2021.

STOLZ, C. M. **Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/ argamassa de revestimento**. 2015. 206p. Tese (Doutorado em Engenharia Civi) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

STOLZ, C. M. *et al.* Influence of substrate texture on the tensile and shear bond strength of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 298–307, 2016.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 261–271, 2018.

SUTTON, M. A.; ORTEU, J. J.; SCHREIER, H. W. **Image correlation for shape, motion and deformation measurements**. New York: Springer, 2009.

SUTTON, MA *et al.* Determination of displacements using an improved digital correlation method. **Image and Vision Computing**, v. 1, n. 3, p. 133–139, 1983.

THIERY, M. **Modelling of atmospheric carbonation of cement based materials considering the kinetic effects and modifications of the microstructure and the hydric state**. 2005. 331p. Thèse (Doctorat en Structures et Matériaux) – Institut des sciences et technologies de Paris, Paris, 2005.

THORNTON, C.; CUMMINS, S. J.; CLEARY, P. W. On elastic-plastic normal contact force models, with and without adhesion. **Powder Technology**, v. 315, p. 339–346, 2017.

TONIETTO, L. *et al.* Method for evaluating roughness and valley areas coefficients of surfaces acquired by laser scanner. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 2022.

TONIETTO, L. *et al.* New method for evaluating surface roughness parameters acquired by laser scanning. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–16, 2019.

TORRES, I.; VEIGA, R.; FREITAS, V. Influence of substrate characteristics on behavior of applied mortar. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 10, p. 1–13, 2018.

TRACZ, T.; ZDEB, T. Effect of hydration and carbonation progress on the porosity and permeability of cement pastes. **Materials**, v. 12, n. 1, 2019.

VALENTINI, P. **Influência da absorção de água e rugosidade de substratos cerâmicos e da adição de fíler na aderência de argamassas de revestimentos**. 2018. 145p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018.

VAZ, F. H. B.; CARASEK, H. Resistência de aderência de revestimentos de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema. **Cerâmica**, v. 65, p. 303–318, 2019.

VEIGA, R. Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 132–140, 2017.

VORA, S. R. *et al.* Global strain field mapping of a particle-laden interface using digital image correlation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 509, p. 94–101, 2018.

YOON, S. *et al.* Digital image correlation in dental materials and related research: A review. **Dental Materials**, v. 37, n. 5, p. 758–771, 2021.

ZAMPIERI, V. A. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas**: fabricação, hidratação e desempenho mecânico. 1993. 233p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

ZANELATO, E. B. *et al.* Evaluation of roughcast on the adhesion mechanisms of mortars on ceramic substrates. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 52, n. 3, 2019.

ZHANG, H. *et al.* Experimentally informed fracture modelling of interfacial transition zone at micro-scale. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, n. July, 2019.

ZHAO, W. *et al.* Use of digital image correlation to confirm the enhancement of concrete–epoxy resin mortar adhesion through surface pre-coating treatment. **Construction and Building Materials**, v. 295, p. 123512, 2021.

## APÊNDICE A – ENSAIOS-PILOTOS DE CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL QUANDO APLICADO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

- Ensaios-piloto para utilização do método de correlação de imagem digital (CID) em amostras de revestimentos

A técnica de correlação de imagem digital foi implementada neste estudo a fim de obter o módulo de elasticidade de amostras de argamassa, para então correlacionar com o módulo de elasticidade dinâmico e com as amostras de argamassas de revestimento sobre diferentes substratos cerâmicos. Assim, foi possível avaliar se há alteração no módulo de elasticidade quando a argamassa é aplicada em um substrato poroso. Por se tratar de uma técnica nova para materiais de construção civil e principalmente para ensaio de tração direta, foi necessário realizar diversos ensaios-piloto para validar o ensaio.

Na construção civil, esta técnica vem sendo aplicada a concretos em ensaios de compressão e propagação de fissuras (GOLEWSKI, 2019; KOZICKI, TEJCHMAN, 2007; SKARŻYŃSKI, SUCHORZEWSKI, 2018), sendo eventualmente utilizada em amostras de argamassa de reparo em dimensões de 100 x 100 x 600 mm (ZHAO *et al.*, 2021), avaliação de fissuras em argamassas com amostras de 200 x 200 mm (LIU; XIAO; SINGH, 2021) e paredes em escala real (HOWLADER; MASIA; GRIFFITH, 2021). No entanto, o desafio desta metodologia aplicada aos revestimentos moldados inicia no tamanho das amostras. Ao analisar a literatura, é possível observar que as amostras ensaiadas apresentam dimensões elevadas, sendo estas maiores que 10 cm em seu menor lado, porém, neste estudo, as amostras às quais o método foi aplicado apresentavam 20 mm de altura e 50 mm de largura, ou seja, dimensões inferiores à metade do menor lado encontrado na literatura. O tipo de ensaio a ser realizado, neste caso, tração direta, implica em pequenos valores de deformação, na ordem de  $\times 10^{-4}$  mm/mm.

O preparo das amostras da primeira bateria de ensaios consistiu na pintura com tinta *spray* branco fosco, uma demão, sobre a superfície da argamassa, a fim de elevar o contraste entre branco e preto. Após a secagem da tinta, realizou-se a pintura da malha de pontos pretos, utilizando uma caneta esferográfica de ponta fina com espessura de 0,05 mm, conforme apresentado na Figura 1. Em seguida, foram colocadas as pastilhas metálicas para realização do ensaio. Todas as amostras foram

niveladas antes, durante e após a colagem das pastilhas, visto que qualquer desnivelamento nas amostras pode causar variações na forma de ruptura e nas tensões e deformações geradas durante o ensaio.

Figura 1 – Primeiro método de pintura



Fonte: Registrado pela autora (2023).

O primeiro ensaio foi filmado utilizando uma câmera Sony XDCAM capaz de capturar 120 *frames* por segundo com resolução de 1920 x 1080 pixels. Foram utilizadas duas câmeras, uma na direção da amostra e outra na direção do computador que capta as informações da máquina (Figura 2). O intuito da gravação simultânea é para posteriormente sincronizar os dados de tensão para cada *frame* a ser analisado e assim ser possível calcular o módulo de elasticidade da amostra.

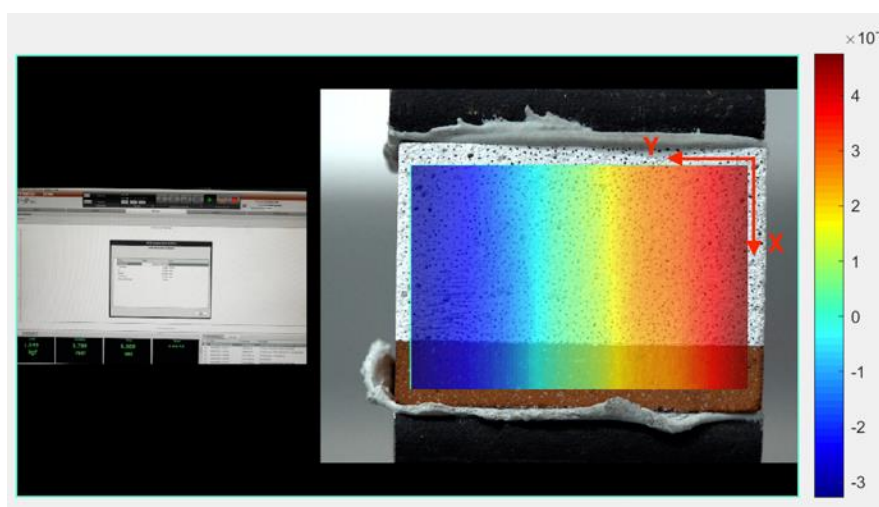
Figura 2 – Cenário do primeiro ensaio de resistência de aderência com aplicação da CID



Fonte: Registrada pela autora.

