

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

KÉTLIN GABRIELE CORNELY DA SILVA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO E DO ENSAIO DE
ENVELHECIMENTO ACELERADO POR CICLAGEM TÉRMICA EM
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

São Leopoldo

2022

KÉTLIN GABRIELE CORNELY DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO E DO ENSAIO DE
ENVELHECIMENTO ACELERADO POR CICLAGEM TÉRMICA EM
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Projeto de Pesquisa apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pelo Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

São Leopoldo

2022

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço aos meus amados pais Jaques e Marinelva por fazerem dos meus sonhos os sonhos deles. Por todo apoio, amor e incentivo que tive durante a vida e principalmente durante a minha jornada acadêmica. Sem vocês nada disso seria possível.

À minha avó Delse Cornely, pelo acolhimento durante o período que residi em sua casa durante a graduação. Meu eterno agradecimento.

Ao meu amado Wagner Ledur, que esteve ao meu lado durante boa parte da minha graduação e principalmente por todo apoio durante a execução desse trabalho. Obrigada por me tranquilizar, por me compreender e por me ajudar incansavelmente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak por ter acreditado no meu potencial para a execução de um trabalho tão complexo e desafiador. Obrigada por compartilhar tanto conhecimento, por ter me tranquilizado e me orientado em todos os obstáculos que encontrei no caminho. Minha admiração e gratidão pelo senhor serão eternas.

À minha querida parceira, amiga e mestranda Camila Werner Menegotto, que esteve comigo desde a aquisição dos materiais até a conclusão desse trabalho. Obrigada por ter enfrentado os obstáculos do meu lado, só nós sabemos como não foi e não é fácil enfrentar essa empreitada. Você é minha referência como pessoa e como cientista.

À doutoranda Monique Palavro Lunardi, pela ajuda na busca dos materiais e por todas as dicas para a execução do programa experimental. Aprendi muito com você durante o pouco tempo que convivemos. Obrigada por tanto.

Ao doutorando Benício de Moraes Lacerda, por realizar o processamento das imagens do Digital Image Correlation (DIC) no software Ncorr.

Aos meus amigos da graduação Kassiana Aguiar e Otavio Coin, por toda a nossa jornada e amizade que levarei para a vida toda.

À quase arquiteta, Marília Toldo pela nossa amizade e por nunca medir esforços para me ajudar.

Aos laboratoristas do Laboratório de Materiais de Construção da UNISINOS, André, Bianca, Helen, Igor e Leonardo. Obrigada por todo auxílio para a execução do programa experimental e por toda torcida para que esse trabalho desse certo.

A todos os laboratoristas dos demais laboratórios, Clayton, Diego, Eder, Calvin, Lauro, Lucas, Marluci e Vitor. Vocês foram essenciais.

Às empresas Concretul, Construrohr e Hidracal pela doação dos materiais para a pesquisa.

E por fim, agradeço imensamente a todos os professores que tive durante a graduação. Vocês me fizeram engenheira.

RESUMO

Os efeitos das condições de exposição das argamassas de revestimento são fatores cruciais quando se trata da durabilidade das mesmas, portanto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos causados pela carbonatação e o envelhecimento acelerado nas propriedades mecânicas desse material. Para a realização do programa experimental, foram executados exemplares compostos por substratos cerâmicos estruturais lisos revestidos com argamassa de cimento, cal e areia de traço 1:1,5:4 e relação água/aglomerante de 0,9, que foram submetidos a cura úmida saturada durante 61 dias. Após a cura, as placas de revestimento que seriam envelhecidas e carbonatadas foram submetidas ao sazramento com umidade controlada de $60\% \pm 5\%$ durante 25 dias. Posteriormente, metade das amostras foram submetidas à carbonatação acelerada com concentração de 3% de CO_2 e as demais submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado. O envelhecimento acelerado ocorreu nas amostras carbonatadas e não carbonatadas ao longo de 10 ciclos de aquecimento e molhagem. As amostras de cada variável foram analisadas a partir dos ensaios de resistência de aderência a tração, absorção de água por capilaridade e ensaio de tração com a aplicação da metodologia de Digital Image Correlation (DIC), que tem o objetivo de mapear as deformações e realizar a análise de forma visual. Os resultados mostram que a carbonatação contribuiu para uma maior resistência e menor absorção capilar, porém quando a amostra foi envelhecida, gerou perda de resistência. O ensaio de envelhecimento acelerado contribuiu para um ganho de resistência nas amostras que não sofreram carbonatação. O envelhecimento também gerou uma maior variabilidade nos testes de resistência de aderência à tração e absorção de água. A análise das deformações por DIC confirmou os resultados obtidos no ensaio de resistência de aderência à tração, provando que o método é válido.

Palavras-chave: argamassas de revestimento; carbonatação; Digital Image Correlation (DIC); envelhecimento acelerado.

ABSTRACT

The effects of exposure conditions of coating mortars are crucial factors when it comes to their durability, therefore, the present work aims to evaluate the effects caused by carbonation and accelerated aging on the mechanical properties of this material. To carry out the experimental program, specimens composed of smooth structural ceramic substrates coated with cement mortar, lime and sand with a 1:1,5:4 ratio and a water/binder ratio of 0,9 were made, which were cured in a saturated environment for 61 days. After curing, the cladding boards that were to be aged and carbonated were subjected to aging at a controlled humidity of $60\% \pm 5\%$ for 25 days. Subsequently, half of the samples were subjected to accelerated carbonation with a concentration of 3% CO₂ and the others were subjected to the accelerated aging test. Accelerated aging occurred in carbonated and non-carbonated samples over 10 heating and wetting cycles. The samples of each variable were analyzed from the tensile bond strength tests, capillary water absorption and tensile test with the application of the Digital Image Correlation (DIC) methodology, which aims to map the deformations and perform the analysis visually. The results show that carbonation contributed to greater resistance and lower capillary absorption, but when the sample was aged, it generated a loss of resistance. The accelerated aging test contributed to a gain in strength in the non-carbonated samples. Aging also generated greater variability in the tensile bond strength and water absorption tests. The analysis of strains by DIC confirmed the results obtained in the tensile bond strength test, proving that the method is valid.

Key-words: accelerated aging; carbonation; coating mortars; Digital Image Correlation (DIC).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismo de carbonatação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$	23
Figura 2 – Difusão do CO_2 nos poros capilares.....	27
Figura 3 – Evolução do aumento de massas das amostras expostas ao ensaio acelerado de carbonatação.....	29
Figura 4 – Difusão do CO_2 em diferentes graus de saturação.....	30
Figura 5 – Profundidade de carbonatação em relação a umidade relativa ambiente	31
Figura 6 – Solicitações que ocorrem nas fachadas das edificações.....	36
Figura 7 – Transferência de calor em fachadas ao longo do dia.....	37
Figura 8 – Equipamentos utilizados em ensaios de envelhecimento acelerado no Brasil.....	41
Figura 9 – Formas de rupturas obtidas pelo ensaio de resistência de aderência à tração.....	44
Figura 10 – Preparo da amostra do método DIC.....	47
Figura 11 – Posicionamento da amostra, câmeras e luzes para o ensaio de DIC....	48
Figura 12 – Processamento realizado no Ncorr.....	49
Figura 13 – Fluxograma do programa experimental.....	50
Figura 14 – Distribuição granulométrica do cimento.....	54
Figura 15 – Distribuição granulométrica da cal.....	55
Figura 16 – Granulometria do agregado miúdo.....	57
Figura 17 – Fluxograma de caracterização do substrato.....	58
Figura 18 – Fluxograma da caracterização da argamassa no estado fresco.....	61
Figura 19 – Fluxograma da caracterização da argamassa no estado endurecido....	65
Figura 20 – Método de aplicação da argamassa na placa cerâmica.....	70
Figura 21 – Tempos obtidos para o ensaio de envelhecimento acelerado.....	75
Figura 22 – Fluxograma dos ensaios do sistema de revestimento.....	76
Figura 23 – Linha do tempo dos ensaios de absorção, tração e deformação.....	77
Figura 24 – Resistência de aderência à tração.....	86
Figura 25 – Resistência de aderência à tração dos revestimentos NC e C.....	87
Figura 26 – Resistência de aderência à tração dos revestimentos NC e NC E.....	89
Figura 27 – Resistência de aderência à tração dos revestimentos C e C E.....	90
Figura 28 - Resistência de aderência à tração dos revestimentos NC E e C E.....	92
Figura 29 – Coeficiente de capilaridade de cada variável.....	93