Este trabalho foi realizado em colaboração com o doutorando de mesmo orientador, Benício de Moraes Lacerda, o qual realizou as análises computacionais dos dados adquiridos nas filmagens. A computação das imagens ocorreu utilizando o *software* Ncorr. Inicialmente foi preciso desmembrar o vídeo em diversas imagens. No *software* devem ser inseridas as seguintes informações: imagem de referência, quantidade de pontos, área de leitura e análises a serem avaliadas. Em seguida, todas as imagens do ensaio são inseridas no *software*, e este calcula o deslocamento e a deformação específica de cada pixel analisado. Após a análise, o *software* permite inserir extensômetros virtuais, os quais indicam os valores de deslocamento naquela direção. As amostras referência (REF) e referência com envelhecimento acelerado (REF E) seguiram esta metodologia, entretanto, ao se analisar os resultados, foi observado que algumas amostras apresentaram valores de compressão durante o ensaio de tração e que, ao realizar os cálculos para obter módulo de elasticidades, estes não eram coerentes com a literatura. Na Figura 3, está apresentada uma imagem obtida por CID.

Figura 3 – Resultados obtidos no primeiro ensaio de resistência de aderência com aplicação do método CID

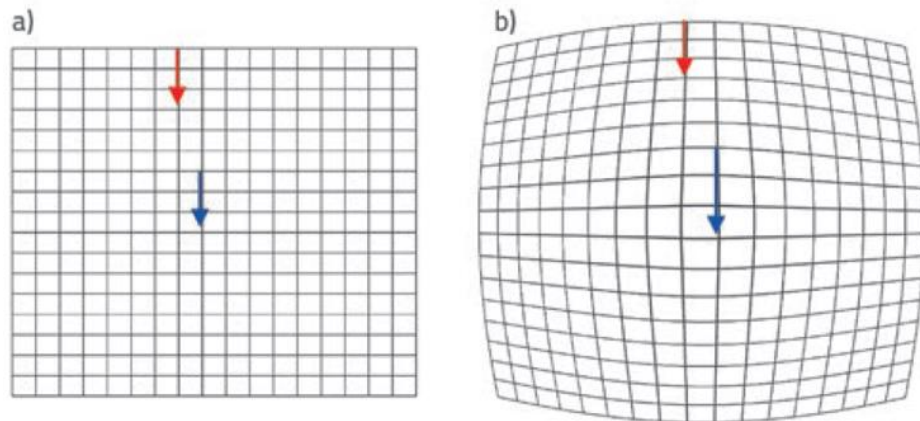


Fonte: Elaborado pela autora e por Lacerda (2023).

Analisada a imagem na direção X, sendo esta a direção da aplicação de carga (sentido de cima para baixo), os valores encontrados acima de 0 representam esforços de compressão e os abaixo de 0 representam esforços de tração. Observa-se que não há coerência nos resultados, visto que o lado esquerdo indica que houve compressão e o lado direito indica que houve tração. Após concluir que o método utilizado de preparação das amostras e aquisição das imagens não foi corretamente aplicado, optou-se por alterar a metodologia. No entanto, os dados de REF e REF E para análise por CID não puderam ser refeitos.

As lentes de câmeras fotográficas apresentam por si só um grau de distorção da imagem. Smrkić, Koščak e Damjanović (2018) citam que dois pontos com mesmo deslocamento vertical, mas localizados na parte superior da lente ou no centro da lente, podem resultar em deslocamentos menores ou maiores do que o deslocamento real, conforme apresentado na Figura 4. Dessa forma, deve-se buscar uma lente com menor distorção possível e posicionar a amostra no centro da lente, a fim de obter um grau de distorção menor do que o encontrado nas bordas. Complementando este item de lente com menor distorção, é necessário utilizar uma distância focal ideal, pois a distância entre a lente e a amostra pode aumentar ou diminuir a distorção. Ainda, a câmera precisa estar perpendicular à amostra, uma vez que a medição de um ponto vista em ângulo pode alterar o real comprimento do deslocamento.

Figura 4 – Distorção da lente da câmera



Fonte: Smrkić, Koščak e Damjanović (2018, p. 773).

Portanto, os resultados ideais para o método CID dependem da resolução da câmera, da largura e altura da amostra, da distância focal e da qualidade dos pontos. A câmera, além da distorção da lente, apresenta um erro de ajuste baseado no tamanho dos pixels e no tamanho da amostra. Logo, a resolução da câmera é baseada nas dimensões dos pixels que ditarão o erro presente na câmera. A fórmula para o cálculo do erro da câmera se encontra na Erro da câmera =  $\frac{\text{Dimensão de uma dos lados (exemplo largura)}}{\text{Pixels na mesma direção}} = \frac{\text{mm}}{\text{pixels}}$  (Equação 2.

$$\text{Erro da câmera} = \frac{\text{Dimensão de uma dos lados (exemplo largura)}}{\text{Pixels na mesma direção}} = \frac{\text{mm}}{\text{pixels}} \quad (\text{Equação 2})$$

Considerando que o ensaio de tração em argamassas de revestimento resulta em deslocamentos na ordem de  $\times 10^{-3}$  a  $\times 10^{-4}$  mm/mm, o erro da câmera obrigatoriamente tem que ser inferior ao deslocamento esperado, caso contrário, o *software* poderá ler as movimentações provenientes do erro da câmera em vez dos deslocamentos reais. Ao avaliar a câmera utilizada anteriormente, observou-se que o erro se encontrava na ordem de 0,046 mm, ou seja,  $\times 10^{-2}$  mm, superior ao esperado no deslocamento, originando um dos equívocos cometidos na metodologia anterior. Portanto, optou-se pela troca da câmera. Entretanto, não há, na instituição em que a pesquisa foi realizada, filmadoras disponíveis com maior resolução do que a utilizada, dessa forma, optou-se por utilizar uma câmera fotográfica e fazer repetidas fotos durante o ensaio.



A qualidade da malha de pontos é de extrema relevância para a precisão dos resultados, visto que o *software* é baseado na correlação entre os pixels da imagem de referência com os pixels da imagem já movimentada. O *software* Ncorr mapeia a coloração dos pixels, sabendo que cada pixel armazena um determinado valor de escala de cinza, variando de 0 a 255. Ao encontrar colorações iguais, cria-se os chamados subconjuntos ou janelas de correlação, que serão correlacionados com os subconjuntos da imagem referência para medir o seu respectivo deslocamento (LECOMPTE *et al.*, 2006). Desse modo, alguns cuidados devem ser tomados para que o *software* registre o deslocamento real. A iluminação é um fator que influencia na captura da malha, pois qualquer sombra que um ponto possa fazer no outro irá alterar a composição da malha, assim como pouca iluminação tornará as escalas de cores muito próximas, dificultando a leitura do *software*. Utilizando um *software* semelhante ao Ncorr, chamado de GOM Correlate, é possível avaliar a qualidade da malha. Inicialmente foi realizada a verificação da malha no modelo de pontos já utilizado nas amostras REF e REF E. O resultado está apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Qualidade da malha do primeiro ensaio de resistência de aderência com aplicação do método CID



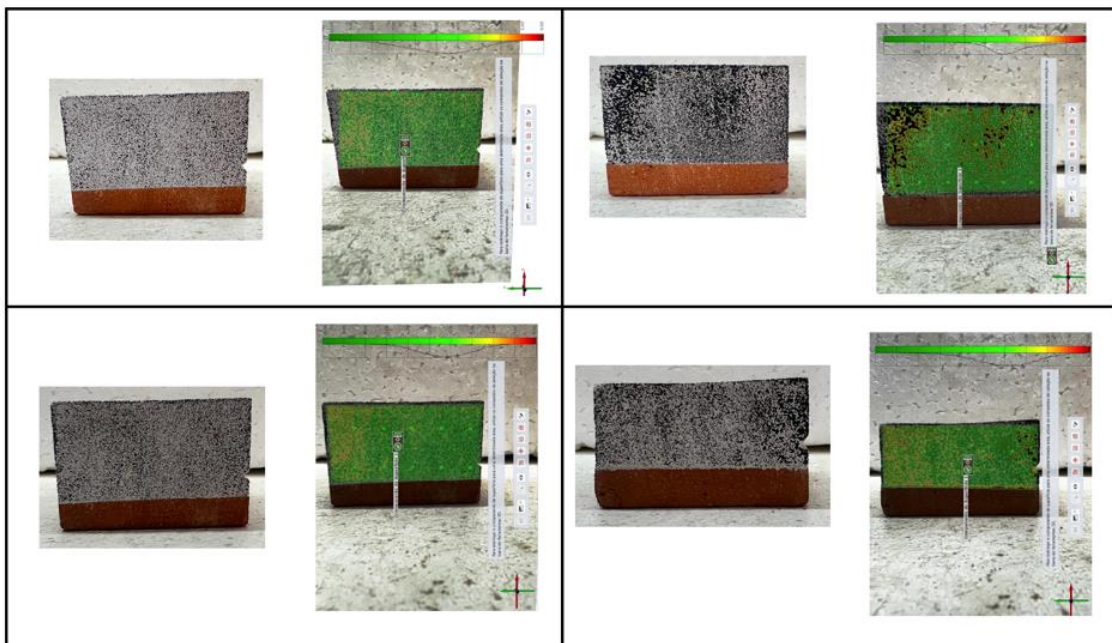
Fonte: Elaborado pela autora e por Lacerda (2023).

Na escala de qualidade do GOM Correlate, em que 10 representa uma malha excelente e 0, uma malha ruim, é possível notar que os pontos utilizados anteriormente não atingiram a qualidade esperada, pois a imagem apresentou mais

pixels brancos do que pixels pretos ou cinzas. Estudos indicam que o erro na precisão dos resultados está relacionado com o tamanho dos pontos, a densidade e a uniformidade (LIU *et al.*, 2015). O resultado dos deslocamentos é expresso no ponto central do subconjunto, a partir da média de deslocamento dos pixels que o compõem (LECOMPTE *et al.*, 2006). Segundo Lecompte *et al.* (2006), os pontos devem ser aleatórios, não uniformes, e com elevado contraste para a captação das deformações. Além disso, para os autores, o tamanho dos pontos interfere na correlação de imagem no *software*, assim como a área real disponível para acomodação dos pixels, ou seja, a distância focal da amostra com a lente (LECOMPTE *et al.*, 2006). A partir das considerações dos autores mencionados, concluiu-se que o tamanho dos pontos precisaria ser da ordem de 0,026 mm a 0,13 mm, com maior densidade.

Considerando a literatura, novos testes de pintura foram realizados. Inicialmente foi retirada a camada de tinta fosca branca, visto que a tinta apresenta maior elasticidade do que a argamassa, podendo interferir na movimentação dos pontos. Realizou-se a pintura direto na argamassa com a utilização de um material absorvente com irregularidades (esponja), que foi mergulhado em tinta fosca preta e aplicado sobre a superfície da amostra com pequenas batidas. Foram obtidas diferentes intensidades na quantidade de tinta preta. Na Figura 6 estão apresentados os testes e os resultados da qualidade de malha no *software* GOM Correlate.

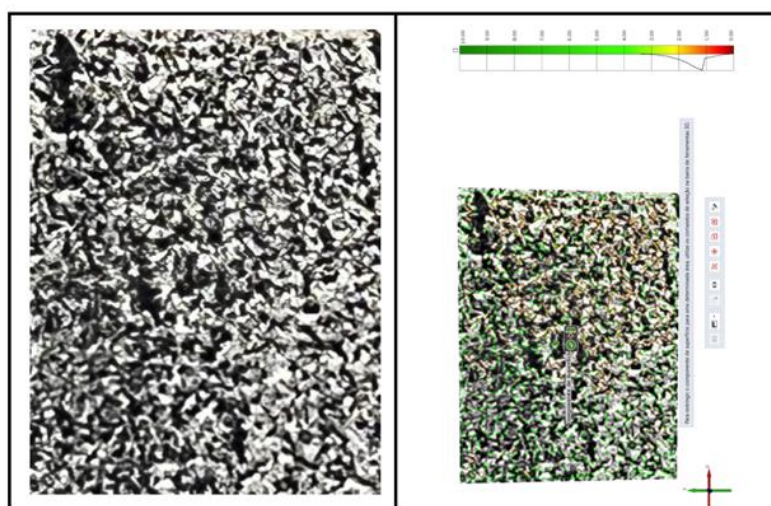
Figura 6 – Testes de pintura com esponja e seus respectivos resultados



Fonte: Elaborada pela autora e por Lacerda (2023).

Por meio da observação das imagens, é possível concluir que a malha acusa estar em uma faixa mediana de qualidade, no entanto, a iluminação, a distância focal em torno de 15 cm e a qualidade da câmera com resolução de 3024 x 4032 não atendem ao indicado pela literatura para elevada precisão. Ao aproximar a câmera, ocorre a distorção de imagem, o foco não é uniforme e a malha é prejudicada, conforme apresentado na Figura 7. Além do teste da esponja, foram testados processos de pintura dos pontos utilizando *spray*, compressor e escova metálica, que resultaram em malhas não adequadas.

Figura 7 – Testes de pintura com esponja em área de 20 x 25 mm e seus respectivos resultados



Fonte: Elaborado pela autora e por Lacerda (2023).

Ao realizar os ensaios descritos, concluiu-se que, para atingir a precisão do erro de câmera, a distância focal obrigatoriamente tem que ser reduzida a fim de preencher os pixels disponíveis em uma área de largura 20 mm e altura em torno de 25 mm. Todavia, com essa distância, o foco é comprometido e o tamanho dos pontos não atende ao que a literatura exemplifica. Dessa forma, optou-se por aplicar uma fina camada, na ordem de micrometros, de gesso, que apresenta baixa resistência à tração e não comprometeria as deformações causadas na argamassa apenas nivelaria a superfície.

Posteriormente o gesso foi lixado com lixas de grana 300, 500 e 600, e, com o auxílio de um microscópio ótico, observou-se a rugosidade superficial para garantir maior nivelamento. Considerando que o tamanho dos pontos ideais é

significativamente pequeno, foi testado um conjunto de agulhas, comumente utilizado na área da dermatologia para procedimento de microagulhamento.

Definido o tipo de método a ser utilizado para a produção da malha de pontos, também foram testados diversos tipos de tinta, visto que tintas com alto brilho não seriam ideais pois refletem a iluminação do ambiente, podendo alterar a coloração e por consequência a escala de cores no Ncorr. Tintas com elevada viscosidade prejudicavam a malha de pontos, pois a distância entre as agulhas origina um canal de sucção, portanto, ao mergulhar as agulhas na tinta e depositá-las na superfície, criava-se pontos com dimensões superiores às previstas. Foi testada tinta de carimbo, mas a coloração desta quando aplicada sobre o gesso aproximava-se de tons de cinza, diminuindo o contraste entre o branco e o preto e alterando a precisão dos resultados. Por fim, foi definida a utilização de tinta aplicada sobre uma superfície lisa e sem contaminações na qual as agulhas eram mergulhadas e posteriormente submetidas a sucessivas batidas suave na superfície da argamassa.