Figura 30 – Coeficiente de capilaridade das variáveis NC e C.....	94
Figura 31 – Coeficiente de capilaridade das variáveis NC e NC E.....	95
Figura 32 – Coeficiente de capilaridade das variáveis C e C E.....	97
Figura 33 – Coeficiente de capilaridade das variáveis NC E e C E.....	98

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Substratos com dimensões de 14cm x 19cm x 9cm	58
Fotografia 2 – Ensaio de absorção de água por capilaridade nos blocos	59
Fotografia 3 – Ensaio de resistência à tração do bloco cerâmico	60
Fotografia 4 – Índice de consistência	62
Fotografia 5 – Recipiente cilíndrico com argamassa.....	63
Fotografia 6 – Aparelho para determinar o ar incorporado.....	64
Fotografia 7 – Ensaio de retenção de água	65
Fotografia 8 – Ensaio de resistência à tração na flexão e compressão	66
Fotografia 9 – Módulo de elasticidade dinâmico	67
Fotografia 10 – Absorção de água por capilaridade no estado endurecido	68
Fotografia 11 – Execução da moldagem dos revestimentos.....	70
Fotografia 12 – Parte das placas com revestimento acondicionados na câmara úmida	71
Fotografia 13 – Processo de sazonalidade.....	72
Fotografia 14 – Câmara de carbonatação acelerada	73
Fotografia 15 – Procedimento de envelhecimento acelerado	74
Fotografia 16 – Ensaio de absorção de água por capilaridade	78
Fotografia 17 – Ensaio de resistência de aderência à tração.....	79
Fotografia 18 – Preparo da amostra para o método DIC	80
Fotografia 19 – Cenário de ensaio	80
Fotografia 20 – Sentido dos eixos de análise do Ncorr	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fatores de controle, níveis de estudo e nomenclatura	51
Quadro 2 – Variáveis de resposta e número de amostras	52
Quadro 3 – Dados de tensão visuais de cada variável	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química do cimento por FRX	53
Tabela 2 – Finura, tempo de pega e resistência à compressão do cimento	54
Tabela 3 - Caracterização química da cal por FRX.....	55
Tabela 4 – Caracterização do agregado miúdo.....	56
Tabela 5 – Caracterização do substrato.....	82
Tabela 6 – Caracterização da argamassa no estado fresco e endurecido.....	83
Tabela 7 – Resistência de aderência à tração	85
Tabela 8 - Análise de variância (ANOVA) para a resistência de aderência à tração das amostras NC e C	88
Tabela 9 – Análise de variância (ANOVA) para a resistência de aderência à tração das amostras NC e NC E	90
Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) para a resistência de aderência à tração das amostras C e C E	91
Tabela 11 – Análise de variância (ANOVA) para a resistência de aderência à tração das amostras NC E e C E	93
Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) para o coeficiente de capilaridade das variáveis NC e C	95
Tabela 13 – Análise de variância (ANOVA) para o coeficiente de capilaridade das variáveis NC e NC E	96
Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) para o coeficiente de capilaridade das variáveis C e C E.....	98
Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA) para o coeficiente de capilaridade das variáveis NC E e C E.....	99

LISTA DE SIGLAS

a/c	Água/cimento
ACH	Aluminato de cálcio hidratado
Ca	Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio ou Portlandita
Ca/Si	Relação cálcio/sílico
Ca ²⁺	Íons de cálcio
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferroaluminato tetracálcico
CO ₂	Dióxido de carbono ou gás carbônico
CO ₃ ²⁻	Íon carbonato
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C ₂ S	Silicato dicálcico ou Belita
C ₃ S	Silicato tricálcico ou Alita
DIC	Digital Image Correlation
H ₂ O	Água
H ₂ S	Gás sulfídrico
K	Potássio
K ₂ CO ₃	Carbonato de potássio
KOH	Hidróxido de potássio
LMC	Laboratório de materiais de construção
Na	Sódio
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
nm	Nanômetro (10 ⁻⁹ metros)
pH	Potencial de hidrogênio
RILEM	International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures
SiO ₂	Sílica gel
SO ₂	Dióxido de enxofre
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	17
1.2 PROBLEMA	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 JUSTIFICATIVA	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 CARBONATAÇÃO	21
2.1.1 Parâmetros que influenciam a ação da carbonatação	24
2.1.1.1 Condições do material.....	24
2.1.1.2 Condições ambientais	28
2.1.2 Carbonatação acelerada	32
2.1.3 Consequências da carbonatação em argamassas	34
2.2 ENVELHECIMENTO DOS MATERIAIS POR CICLAGEM TÉRMICA.....	35
2.2.1 Parâmetros que influenciam o envelhecimento dos materiais	37
2.2.1.1 Aquecimento e resfriamento.....	37
2.2.1.2 Molhagem e secagem	38
2.2.2 Ensaio de envelhecimento acelerado	40
2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS DE REVESITAMENTO.....	42
2.3.1 Resistência de aderência	43
2.3.2 Módulo de elasticidade	45
2.3.2.1 Módulo de elasticidade por Digital Image Correlation (DIC).....	46
3 METODOLOGIA	50
3.1. FATORES E VARIÁVEIS	50
3.1.1 Fatores de controle com níveis variáveis	50
3.1.2 Fatores fixos	51
3.1.3 Variáveis de Resposta	51
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	53
3.2.1 Cimento	53
3.2.2 Cal	54
3.2.3 Agregado Miúdo	55

3.2.4 Água	57
3.2.5 Substratos Cerâmicos	57
3.2.5.1 Caracterização física dos substratos.....	58
3.2.5.2 Absorção de água por capilaridade dos substratos.....	58
3.2.5.3 Resistência de aderência à tração do bloco cerâmico	59
3.3. METODOS	60
3.3.1 Preparo das argamassas, definição do traço e relação água/aglomerante	60
3.3.2 Caracterização da argamassa no estado fresco	61
3.3.2.1 Índice de consistência	61
3.3.2.2 Densidade de massa.....	62
3.3.2.3 Teor de ar incorporado	63
3.3.2.4 Retenção de água	64
3.3.3 Caracterização da argamassa no estado endurecido	65
3.3.3.1 Resistência à tração na flexão e compressão	66
3.3.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico	67
3.3.3.3 Absorção de água total, índice de vazios e massa específica	67
3.3.3.4 Absorção de água por capilaridade	68
3.3.3.5 Densidade de massa aparente.....	69
3.3.4 Método e aplicação da argamassa nos substratos cerâmicos	69
3.3.5 Cura	71
3.3.6 Sazonamento	71
3.3.6 Processo de carbonatação acelerada	73
3.3.7 Ensaio de envelhecimento acelerado	74
3.3.8 Ensaio do sistema de revestimento	76
3.3.8.1 Absorção de água por capilaridade.....	78
3.3.8.2 Resistência de aderência à tração	78
3.3.8.3 Análise das deformações dos revestimentos por DIC	79
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
4.1 CARACTERIZAÇÃO	82
4.1.1 Substrato	82
4.1.2 Argamassa no estado fresco e endurecido	83
4.2 ENSAIOS DO REVESTIMENTO	85
4.2.1 Resistência de aderência à tração	85