Após a definição do método de preparo da amostra, foram analisadas diferentes câmeras com resoluções distintas, ajustes diferentes para melhor aquisição dos dados. Por fim, a câmera escolhida foi uma Canon EF-M 28 mm F/3.5 Macro IS STM, ISO 800, f/5, velocidade 1/250, com resolução de 6.960 x 4640 pixels. A distância focal da amostra para a câmera foi de 30 mm em uma área de amostra de 20 x 20 mm. Tendo em vista que o interesse de análise é na direção do carregamento, optou-se por adequar a maior quantidade de pixels na direção de interesse a fim de obter um erro inferior, resultando em um erro de 0,00033 mm/pixel, ou seja,  $\times 10^{-4}$  mm/pixel. Foi realizado o disparo da câmera através de *software* Camera Connect (versão 3.1.1.4.4), instalado em dispositivo móvel, com o intuito de não ter influência de movimentações devido ao contato com a câmera durante o ensaio. As imagens foram capturadas uma a cada 5 segundos até o momento de ruptura. Para iluminação, foram utilizadas quatro fitas de led, com alta intensidade, na cor branca.

O ensaio consistiu inicialmente na captura de uma imagem com escala e numeração, a fim de obter os tamanhos reais e a identificação da amostra para posterior correlação. Foi utilizada a câmera na amostra, como já apresentado anteriormente, e a tela do computador que monitora o ensaio foi filmada de forma simultânea, com o intuito de correlacionar a tensão com as deformações no mesmo instante.

A partir da correlação entre os *frames* obtidos da tela do computador e as fotos, foi possível obter a carga no momento em que a foto foi tirada, obtendo as tensões aplicadas e a deformação na mesma imagem para enfim calcular o módulo de elasticidade.

## APÊNDICE B – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO EM AMOSTRAS DE 50 X 70MM – COEFICIENTE DE CAPILARIDADE

Resultados individuais de cada substrato quanto ao coeficiente de capilaridade.

Identificação (substrato 1)	Corpo de prova	Coeficiente de capilaridade (g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )	Identificação (substrato 2)	Corpo de prova	Coeficiente de capilaridade (g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )
1B11A1	1	0,589	2B11A1	82	0,269
1B11A2	2	0,640	2B11A3	83	0,424
1B11B1	3	0,637	2B11A4	84	0,361
1B11B2	4	0,633	2B11B1	85	0,330
1B12A1	5	0,649	2B11B2	86	0,381
1B12A2	6	0,738	2B21A1	87	0,281
1B12B1	7	0,650	2B21A2	88	0,238
1B12B2	8	0,716	2B21A3	89	0,322
1B21A1	9	0,673	1B21A4	90	0,359
1B21A2	10	0,633	2B21B1	91	0,319
1B21B1	11	0,553	2B21B2	92	0,263
1B21B2	12	0,669	2B21B3	93	0,313
1B22A1	13	0,582	2B21B4	94	0,338
1B22A2	14	0,629	2B22A1	95	0,442
1B22B1	15	0,625	2B22A2	96	0,454
1B32A1	16	0,652	2B22A3	97	0,386
1B32A2	17	0,666	2B22A4	98	0,391
1B32B1	18	0,627	2B22B1	99	0,468
1B32B2	19	0,709	2B22B2	100	0,458
1B41A1	20	0,618	2B22B3	101	0,409
1B41A2	21	0,606	2B22B4	102	0,400
1B41B1	22	0,605	2B31A1	103	0,319
1B41B2	23	0,563	2B31A2	104	0,365
1B42A1	24	0,4897	2B31A3	105	0,349
1B42A2	25	0,642	2B31A5	106	0,311
1B52A1	26	0,616	2B31B2	107	0,390
1B52A2	27	0,624	2B31B3	108	0,421
1B52B1	28	0,674	2B32A1	109	0,319
1B52B2	29	0,655	2B32A3	110	0,371
1B61A1	30	0,565	2B32B1	111	0,361
1B61A2	31	0,540	2B32B4	112	0,332

1B61B1	32	0,549	2B41A1	113	0,462
1B61B2	33	0,627	2B41A2	114	0,401
1B71A1	34	0,632	1B41A3	115	0,383
1B71A2	35	0,621	2B41A4	116	0,357
1B71B1	36	0,596	2B41B2	117	0,371
1B71B2	37	0,772	2B41B3	118	0,457
1B72A1	38	0,570	2B42A1	119	0,506
1B72B1	39	0,648	2B42A3	120	0,440
1B72B2	40	0,603	2B42A4	121	0,505
1B81A1	41	0,517	2B42B3	122	0,439
1B81A2	42	0,575	2B42B4	123	0,390
1B81B1	43	0,579	2B51A1	124	0,460
1B81B2	44	0,551	2B51A2	125	0,392
1B82A1	45	0,658	2B51A3	126	0,511
1B82A2	46	0,464	2B51A4	127	0,446
1B91A1	47	0,590	2B51B1	128	0,366
1B91A2	48	0,577	2B51B2	129	0,343
1B91B2	49	0,605	2B51B3	130	0,531
1B92A1	50	0,552	2B51B4	131	0,418
1B92A2	51	0,679	2B61A3	132	0,667
1B92B1	52	0,542	2B61B3	133	0,465
1B92B2	53	0,564	2B62A1	134	0,348
1B101A2	54	0,595	2B62A2	135	0,363
1B101B1	55	0,588	2B62A3	136	0,413
1B101B2	56	0,556	2B62B1	137	0,380
1B102A1	57	0,548	2B62B2	138	0,403
1B102A2	58	0,579	2B62B3	139	0,418
1B102B2	59	0,582	2B62B4	140	0,429
1B111A1	60	0,508	2B71A1	141	0,479
1B111A2	61	0,508	2B71A2	142	0,405
1B111B1	62	0,511	2B71A3	143	0,393
1B111B2	63	0,542	2B71A4	144	0,348
1B112A1	64	0,600	2B71B1	145	0,386
1B112A2	65	0,594	2B71B2	146	0,424
1B191A1	66	0,544	2B71B4	147	0,386
1B191A2	67	0,533	2B72A1	148	0,419
1B191B1	68	0,498	2B72A2	149	0,516
1B191B2	69	0,596	2B72A3	150	0,474
1B192A1	70	0,490	2B72A4	151	0,412
1B192A2	71	0,500	2B72B1	152	0,328

1B192B1	72	0,554	2B72B2	153	0,404
1B192B2	73	0,562	2B72B3	154	0,414
1B201A1	74	0,578	2B72B4	155	0,390
1B201A2	75	0,547	2B72B5	156	0,430
1B201B1	76	0,522	2B81A3	157	0,471
1B201B2	77	0,561	2B81A4	158	0,426
1B202A1	78	0,457	2B81B2	159	0,5497
1B202A2	79	0,552	2B81B3	160	0,460
1B202B1	80	0,457	2B81B4	161	0,486
1B202B2	81	0,531			

Legenda: A rugosidade das células em cinza foi ensaiada s quanto ao coeficiente de capilaridade + rugosidade.



## APÊNDICE C – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO EM AMOSTRAS DE 50 X 70MM – RUGOSIDADE

Resultados individuais de cada substrato quanto aos dados de rugosidade.

Legenda:  $\Delta_L(\text{min})$  – área mínima;  $\Delta_L(\text{máx})$  – área máxima;  $\Delta_s$  – soma das áreas superficiais; Ra (AVG) – coeficiente de rugosidade médio; Ra (SDV) – desvio-padrão do coeficiente de rugosidade médio;  $\Delta_{\text{avg}}$  (AVG) – área média do vale;  $\Delta_{\text{avg}}$  (SDV) – desvio-padrão da área média do vale.

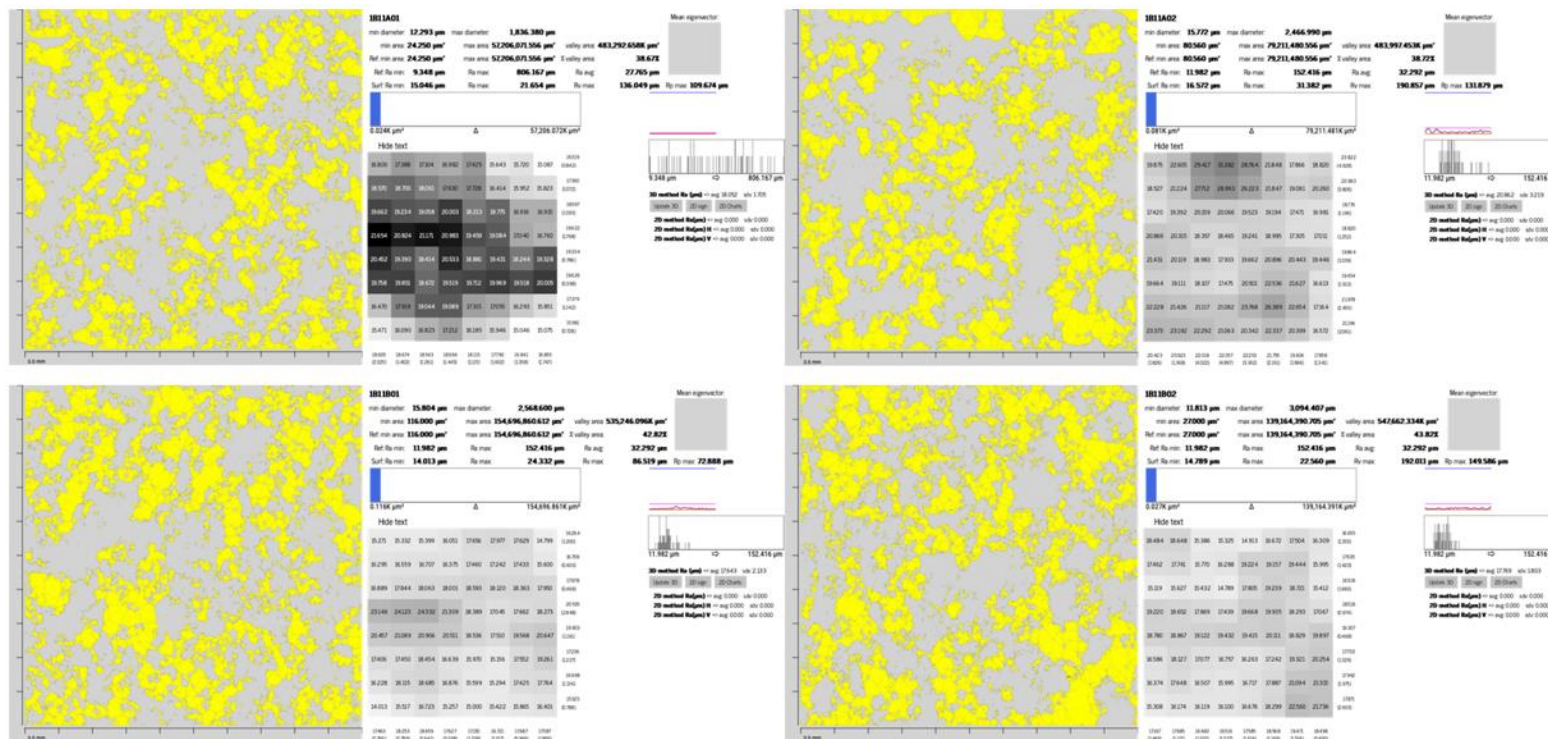
Amostra	$\Delta_L(\text{min})$	$\Delta_L(\text{máx})$	$\Delta_s$	Ra (AVG)	Ra (SDV)	$\Delta_{\text{avg}}$ (AVG)	$\Delta_{\text{avg}}$ (SDV)
1B11A01	24,2500	57.206.071,5556	483.292.658,1245	18,0521	1,7045	0,0810	1,3381
1B11A02	80,5600	79.211.480,5560	483.997.452,5404	20,8617	3,2193	0,1031	1,6874
1B11B01	116,0000	154.696.860,6116	535.246.095,6236	17,6434	2,1329	0,0983	2,9791
1B11B02	27,0000	139.164.390,7049	547.662.334,1268	17,7686	1,8027	0,0833	2,5074
1B12A01	31,8737	224.920.343,3217	554.560.580,2445	16,7914	2,8445	0,0933	3,2593
1B12A02	88,7050	240.184.468,1246	491.068.798,4678	22,8177	7,0843	0,1235	4,5986
1B12B01	75,5000	288.595.948,9931	653.811.452,9919	16,0644	2,3726	0,1349	4,7391
1B12B02	46,2500	376.159.320,6875	574.930.322,7292	16,7458	2,7770	0,1233	5,6213
2B21A01	104,0000	487.478.496,4115	638.863.638,0943	34,2817	5,9163	0,3028	10,7101
2B21A02	80,3037	197.223.725,9545	545.458.882,3444	43,6969	11,8620	0,2634	5,4922
2B21A03	96,9700	508.338.582,0181	663.371.737,4618	32,4832	5,6609	0,2220	9,3597
2B21A04	71,1600	524.052.534,8326	652.578.197,1755	32,5326	7,2672	0,2651	10,6309
2B21B01	45,6600	273.349.826,3617	538.297.054,3406	39,6106	27,1738	0,1549	5,1644
2B21B02	79,0000	409.595.775,0799	557.363.106,7616	34,5359	9,3464	0,2017	7,8297

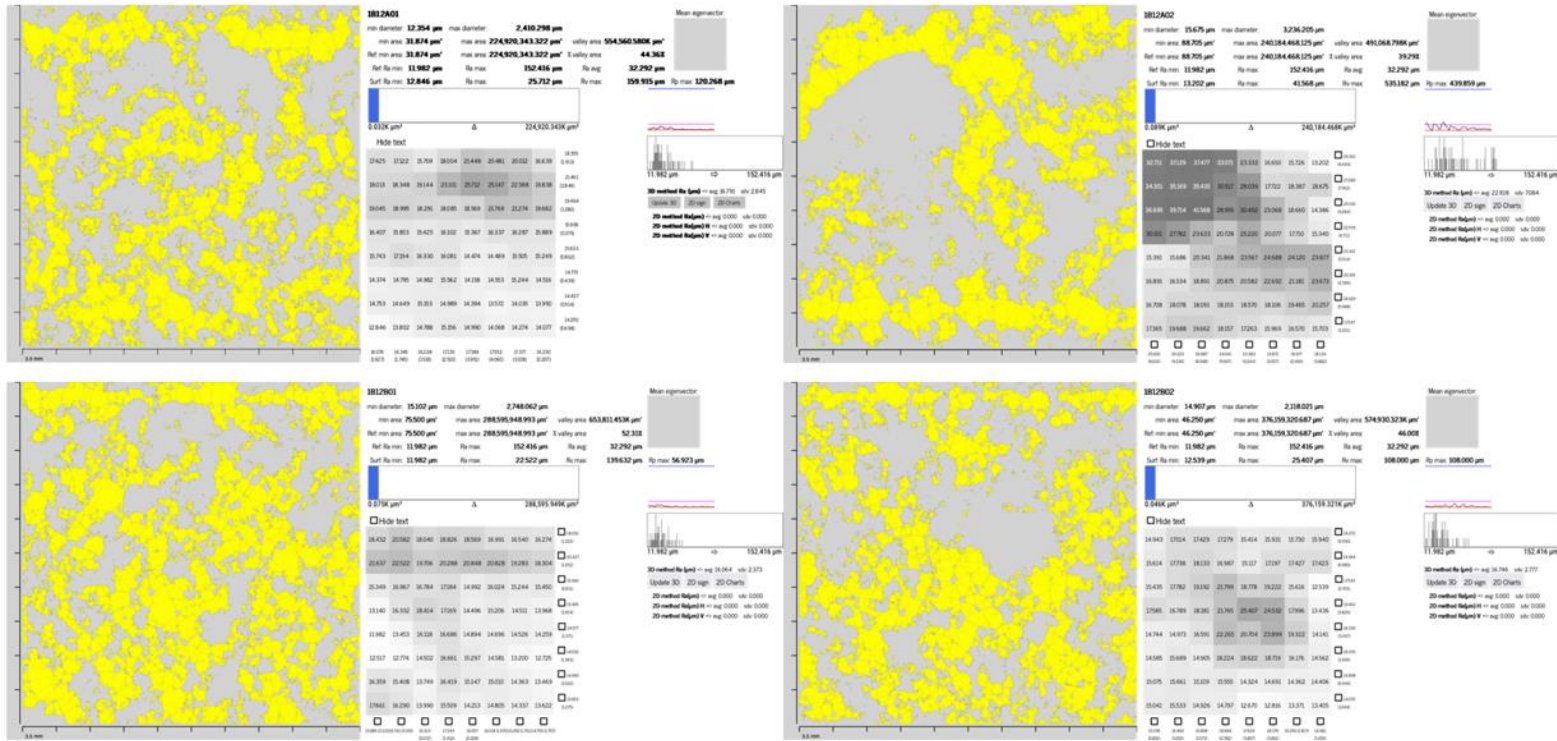
<b>2B21B03</b>	37,3875	538.284.387,3716	670.996.274,2090	25,8653	2,8440	0,1767	8,8019
<b>2B21B04</b>	12,0000	484.049.233,2008	693.294.391,6684	55,3672	29,2786	0,3216	11,2248
<b>2B51A01</b>	102,0800	516.098.711,3798	632.989.084,9796	27,9352	7,6234	0,2458	10,2038
<b>2B51A02</b>	86,0000	357.429.677,4340	563.273.620,5174	21,9781	4,0849	0,1405	5,7486
<b>2B51A03</b>	40,5000	249.338.389,3553	482.801.755,2778	47,3841	22,5136	0,2723	6,2149
<b>2B51A04</b>	89,5000	222.591.039,0379	525.269.380,3373	47,7641	21,2295	0,2338	5,1932
<b>2B51B01</b>	44,2500	572.381.702,2407	649.585.225,0324	34,0184	8,3356	0,3426	13,1733
<b>2B51B02</b>	102,0000	175.562.860,4115	629.740.830,0966	21,2250	4,8154	0,1504	4,4121
<b>2B51B03</b>	87,0000	308.739.513,7778	559.626.419,9117	48,2640	18,4606	0,2548	7,0134
<b>2B51B04</b>	119,2550	232.165.847,9822	554.285.517,8991	55,6445	36,3795	0,2923	6,7501