4.2.1.1 Não Carbonatadas x Carbonatadas	87
4.2.1.2 Não Carbonatadas x Não Carbonatadas Envelhecidas	88
4.2.1.3 Carbonatadas x Carbonatadas Envelhecidas	90
4.2.1.4 Não Carbonatadas Envelhecidas x Carbonatadas Envelhecidas.....	91
4.2.2 Absorção de água por capilaridade.....	93
4.2.2.1 Não Carbonatadas x Carbonatadas	94
4.2.2.2 Não Carbonatadas x Não Carbonatadas Envelhecidas	95
4.2.2.3 Carbonatadas x Carbonatadas Envelhecidas	96
4.2.2.4 Não Carbonatadas Envelhecidas x Carbonatadas Envelhecidas.....	98
4.2.3 Análise das deformações dos revestimentos por DIC.....	99
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
REFERÊNCIAS.....	105
APÊNDICE A	118
APÊNDICE B	120
APÊNDICE C	124
APÊNDICE D	125

1 INTRODUÇÃO

As argamassas podem desempenhar diferentes funções na construção civil. Suas principais aplicações estão no assentamento de blocos em paredes de alvenaria, assentamento de azulejos e pisos cerâmicos e em revestimentos internos e externos de edificações. Para que se atenda às necessidades de cada aplicação, as argamassas devem possuir características específicas que sejam adequadas as condições de solicitações as quais estarão sujeitas, assim como a função que será exercida e aos materiais de aplicação, como as paredes de alvenaria que receberão o revestimento argamassado (VEIGA, 2017).

Diversas solicitações podem influenciar na durabilidade das argamassas de revestimento. Elas se dão principalmente nas condições de exposição do material, denominadas como físico-mecânicas, que acontecem durante a atuação do vento no período de cura da argamassa, com vibrações oriundas do meio externo e com os ciclos de molhagem, secagem, aquecimento e resfriamento. Além das condições de exposição, destaca-se que durante o uso da edificação também podem ocorrer deformações provenientes de sobrecargas das estruturas, nas quais as argamassas estão revestidas, entre inúmeras outras possíveis solicitações (KAZMIERCZAK et al., 2016).

Dentre os agentes de degradação físico-mecânicas das argamassas de revestimento, destaca-se a temperatura, que pode variar dependendo da intensidade da exposição da radiação solar da edificação e/ou a mudança das estações. A variação de temperatura acaba gerando tensões de tração, que se tornam prejudiciais as argamassas devido a sua baixa resistência à tração. Essas tensões internas provocadas pela oscilação de temperatura resultam, de forma gradual, em microfissuras que podem aumentar tanto em quantidade, quanto em dimensão, provocando degradação e diminuição da vida útil do revestimento (ESQUIVEL, 2009; SENTENA; KAZMIERCZAK; KREIN, 2018).

Dessa forma, as argamassas de revestimento devem possuir a capacidade de se deformar sem que ocorram fissuras no revestimento quando forem expostas as solicitações descritas. Para minimizar esse problema, é importante que a argamassa tenha um baixo módulo de elasticidade, uma boa resistência de aderência, estanqueidade e durabilidade (CARASEK, 2010; MARQUES et al., 2020).

Além das ações físico-mecânicas, também há outros dois grupos capazes de gerar degradação nas argamassas de revestimento, sendo eles biológicos, que ocorrem a partir da propagação de microorganismos nos revestimentos e os físico-químicos, como o fenômeno de carbonatação (KAZMIERCZAK et al., 2016).

Sabe-se que a concentração de dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera tem aumentado significativamente com o passar dos anos. Isso acontece devido a eventos ocorridos no mundo, tais como as mudanças decorrentes da Revolução Industrial (1750) e o grande desenvolvimento técnico-científico, este sucedido por volta da década de 1950 (TASCA, 2012). A partir da existência do CO_2 na atmosfera, é gerado o fenômeno de carbonatação, ocorrendo nos materiais à base de cimento que possuem a capacidade de absorver esse gás. Dessa forma, ocorre o processo de neutralização físico-química da fase líquida saturada do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e outros compostos hidratados presentes na matriz cimentícia pelo CO_2 , que na presença de umidade gera o carbonato de cálcio (CaCO_3) (POSSAN et al., 2017).

A carbonatação de materiais cimentícios é um problema inevitável, visto que o CO_2 está presente em toda a atmosfera. Esse gás, quando ingressado na matriz cimentícia, reduz o pH dos materiais através da neutralização das substâncias alcalinas presentes no cimento. Em estruturas de concreto armado, esse fato gera preocupação, pois as barras de aço são protegidas por um pH alto, e o pH baixo tende a despassivar essa camada protetora existente na superfície do aço, resultando na corrosão da armadura (EKOLU, 2016; LI et al., 2020; THIERY, 2005).

Além dos efeitos da carbonatação nas estruturas de concreto, materiais cimentícios não armados também ganham destaque nos estudos de carbonatação. Nesse caso, a carbonatação é utilizada de forma proposital, pois no decorrer dos anos pesquisadores perceberam melhorias nas propriedades das matrizes cimentícias, sendo elas: redução da porosidade, o que acarreta diminuição da permeabilidade e aumento do módulo de elasticidade; aumento da dureza superficial e; aumento da resistência à compressão (HAN et al., 2015; THIERY, 2005).

No que tange à carbonatação das argamassas de revestimento, inúmeras alterações físico-químicas são provocadas por esse fenômeno, como: alterações na porosidade, aumento da dureza superficial, modificação no tamanho dos poros e modificações químicas, essas podendo aumentar a resistência do material, bem como reduzir sua permeabilidade (HAN et al., 2015; YU et al., 2017).

Além das alterações citadas, também destaca-se a alteração do módulo de elasticidade que tende a aumentar a partir da ação da carbonatação da argamassa e dos efeitos de molhagem e secagem, dessa forma diminuindo a vida útil do revestimento, visto que uma argamassa ideal necessita de um baixo módulo de elasticidade (JOHN, 2003 apud POLITO, 2008). Contudo, o estudo de módulo de elasticidade em argamassa ainda não é consolidado devido à dificuldade de análise, embora seja um parâmetro extremamente importante para avaliar a durabilidade do revestimento.

Esse trabalho visa contribuir com a análise da durabilidade de argamassas de revestimento que sofrem a influência da carbonatação e de variações térmicas. As avaliações desses fenômenos serão realizadas a partir de ensaios acelerados realizados no Laboratório de Materiais de Construção – LMC da UNISINOS.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O trabalho visa contribuir com os estudos sobre a influência da carbonatação e da ciclagem térmica, onde a partir do mesmo programa experimental, seja possível obter respostas sobre resistência de aderência à tração e absorção de água por capilaridade em argamassas de revestimento compostas por cimento, cal e areia. O trabalho também visa analisar a deformação ao longo do processo de carregamento de esforços de tração utilizado a técnica de Digital Image Correlation (DIC). O trabalho é delimitado pelo ensaio acelerado de carbonatação e de envelhecimento acelerado por ciclagem térmica, utilizando argamassa de traço 1:1,5:4 (cimento:cal:areia) em volume, sendo o cimento CP II-F-40, cal CH I, areia miúda e relação água/aglomerante de 0,9.

1.2 PROBLEMA

A carbonatação é um fenômeno físico-químico que se dá devido ao ingresso do dióxido de carbono (CO_2) na matriz cimentícia de materiais como concretos e argamassas. Nos concretos esse fenômeno já é estudado há décadas, pois gera preocupação na comunidade científica devido a sua capacidade de reduzir o pH do material resultando na corrosão da armadura. Em argamassas de revestimento sabe-se da existência de diversas pesquisas relacionadas às suas propriedades,

porém, quando se trata do estudo da carbonatação nesse tipo de material, notam-se lacunas que ainda precisam ser preenchidas.

A variação de temperatura é outro gradiente responsável por gerar degradação de revestimentos de fachada devido a sua atuação nas propriedades dos materiais cimentícios, que podem gerar fissuras e, conseqüentemente, a diminuição da sua vida útil.

Devido à grande quantidade emitida de CO₂ no Planeta Terra diariamente, além da grande variação de temperatura que ocorrem durante o dia e noite, meses e anos, é necessário que se entenda o comportamento das argamassas de revestimento submetidas a esses fatores. Através do auxílio de ensaios acelerados, foi possível obter as respostas para os objetivos propostos a seguir.

1.3 OBJETIVOS

A seguir, encontram-se o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

1.3.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral analisar a influência da carbonatação e do envelhecimento acelerado por ciclagem térmica nas propriedades mecânicas das argamassas de revestimento compostas por cimento, cal e areia.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar as diferenças de resistência de aderência à tração e absorção de água por capilaridade antes e após a carbonatação e envelhecimento acelerado por ciclagem térmica;
- b) Verificar a eficácia do método de Digital Image Correlation (DIC) para visualização das deformações em material frágil sobre esforços de tração;
- c) Avaliar o efeito da carbonatação e do envelhecimento acelerado na forma e propagação das deformações do revestimento quando submetido a esforços de tração.

1.4 JUSTIFICATIVA

As argamassas de revestimento, tanto internas quanto externas, são de extrema importância no que se diz respeito a estética de uma edificação, assim como a proteção e a durabilidade da mesma. Esse tipo de revestimento, deve ter a capacidade de se deformar, sem que haja falha crítica, quando forem sujeitos a ciclos térmicos ou retração da argamassa (BASTOS, 2001; MARQUES et al., 2020).

Contudo, sabe-se que o surgimento de fenômenos patológicos nesse tipo de revestimento é muito comum, podendo provocar prejuízos econômicos significativos, comprometendo a durabilidade e conforto das edificações, e também, podendo colocar vidas humanas em risco, ocasionando acidentes oriundos de descolamento e posteriormente a queda das placas do revestimento externo (BASTOS, 2001; POLITO, 2008). Visando comentar sobre manifestações patológicas, destacam-se aos esforços cíclicos de molhagem e secagem das argamassas que influenciam diretamente na tração e cisalhamento, bem como a fluência, a retração da estrutura e por secagem, e a carbonatação (JOHN, 2003 apud POLITO, 2008).

A carbonatação em materiais cimentícios é motivo de grande interesse na comunidade científica. As principais pesquisas realizadas são referentes a carbonatação de estruturas de concreto armado, pelo fato de o fenômeno ter a capacidade de despassivar o aço podendo ocasionar uma falha estrutural. Isso gera severos problemas na segurança e na aparência das edificações antes mesmo do final da vida útil das estruturas (HAN et al., 2013; HAN et al., 2015)

Quando se trata da carbonatação em argamassas de cimento, ou de cimento e cal, pesquisadores como De Weerd et al. (2019) e Moraes et al. (2018) geralmente direcionam suas pesquisas em análises do ingresso de CO₂ na solução dos poros e na profundidade de carbonatação, com essas argamassas podendo (ou não) serem compostas com diferentes adições, traços e/ou diferentes relações água/cimento.

Segundo Silva e Brito (2021) a argamassa é considerada um material de sacrifício, na grande maioria dos casos, antes mesmo do concreto ser exposto as intempéries a argamassa já foi 100% atingida, dessa forma a qualidade da argamassa vai auxiliar na proteção da estrutura. No entanto, não há uma análise minuciosa do efeito que a carbonatação tem nessas argamassas de revestimento

como na resistência de aderência, capilaridade e módulo de elasticidade, sendo este último um fator primordial para previsão da vida útil das argamassas.

O módulo de elasticidade em argamassa não é consolidado devido a falha dos extensômetros para a obtenção das leituras e a baixa resistência a compressão (MARQUES et al., 2020). Ainda, quando é obtido o módulo de elasticidade estático é aplicado esforços de compressão sendo que em argamassas de revestimentos, os esforços de tração e cisalhamento são os mais predominantes.

Dessa forma nota-se a necessidade, de a partir de um mesmo programa experimental, avaliar as propriedades das argamassas de forma mais minuciosa.

Portanto, a fim de preencher as lacunas da literatura, esse trabalho visa realizar uma análise do comportamento dos sistemas de revestimentos argamassados compostos de cimento, cal e areia, submetidos a carbonatação acelerada e ao ensaio de envelhecimento acelerado (ciclagem térmica). Assim, avalia-se e compara-se se os efeitos encontrados nos ensaios são positivos ou não para o sistema proposto, além de avaliar a análise de deformações em ensaio de tração por Digital Image Correlation (DIC).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que embasam a pesquisa, a fim de entender o conceito do fenômeno de carbonatação e do envelhecimento dos materiais por ciclagem térmica, além de também apresentar os ensaios acelerados utilizados no programa experimental, sendo eles: carbonatação acelerada e envelhecimento acelerado por ciclagem térmica. O capítulo também comporta um item sobre as propriedades mecânicas das argamassas de revestimento que foram avaliadas no programa experimental.

2.1 CARBONATAÇÃO

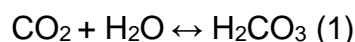
O processo de carbonatação, é um fenômeno físico-químico que se materializa a partir da ação dos gases ácidos que estão presentes no ambiente, tais como, o gás sulfídrico (H_2S), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás carbônico (CO_2), os quais acabam reagindo com os compostos alcalinos do concreto, que são obtidos durante o processo de hidratação do cimento (KULAKOWSKI, 2002).

A principal substância capaz de provocar a carbonatação é o CO_2 , que age a partir do consumo do sódio (Na), do potássio (K) e do cálcio (Ca). A partir disso, o fenômeno da carbonatação é formado em decorrência do processo de neutralização do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) com a ação do CO_2 em suas propriedades, onde tem como resultado o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), ocasionando a transformação de um hidróxido alcalino em um sal de baixa solubilidade (CADOIRE, 2008).

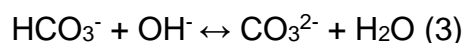
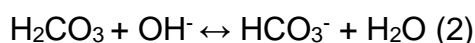
No processo de carbonatação, a água é considerada um elemento fundamental, devido a sua presença nos poros da pasta de cimento endurecida, podendo ser tanto em quantidades menores, quanto em quantidades maiores. A presença da água possui dois papéis importantes perante o cimento, no primeiro caso, ela bloqueia os poros por saturação, impedindo assim a difusão do CO_2 ; no segundo caso, ela exerce o papel necessário para a reação entre CO_2 e $Ca(OH)_2$, possibilitando o processo de carbonatação. O CO_2 acaba se difundindo mais rapidamente em contato com baixos níveis de umidade relativa ambiente, já em altos níveis de umidade, a difusão do CO_2 ocorre de uma forma mais lenta, sendo

assim, a umidade intermediária é considerada ideal para as reações de carbonatação (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989).

No que se diz respeito as reações químicas, uma das principais entre elas ocorre devido a penetração do CO₂ em poros com a presença de água, ocasionando a dissolução do gás, tendo como resultado a formação do ácido carbônico (equação 1) (THIERY, 2005).



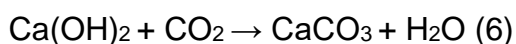
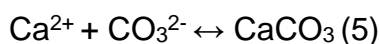
O ácido carbônico possui o comportamento de um diácido fraco quando em contato com a água, logo a dissolução do mesmo ocorre em duas fases, uma resultando em íon bicarbonato (HCO₃⁻) rerepresentada na equação 2, e outra em íon carbonato (CO₃²⁻) representada na equação 3. (THIERY, 2005).