# APÊNDICE D – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO EM AMOSTRAS DE 50 X 70MM - ÁREA DE VALES

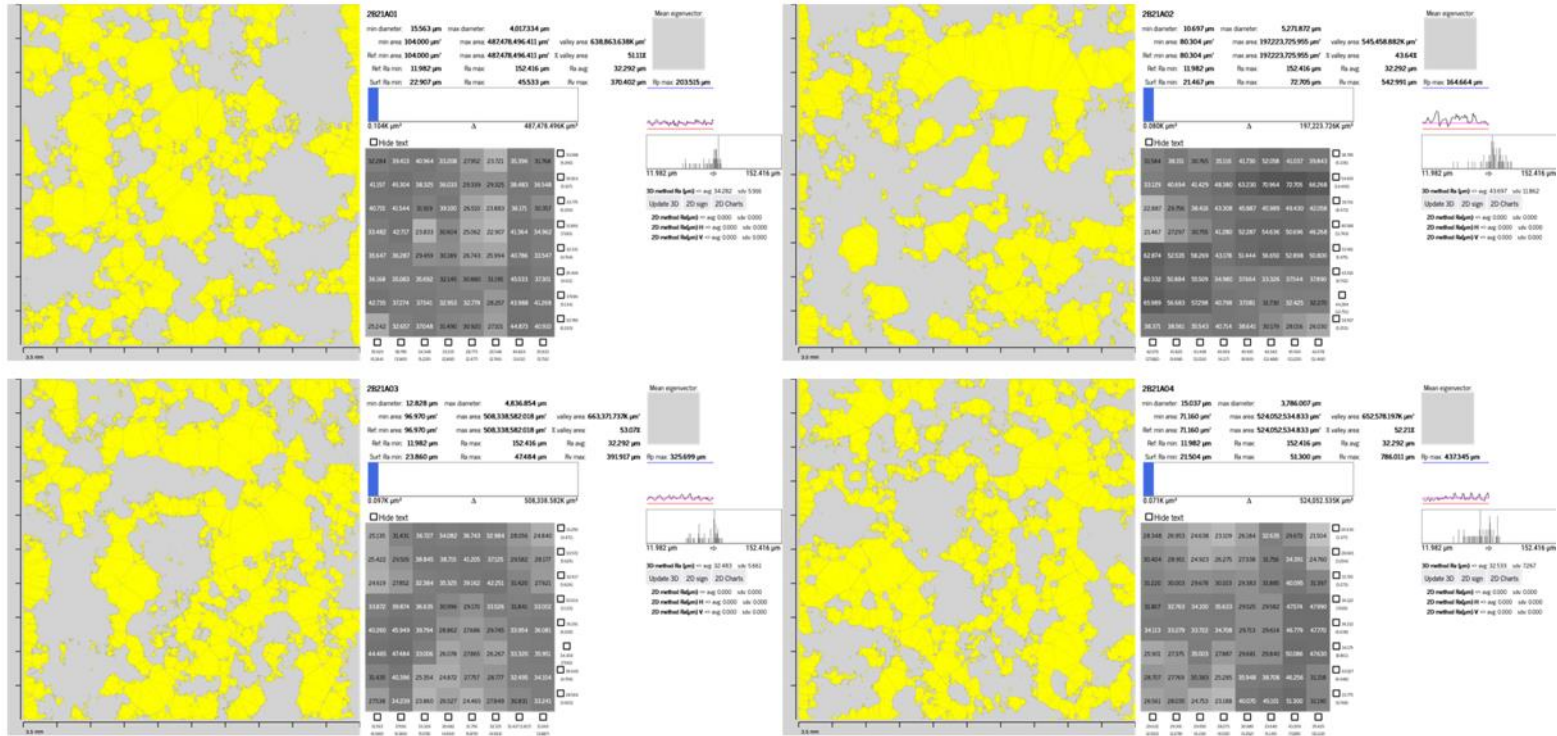
Resultados individuais de cada substrato quanto à assinatura de rugosidade.