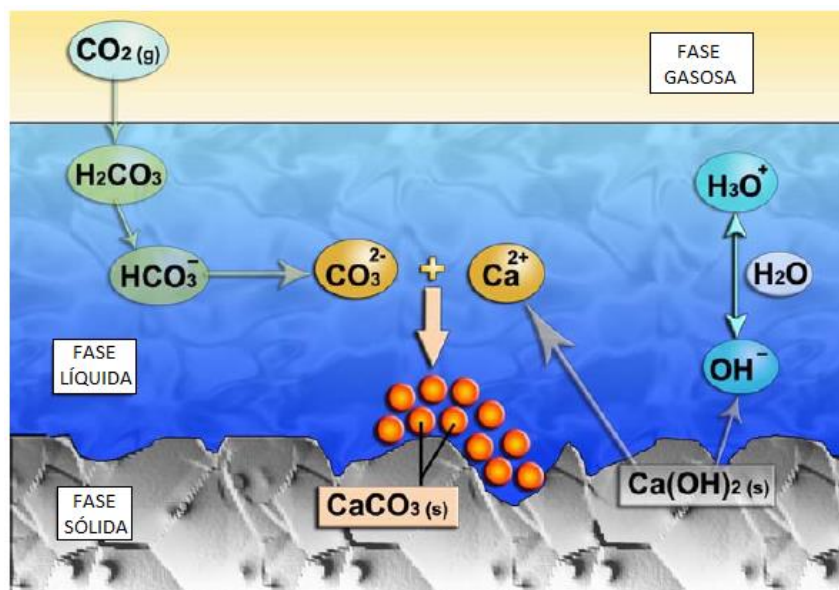
Ao passar pelos processos representados nas equações 1, 2 e 3, o CO₂ provoca nas reações uma redução na concentração dos íons OH⁻ na solução intersticial dos poros, fazendo com que o pH diminua. Com o intuito de restaurar a alcalinidade do meio, o hidróxido de cálcio se dissolve nas áreas de maior alcalinidade migrando para as de menor alcalinidade (equação 4) (THIERY, 2005).



Com os íons de cálcio (Ca²⁺) liberados, torna-se possível a combinação dos mesmos com os íons de carbonato (CO₃²⁻), fazendo que ocorra a formação do carbonato de cálcio (CaCO₃), representado na equação 5. Como a água está presente nas reações de carbonatação, destaca-se outra alternativa de reação, essa sendo de uma forma simplificada, como mostra a equação 6 (THIERY, 2005).

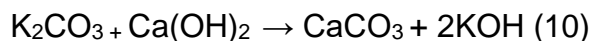
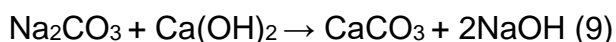
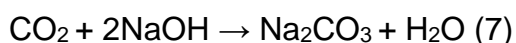


A figura 1 mostra a representação das reações da carbonatação citadas acima.

Figura 1 – Mecanismo de carbonatação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 

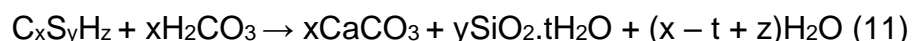
Fonte: Thiery, 2005.

O hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH) são tidos como essenciais na solução de poros dos materiais cimentícios endurecidos, como argamassa e concreto. Esses hidróxidos tendem a reagir com o ácido carbônico, formando carbonatos de sódio (Na_2CO_3) (equação 7) e carbonatos de potássio (K_2CO_3) (equação 8), que reagem com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formar o carbonato de cálcio (CaCO_3) e, novamente, os hidróxidos de sódio (equação 9) e potássio (equação 10) (HOUST; WITTMANN, 2002).



Segundo Taylor (1997), o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e as fases do aluminato, também estão sujeitos a carbonatar pela influência do CO_2 . O C-S-H destaca-se como o principal componente da pasta de cimento hidratada, que ocorre a partir da hidratação do silicato dicálcico (C_2S) e do silicato tricálcio (C_3S) (PETER et al., 2008). O processo de carbonatação do C-S-H tem como resultado o carbonato de cálcio, a sílica gel (SiO_2) e, possivelmente, a água livre (equação 11). Nessa reação, a dissolução do CO_2 extrai os íons de cálcio do C-S-H, fazendo com que ocorra a liberação de ânions de silicato. Esses são capazes de se condensar a

outros silicatos em C-S-H, da mesma forma, ocorre com os íons de cálcio, que tendem a se precipitar com os íons de carbonato (THIERY, 2005).



Quanto maior for a razão molar cálcio-silício (Ca/Si), que varia entre 0,8 e 1,7, maior será o pH da matriz cimentícia. O cálcio em contato com o CO₂, tende a fazer com que essa razão diminua, assim como sua alcalinidade (DROUET, 2010).

Por sua vez, os aluminatos quando hidratados, também tendem a carbonatar, desse processo são produzidos o carbonato de cálcio, o hidróxido de alumínio e água. O monossulfoaluminato de cálcio e a etringita também estão sujeitos a carbonatação, em suas reações, ambos são capazes de gerar o carbonato de cálcio, o gel de alumina e o sulfato de cálcio (CASCUDO; CARASEK, 2011 apud FERREIRA, 2013; THIERY, 2005).

A carbonatação normalmente gera mudanças de volume, as quais tendem a provocar microfissuras e rachaduras, podendo essas alterar a permeabilidade efetiva da mesma, causando mudanças na permeabilidade e difusividade. A partir dessa afirmação, torna-se importante relacionar as pesquisas de carbonatação e porosidade (SAETTA; SCHREFLER; VITALIANI, 1993).

2.1.1 Parâmetros que influenciam a ação da carbonatação

O processo de carbonatação ocorre a partir de dois fatores. Um deles é por conta da condição de exposição do material (meio ambiente), que influenciam a carbonatação por conta das concentrações de CO₂ presentes na atmosfera, assim como a umidade relativa e a temperatura. O outro fator são as condições do material, como o tipo e quantidade de cimento e adições presentes, e também o período de cura e porosidade (PAULETTI, 2004). Dhir, Hewlett e Chan (1989, apud PAULETTI, 2004) destacam que a relação água/cimento e o tempo de cura, são fatores que influenciam consideravelmente o processo de carbonatação.

2.1.1.1 Condições do material

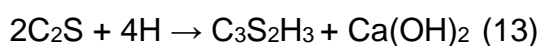
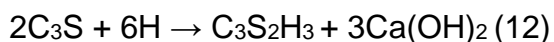
O cimento tem a função de ligante em misturas cimentícias, tendo como principal componente o clínquer (PROAÑO et al., 2020). O clínquer é obtido a partir do resultado da calcinação, que varia em torno de 1300°C e 1500°C, ocorrida

através de uma mistura de calcário, argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, utilizados de modo a confirmar certa proporção de determinados compostos químicos de mistura, dentre os limites específicos, a fim de proporcionar a criação de compostos hidráulicos e, ainda, conferir a propriedade ligante do cimento Portland (BATTAGIN, 2011; PROAÑO et al., 2020).

Como visto anteriormente, o cimento Portland é constituído principalmente por silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (ADORNA, 2016).

O silicato tricálcico também é conhecido como alita. Esse constituinte possui uma função importante pois está diretamente ligado ao endurecimento e a resistência mecânica do cimento nas idades iniciais, que são de 1 a 28 dias. A partir dos 28 dias, destaca-se a belita (ou silicato dicálcico), que também possui um papel importante perante a resistência mecânica do cimento, pois ela apresenta uma hidratação mais lenta (BATTAGIN, 2011).

Conforme Neville e Brooks (2013), as equações 12 e 13 representam, respectivamente, a hidratação do C_3S e C_2S :



A partir das equações citadas acima, nota-se que ambos os silicatos formam os mesmos produtos, sendo eles o silicato de cálcio hidratado ($C_3S_2H_3$) e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Esses compostos ficam sujeitos a sofrer carbonatação, pois acabam reagindo com o CO_2 (ADORNA, 2016).

A composição química do cimento é baseada em hidróxido de sódio ($NaOH$), hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (ACH). A quantidade de cada item determinará a quantidade total de álcalis disponível para que ocorra o fenômeno de carbonatação (BAKKER, 1988).

A reserva alcalina acontece quando há uma maior concentração de $Ca(OH)_2$ na solução intersticial dos poros. Esse fato acaba dificultando a entrada de CO_2 no interior da matriz cimentícia pois, para que isso aconteça, deve-se primeiramente diminuir o pH para que posteriormente ocorra a reação com todo o $Ca(OH)_2$ presente. Tal ação é necessária para que o CO_2 siga ingressando e precipitando o $CaCO_3$ na solução dos poros. Por possuírem uma maior liberação de $Ca(OH)_2$, os

cimentos que apresentam altos teores de C_3S possuem uma profundidade de carbonatação menor que os demais cimentos, quando todos analisados com as mesmas condições ambientais, cura e de traço (HELENE, 1993).

A carbonatação tende a acontecer mais rapidamente em cimentos contendo adições do que em misturas contendo apenas cimento Portland comum. Esse fato ocorre possivelmente devido a uma menor quantidade de $Ca(OH)_2$ presente na mistura (ANDRADE; BUJÁK, 2013).

Destaca-se que apesar de os cimentos compostos carbonatarem mais rapidamente do que o cimento comum, a cura adotada no processo pode mudar essa perspectiva. Pois uma cura realizada em 90 dias tende a fazer com que algumas misturas contendo cinza volante, por exemplo, diminuam sua profundidade de carbonatação, se igualando as amostras de cimento comum (JIANG; LIN; CAI, 2000).

Outro fator que deve ser salientado é a relação água/cimento utilizada na matriz cimentícia que, segundo Magalhães et al. (2017), influencia fortemente no avanço da carbonatação. Esse fato se dá devido à relação estar diretamente relacionada à formação dos poros, estes presentes na pasta de cimento endurecida (SILVA, 2007), pois caso haja uma elevada relação água/cimento, haverá conseqüentemente uma diminuição da resistência, assim como uma maior porosidade e maior permeabilidade, o que acaba facilitando o ingresso de CO_2 no interior do material (POSSAN, 2010).

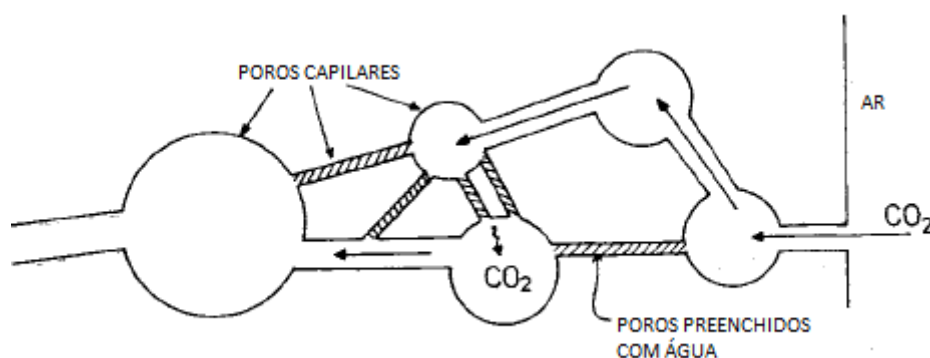
Li et al. (2013) realizaram uma pesquisa onde moldaram seis corpos de prova de cimento Portland comum com relações a/c variando entre 0,35, 0,42, 0,55, 0,59, 0,63 e 0,74, a fim de avaliar cada relação em diferentes condições de temperatura ambiente e umidade relativa. Após a realização do experimento, os autores constataram que independente das condições climáticas submetidas nos testes, à medida que as relações a/c aumentavam, conseqüentemente aumentava a profundidade de carbonatação das amostras.

A porosidade e a ligação entre os poros são outros fatores importantes que demonstram como funciona os mecanismos de avanço dos líquidos e gases para que ocorra a carbonatação (CADORE, 2008).

Na figura 2, observa-se o esquema de uma matriz cimentícia, que possui poros grandes e pequenos distribuídos de forma aleatória que estão conectados entre si. Para ocorrer a carbonatação, o CO_2 penetra com rapidez nos poros maiores

preenchidos com ar. Essa ação acaba se tornando lenta devido a saturação da água presente nos poros menores. Conforme a quantidade de água existente, a carbonatação ocorre em todo o conjunto de poros. Quando o sistema poroso não está completo por água, a carbonatação ocorre de uma forma local. Isso se dá pelo fato dos álcalis presentes no interior do concreto não se difundirem até o ponto de reação, por não existirem meios de transporte para a mesma devido a presença de poros repletos de ar (TUUTTI, 1982).

Figura 2 – Difusão do CO₂ nos poros capilares



Fonte: Tuutti, 1982.

Ishida e Maekawa (2000) acreditam que a influência da carbonatação resulta uma mudança no volume dos hidratos, que reflete diretamente nas estruturas dos poros, onde os deixam mais finos. Os autores salientam que o volume do CaCO₃ é por volta de 11,7% maior do que o volume do Ca(OH)₂. Papadakis, Fardis e Vayenas (1992) apontam que a porosidade final, que é a relação entre o volume dos poros e o volume total, acontece após a hidratação completa do cimento, atividade pozolânica e carbonatação.

Em suma, quanto maior for a porosidade, maior será a velocidade de carbonatação. Com o resultado da carbonatação, acontece uma redução dos poros devido a deposição dos produtos que envolvem a reação da carbonatação. A porosidade pode ser reduzida caso ocorra uma diminuição na relação a/c, pois essa está diretamente relacionada com o meio poroso. As condições de cura e as pozolanas também possuem um papel de influência sobre a porosidade (PAULETTI, 2004).

2.1.1.2 Condições ambientais

A carbonatação acontece principalmente pela difusão do CO₂ no interior dos poros de um material cimentício (AUROY et al., 2018). Conforme a primeira lei de difusão de Fick, quando houver uma elevada taxa de concentração de CO₂, o ingresso desse gás na matriz cimentícia será mais rápido, e conseqüentemente a velocidade de carbonatação aumentará (CUI et al., 2015).

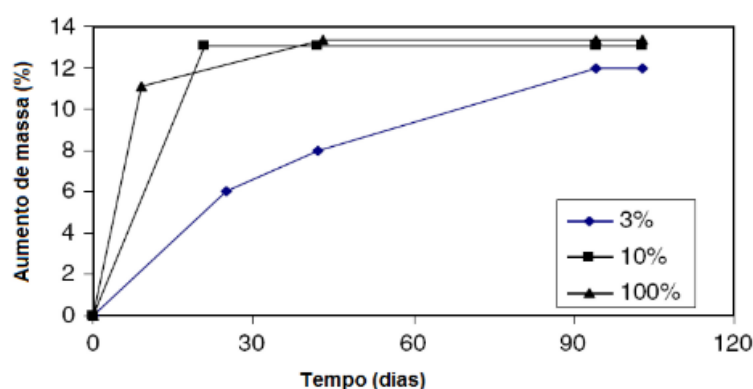
O gás CO₂ possui baixa concentração na atmosfera, assim como os presentes em ambientes rurais, onde o teor fica por volta de 0,03% por volume de ar. Essa concentração varia conforme o ambiente a qual está submetida. Em um laboratório não ventilado, como exemplo, esse teor pode alcançar mais de 0,1%, e em cidades grandes, o valor aproximado chega a 0,3%, podendo atingir 1% (NEVILLE, 2016).

Mazza (2015) salienta a importância de diferenciar os teores de concentração de CO₂ presentes nos ensaios de carbonatação acelerada e natural. Devido as condições de CO₂ presentes na atmosfera serem muito baixas, os ensaios naturais demandam muito tempo para obter um resultado preciso de carbonatação. Visto isso, para obter resultados em um menor período, pesquisadores adotam os ensaios acelerados em laboratório, que geralmente utilizam concentrações elevadas de CO₂, as quais variam entre 1% e 100%. Vale ressaltar que os teores de CO₂ utilizados em ensaios acelerados por diversos pesquisadores ainda não possuem uma padronização, logo, ainda não há um consenso sobre o percentual ideal de CO₂ a ser utilizado (NUNES, 2014; PAULETTI, 2009).