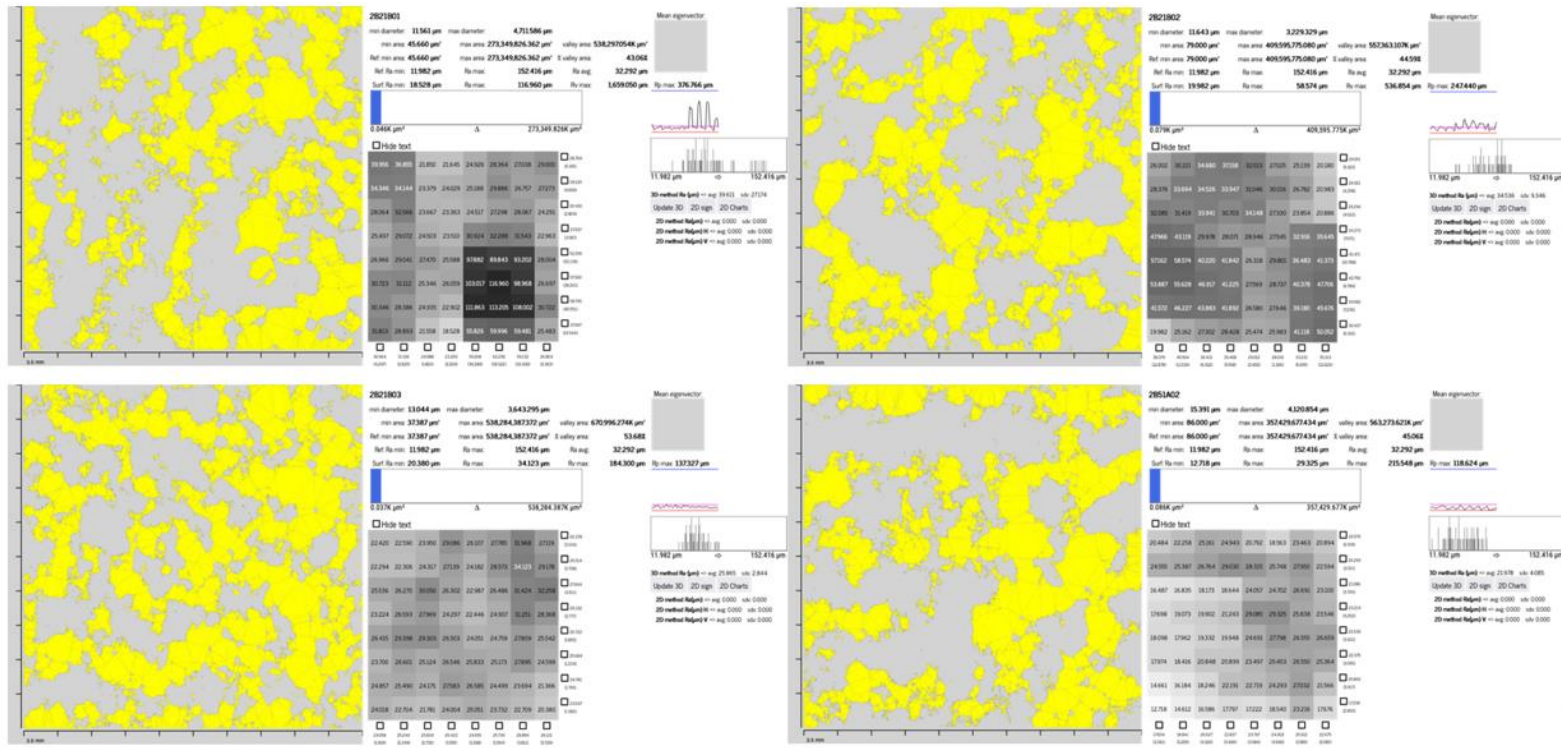
## SUBSTRATO 1:

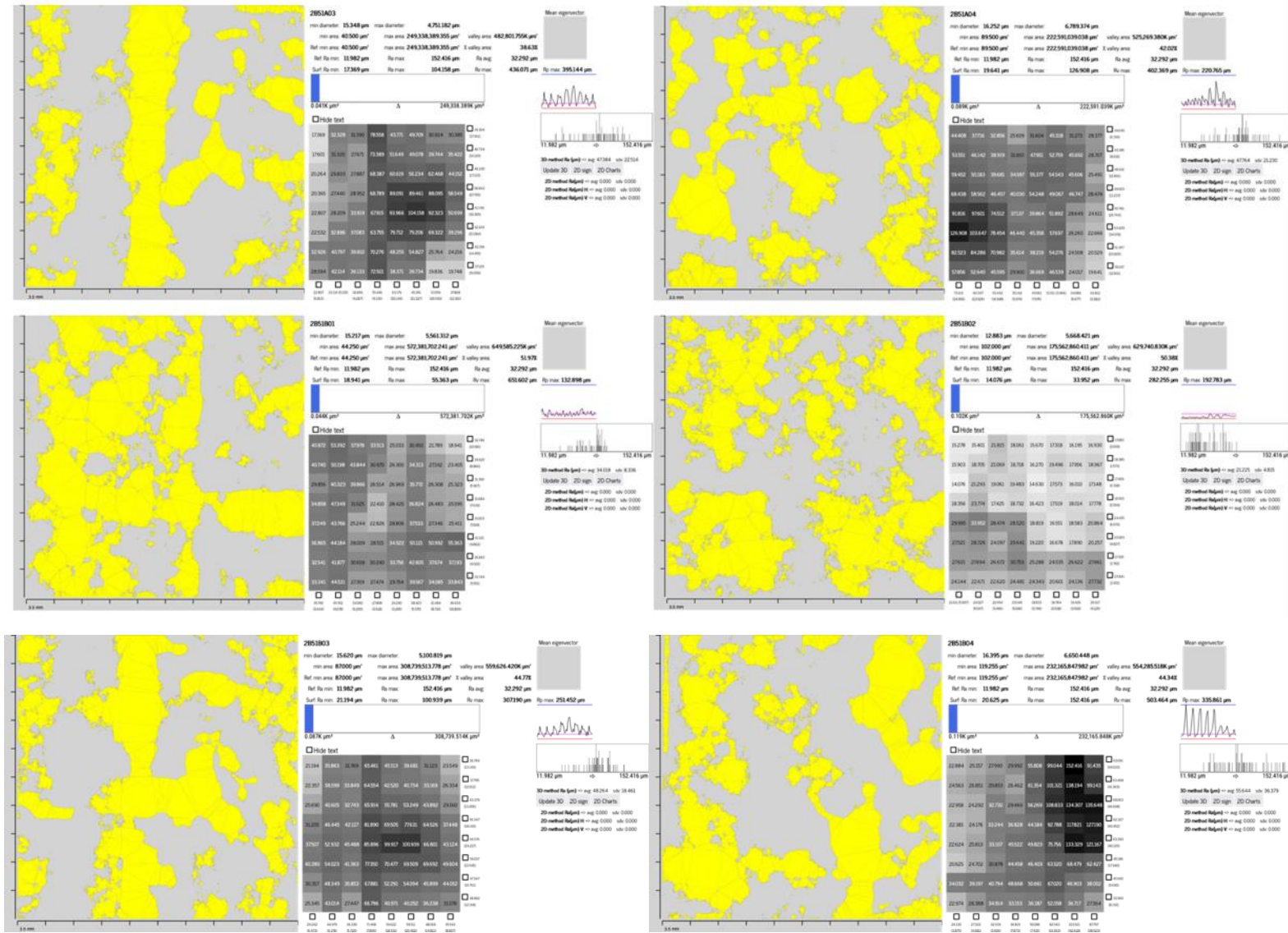




SUBSTRATO 2:







## APÊNDICE E – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA (40 X 40 X 160MM)

Resultados individuais para as amostras 40 x 40 x 160 mm nas quatro variáveis de estudo, bem como os resultado da análise estatística ANOVA, entre cada variável.

Módulo de elasticidade (GPa)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS		0,0012934	SIM
10,37	11,25	11,22	10,45	REF	REF E	0,0045102	SIM
9,55	11,11	10,91	10,50	CARB	CARB E	0,1558063	NÃO
10,45	11,44	10,98	10,80	REF	CARB	0,0257000	SIM
10,31	12,05	10,53	10,79	REF E	CARB E	0,0107330	SIM
Densidade de massa (kg/cm <sup>3</sup> )							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS		1,1560E-07	SIM
1697,77	1754,27	1777,77	1789,12	REF	REF E	4,3272E-04	SIM
1708,24	1780,54	1780,63	1792,09	CARB	CARB E	1,3658E-02	SIM
1715,67	1765,53	1784,89	1808,30	REF	CARB	2,7219E-05	SIM
1725,57	1770,68	1780,28	1795,72	REF E	CARB E	6,1156E-03	SIM
Tração na flexão (MPa)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS		0,13057645	NÃO
2,81	3,02	2,99	2,31	REF	REF E	0,20806643	NÃO
2,88	2,12	3,50	2,33	CARB	CARB E	0,08910058	NÃO
2,83	2,59	3,21	2,63	REF	CARB	0,74334329	NÃO
3,06	2,74	2,25	2,43	REF E	CARB E	0,38739769	NÃO
Resistência à compressão (MPa)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS		1,7731E-05	SIM
5,04	11,04	6,84	7,01	REF	REF E	1,9469E-05	SIM
5,33	11,32	6,80	6,01	CARB	CARB E	6,2449E-01	NÃO
5,48	10,14	5,97	7,38	REF	CARB	1,8885E-01	NÃO
5,93	10,04			REF E	CARB E	1,2461E-02	SIM
5,55	7,60						
3,93	7,59						
6,94	8,79						
7,02	9,80						
Absorção de água total (%)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS		1,5521E-16	SIM
16,96	16,88	14,87	15,12	REF	REF E	8,5409E-03	SIM



17,00	16,55	14,61	14,83	CARB	CARB E	5,6511E-01	NÃO
16,96	16,87	14,67	15,11	REF	CARB	2,4575E-11	SIM
16,75	16,87	14,36	14,87	REF E	CARB E	8,6159E-08	SIM
17,07	15,96	15,28	14,85				
16,78	16,27	15,03	14,69				
16,99	16,61	14,92					
17,24	16,63	14,95					
Índice de vazios (%)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS		2,1011E-14	SIM
29,32	29,89	26,72	29,14	REF	REF E	5,6372E-01	NÃO
29,56	29,54	26,70	28,93	CARB	CARB E	9,8231E-08	SIM
29,80	30,08	26,79	29,33	REF	CARB	2,6899E-10	SIM
29,54	30,08	26,17	28,99	REF E	CARB E	1,1464E-02	SIM
29,63	28,78	27,32	28,92				
29,02	29,32	27,30	28,59				
29,38	29,78	27,09					
29,67	29,30	27,22					
Coeficiente de capilaridade (g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS		7,0370E-10	SIM
0,554	0,658	1,050	0,863	REF	REF E	3,3187E-04	SIM
0,517	0,879	1,042	0,969	CARB	CARB E	3,7285E-01	NÃO
0,505	0,792	0,947	0,913	REF	CARB	2,0453E-09	SIM
0,546	0,777	0,902	1,135	REF E	CARB E	1,3441E-03	SIM
0,453	0,559	0,951	0,971				
0,482	0,890	0,905	1,140				
0,546	0,597	0,849					
0,453	0,665						

## APÊNDICE F – DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTO

Resultados individuais para as amostras de revestimento nas quatro variáveis de estudo, bem como os resultado da análise estatística ANOVA, entre cada variável.

### Substrato 1:

Absorção de água total (%)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS			
13,21	14,52	13,53	13,79	REF	REF E	5,74E-05	SIM
13,50	14,86	13,62	13,80	CARB	CARB E	1,67E-03	SIM
13,58	14,52	13,51	14,03	REF	CARB	1,97E-02	SIM
				REF E	CARB E	3,52E-01	NÃO
						5,34E-03	SIM

Índice de vazios (%)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS			
24,36	26,67	25,22	25,91	REF	REF E	2,81E-05	SIM
24,68	27,11	25,11	25,95	CARB	CARB E	6,29E-04	SIM
24,81	26,52	24,84	26,42	REF	CARB	6,52E-03	SIM
				REF E	CARB E	6,60E-02	NÃO
						4,98E-02	SIM

Coeficiente de capilaridade (g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS			
0,428	0,479	0,232	0,498	REF	REF E	4,06E-09	SIM
0,143	0,398	0,195	0,582	CARB	CARB E	6,11E-03	SIM
0,285	0,389	0,246	0,481	REF	CARB	3,32E-10	SIM
0,218	0,441	0,224	0,543	REF E	CARB E	1,41E-01	NÃO
0,222	0,500	0,189	0,561			1,33E-03	SIM
0,344	0,405	0,260	0,528				
0,364		0,232	0,522				

Resistência de aderência (MPa)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS			
0,753	0,573	0,047	0,275	REF	REF E	1,75E-16	SIM
0,543	0,249	0,054	0,460	CARB	CARB E	7,48E-06	SIM
0,491	0,572	0,015	0,474	REF	CARB	2,82E-08	SIM
0,595	0,135	0,089	0,383	REF E	CARB E	6,41E-15	SIM
0,551	0,459	0,089	0,176			8,01E-01	NÃO
0,663	0,297	0,011	0,538				
0,823	0,479	0,017	0,275				

0,739	0,430	0,019	0,368
0,838	0,425	0,030	
0,766	0,389	0,027	
0,813	0,142	0,013	
0,839	0,371	0,026	
0,749	0,475		
0,600			
0,465			
0,492			

### Substrato 2:

Absorção de água total (%)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS			
12,68	13,90	8,38	12,15	REF	REF E	0,061457	NÃO
12,32	13,19	12,97	12,66	CARB	CARB E	0,873614	NÃO
12,98	13,21	17,57	12,77	REF	CARB	0,911340	NÃO
				REF E	CARB E	0,039790	SIM

Índice de vazios (%)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS			
23,79	25,80	16,34	23,50	REF	REF E	0,058213	NÃO
23,26	24,61	24,19	24,27	CARB	CARB E	0,996531	NÃO
24,34	24,80	31,59	24,42	REF	CARB	0,958900	NÃO
				REF E	CARB E	0,096708	NÃO

Coeficiente de capilaridade (g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS			
0,193	0,468	0,401	0,668	REF	REF E	3,20E-05	SIM
0,272	0,414	0,397	0,471	CARB	CARB E	1,61E-02	SIM
0,257	0,447	0,494	0,575	REF	CARB	3,76E-06	SIM
0,221	0,351	0,438	0,500	REF E	CARB E	1,65E-03	SIM
0,321	0,375	0,554	0,657				
0,195	0,452	0,502	0,639				
0,252		0,492	0,510				

Resistência de aderência (Mpa)							
Variável				ANOVA		p-valor	Significância
REF	REF E	CARB	CARB E	ENTRE TODOS			
0,512	0,112	0,032	0,540	REF	REF E	1,10E-03	SIM
0,818	0,348	0,028	0,458	CARB	CARB E	3,36E-04	SIM
0,579	0,505	0,011	0,309	REF	CARB	2,30E-08	SIM

1,040	0,157	0,022	0,169	REF E	CARB E	9,08E-01	NÃO
0,516	0,359	0,033	0,584				
0,834	0,967	0,014					
0,883	0,317						
1,117							
0,998							
0,933							
0,827							
0,422							
0,797							
0,809							
0,901							

### Análise entre substrato 1 e substrato 2:

Legenda: MG – módulo de elasticidade geral; MS – módulo de elasticidade superior; MC – módulo de elasticidade central; MI – módulo de elasticidade inferior.

Coeficiente de capilaridade ( $g/cm^2 \cdot h^{1/2}$ )			
ANOVA		p-valor	Significância
REF 1	REF 2	0,331283	NÃO
REF E 1	REF E 2	0,524488	NÃO
CARB 1	CARB 2	0,000000	SIM
CARB E 1	CARB E 2	0,221374	NÃO
Resistência de aderência (MPa)			
ANOVA		p-valor	Significância
REF 1	REF 2	0,04636	SIM
REF E 1	REF E 2	0,91116	NÃO
CARB 1	CARB 2	0,28291	NÃO
CARB E 1	CARB E 2	0,60305	NÃO
Módulo de elasticidade (MPa)			
ANOVA		p-valor	Significância
REF 1 (MG)	CARB E 1 (MG)	0,21777	NÃO
REF 1 (MS)	CARB E 1 (MS)	0,19861	NÃO
REF 1 (MC)	CARB E 1 (MC)	0,22017	NÃO
REF 1 (MI)	CARB E 1 (MI)	0,23579	NÃO
CARB E 1 (MG)	CARB E 2 (MG)	0,23452	NÃO
CARB E 1 (MS)	CARB E 2 (MS)	0,22527	NÃO
CARB E 1 (MC)	CARB E 2 (MC)	0,24066	NÃO
CARB E 1 (MI)	CARB E 2 (MI)	0,27570	NÃO