A fim de estudar a relação entre a profundidade de carbonatação do concreto e a taxa de concentração de CO₂, Cui et al. (2015) expuseram concretos de cimento Portland à cinco diferentes concentrações de CO₂ (2%, 10%, 20%, 50% e 100%). Os resultados do experimento identificaram que, após o mesmo período de teste para todas as amostras, houve um aumento da profundidade de carbonatação nas amostras de concreto expostas nas três primeiras concentrações de CO₂ (2%, 10% e 20%). Já nas concentrações mais altas (50% e 100%), a profundidade de carbonatação foi menor. Os autores concluíram que a alta concentração de CO₂ alterou a microestrutura da camada superficial do concreto, deixando-a mais densa, e com poros menores e menos conectados, dificultando dessa forma a difusão do CO₂ (CUI et al., 2015).

Castellote et al. (2009) realizaram ensaios em pastas de cimento Portland comum, adotando 65% de umidade relativa, 22°C de temperatura e concentrações de CO₂ variando de 0,03% (natural) e 3%, 10%, 100% (acelerado). A figura 3 apresenta os resultados do ensaio acelerado, onde a carbonatação é analisada junto à evolução do aumento de massa das amostras.

Figura 3 – Evolução do aumento de massas das amostras expostas ao ensaio acelerado de carbonatação



Fonte: Castellote et al., 2009 adaptado por Pauletti, 2009.

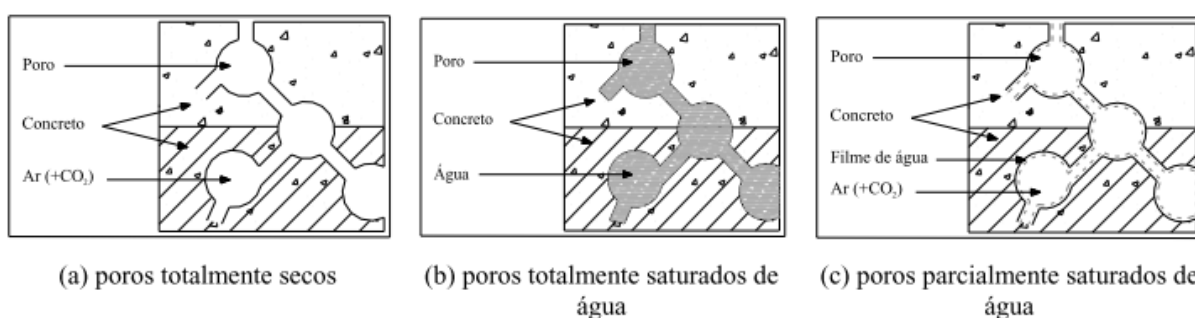
Pode-se observar na figura 3 que as massas das amostras submetidas à carbonatação com concentração de CO₂ de 10% e 100% estabilizam cedo. Essas concentrações possuem praticamente o mesmo aumento de massa ao longo dos dias. Já o CO₂ concentrado em 3%, por sua vez, gera um ganho de massa de forma mais lenta, porém, mesmo com esse fator de lentidão inicial, após os 100 dias percorridos também estabiliza como as outras duas concentrações (CASTELLOTE et al., 2009).

Em resumo, a concentração de CO₂ no ambiente possui um papel importante para os estudos de carbonatação. Contudo, esse fator deve estar ligado a outros fatores ambientais para que haja a difusão do CO₂ no interior da matriz cimentícia, pois a concentração por si só não age sozinha para que aconteça o fenômeno de carbonatação (TASCA, 2012).

A umidade é outro fator de extrema importância no processo de carbonatação. As reações de carbonatação devem ocorrer a partir do grau de saturação dos poros, onde a quantidade de água presente influencia diretamente na difusão do CO₂ (PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1992).

A figura 4 explica o processo de difusão do CO_2 referente a diferentes graus de saturação de água nos poros. Nesse sentido, a referida figura representa a) os poros completamente secos, onde a difusão do CO_2 acontece facilmente, mas em forma de gás, pois como não há presença de água, o CO_2 não reage com os compostos hidratados do cimento, o que impede o processo de carbonatação; b) os poros totalmente saturados por água, onde praticamente não acontece carbonatação devido à baixa taxa de difusão do CO_2 na água e, por fim; c) representa os poros parcialmente saturados, onde suas paredes se encontram úmidas e o seu interior seco, o que tende a facilitar a difusão do CO_2 , pois a quantidade de água presente nos poros é considerada favorável para que aconteça as reações de carbonatação (BAKKER, 1988).

Figura 4 – Difusão do CO_2 em diferentes graus de saturação



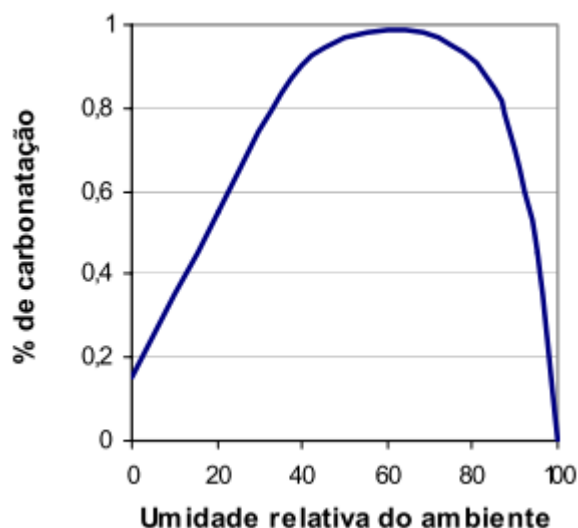
Fonte: Bakker, 1988 adaptado por Possan, 2010.

O aumento da umidade relativa do ambiente tende a impedir a difusão do CO_2 , pois aumenta a quantidade de poros saturados por água. Com isso, a velocidade da frente de carbonatação acaba diminuindo (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1989). A carbonatação também pode diminuir quando a umidade relativa está em quantidades menores que 40%. Isso se dá pelo fato de não haver uma quantidade suficiente de água nos poros que são capazes de dissolver os compostos de cimento hidratados (PARROTT, 1986 apud LADEIRA, 2017).

Pauletti (2004) salienta que no meio técnico não há consenso sobre a umidade relativa ideal para o processo de carbonatação. As pesquisas levantadas por ela indicam valores que ficam entre 40% e 85%. Papadakis, Fardis e Vayenas (1992) realizaram análises sobre a progressão da carbonatação em concretos, com condições de umidade ambiente variando entre 40% e 80%, e concluíram que nas umidades entre 50% e 65% ocorrem as maiores profundidades de carbonatação.

Esses resultados podem ser visualizados na figura 5, onde observa-se também que em ambientes com baixos teores de umidade relativa tendem a perder uma maior quantidade de água livre, o que resulta em uma menor quantidade de água para reagir com o CO₂, que acaba gerando uma profundidade de carbonatação menor (MEHTA; MONTEIRO, 2008; PARROTT, 1992).

Figura 5 – Profundidade de carbonatação em relação a umidade relativa ambiente



Fonte: Rosemberg, Hansson e Andrade, 1989 adaptado por Bourguignon, 2004.

Conforme pesquisas realizadas por Bourguignon (2004), na figura 6 também pode-se observar que a carbonatação atinge seu ápice nas faixas de 55% e 65% de umidade relativa, as quais se encontram nas condições de umidade ótima. A autora também explica que umidades inferiores a 50% representam uma falta de água para que aconteça a carbonatação, assim como teores acima de 95%, onde praticamente não ocorre a carbonatação.

Para Helene (1993), a temperatura é outro fator que influencia significativamente no desenvolvimento das reações químicas, pois a mesma é conhecida por estimular o transporte, o qual é necessário para que ocorra a carbonatação (DROUET et al., 2019). Pequenas oscilações na temperatura não possuem influência significativa sobre o processo de carbonatação, porém, quando o material é exposto a temperaturas mais elevadas, a difusividade do CO₂ aumenta, fazendo com que ocorra maior velocidade de carbonatação (DROUET et al., 2019; NEVILLE, 2016).

Cadore (2008) salienta que as temperaturas usuais não influenciam no ensaio acelerado de carbonatação. Em estudos realizados por Papadakis, Vayenas e

Fardis (1991), os autores constataram que as temperaturas entre 20°C e 40°C praticamente não influenciam na velocidade de carbonatação, pois o processo é controlado pela difusão do CO₂, que possui pouca sensibilidade quanto à temperatura.

Liu et al. (2001) realizaram ensaios em amostras de concreto leve que foram submetidas a temperaturas variando entre 20°C, 40°C, 60°C, 80°C e 100°C. Os resultados da pesquisa revelaram que o CO₂ presente no material aumentou de acordo com o aumento da temperatura nas três primeiras temperaturas ensaiadas (20°C, 40°C e 60°C). O ápice deu-se na temperatura referente à 60°C, a qual os autores acreditam que é a temperatura ideal para a carbonatação ocorrer. Após isso, nas temperaturas de 80°C e 100°C, a quantidade de CO₂ diminuiu, o que, segundo os autores, deve-se ao fato da diminuição da solubilidade de CO₂ na água em altas temperaturas.

Drouet et al. (2019) estudaram três tipos de temperaturas (20°C, 50°C e 80°C) para duas diferentes pastas de cimento, sendo uma de cimento Portland comum, e outra contendo adições de escória e cinza volante. Para a pasta contendo adições, nas temperaturas entre 20°C e 50°C houve um aumento na taxa de carbonatação, tendo a taxa diminuída nas temperaturas entre 50°C e 80°C. Porém, ressalta-se que a taxa referente a temperatura de 80°C manteve-se maior do que a de 20°C. Assim como visto na pesquisa de Liu et al. (2001), Drouet et al. (2019) também concluíram que a temperatura claramente possui um efeito acelerador de carbonatação, porém, com temperatura máxima de 50°C para esse tipo de pasta. Já na pasta contendo apenas cimento Portland comum, houve um crescimento constante entre as temperaturas estudadas, ressaltando o que foi explicado no início do presente tópico.

2.1.2 Carbonatação acelerada

A carbonatação natural ocorre de forma muito lenta, devido à baixa concentração de CO₂ na atmosfera. Com isso, pode-se demorar anos ou até mesmo décadas para que a carbonatação seja perceptível. Devido a lentidão desse processo, pesquisadores que estudam o fenômeno optam por realizar testes acelerados onde são utilizadas altas concentrações de CO₂, com a ideia de, em

pouco tempo, obterem resultados que demorariam anos para serem alcançados (GALAN; ANDRADE; CASTELLOTE, 2013).

O ensaio acelerado tem como função principal simular o processo de degradação natural do material cimentício utilizado, a partir de uma intensidade superior às condições normais de ambiente. Esse tipo de ensaio é normalmente realizado em laboratório, e tem como objetivo a redução do tempo necessário para que se materialize a deterioração do material em decorrência de determinado processo específico capaz de provocar a degradação do mesmo. Pelo fato de o CO₂ possuir baixa concentração na atmosfera, o processo de carbonatação natural se realiza de forma prolongada, fazendo que, com isso, o ensaio acelerado seja considerado essencial no sentido de possibilitar que estudos de carbonatação sejam realizados em tempo reduzido (POSSAN, 2004).

A realização do ensaio acelerado possibilita a obtenção de resultados importantes para a avaliação em tempo real, tudo isso a partir das condições utilizadas no teste. Ainda, o referido ensaio possibilita que os comportamentos extremos associados à carbonatação sejam estudados, como por exemplo, sua velocidade. O teste também serve como ferramenta comparativa na verificação da qualidade da variante de tipos e tratamentos dos concretos, avaliando o tempo de cura, relação a/c, além de outros fatores, no que se relaciona com a penetração da carbonatação (MUNTEAN et al., 2005).

Segundo Pauletti (2009), não há padronização referente ao ensaio acelerado de carbonatação. Nas pesquisas levantadas pela autora, vários cientistas adotaram métodos e condições diferentes, o que inviabiliza a comparação de estudos.

A difusão do CO₂ pode gerar variações no ensaio de carbonatação acelerada, por diferir em relação à umidade e à temperatura interna do concreto. As quantidades de adições minerais influenciam de modo importante, pois com o aumento da quantidade nas misturas, a reserva alcalina acaba diminuindo, fazendo com que a velocidade da carbonatação aumente. Nesse caso, as misturas são mais significativas e com maiores concentrações de CO₂, podendo esta chegar em 100% (ISAÍA, 2002 apud CADORE, 2008).

Para esse tipo de ensaio, Galan, Andrade e Castellote (2013) sugerem que as concentrações ideais de CO₂ sejam entre 3% e 4%, onde em concentrações menores o processo de carbonatação tende a não acontecer de forma significativa. Contudo, concentrações maiores que essas também são utilizadas por

pesquisadores. Deve-se ter cuidado ao se realizar o ensaio de carbonatação acelerada com esse tipo de concentração, pois a comparação do ensaio acelerado com a carbonatação natural pode-se tornar imprópria (CUI et al., 2015).

No decorrer do ensaio acelerado de carbonatação, os corpos de prova são submetidos a concentrações de CO₂ superiores às encontradas em ambiente natural (aproximadamente 0,03%). Antes do ensaio na câmara de envelhecimento acelerado, as amostras são secas em estufas durante um curto período, a fim de reduzir a quantidade de água presente no material, o que conseqüentemente irá aumentar a difusividade do CO₂ no interior da matriz cimentícia. Esse teste é realizado em ambiente controlado, com umidade relativa pré-estabelecida, no intuito de ajudar no processo de carbonatação (TURCRY et al., 2014). Após algum tempo dentro da câmara, variando de acordo com cada pesquisa, as amostras são retiradas, pesadas e divididas em duas peças para serem testadas (THIERY, 2005).

O teste para identificar a frente de carbonatação consiste na medição do pH do concreto, que tende a ser reduzido pela ação da carbonatação, possibilitando, portanto, a avaliação da profundidade da carbonatação. A fenolftaleína é a solução utilizada para esse teste, sendo aplicada em uma superfície cortada do material. Com isso, as áreas carbonatadas permanecem incolores e as não carbonatadas passam a ser vermelhas ou roxas. As amostras testadas podem ser calculadas para a obtenção da profundidade de carbonatação, a partir dos cálculos de média e desvio padrão. A aplicação desse teste, por sua vez, requer alguns cuidados. É necessário atentar para que não ocorra a contaminação da superfície por poeira e, também, para que a superfície pulverizada com fenolftaleína não fique exposta por muito tempo, a fim de que não seja carbonatada antes do teste (MUNTEAN et al., 2005).

2.1.3 Consequências da carbonatação em argamassas

Segundo Ladeira (2017), a retração é uma consequência obtida pela ação da carbonatação. Esse fato gera um aumento no volume da matriz cimentícia, ocasionando a diminuição dos espaços entre as partículas da estrutura interna, o que causa a retração por depressão capilar (BASTOS, 2001).

A carbonatação também se torna prejudicial durante os processos de adsorção e dessorção do vapor da água. Nesse procedimento ocorrem modificações

físico-químicas, podendo alterar a microestrutura do material. O processo acontece quando uma amostra for sujeita à secagem, onde ocorrerá uma maior perda de água caso a amostra carbonate ao mesmo tempo. Esse fato não deve ser desprezado devido aos resultados negativos que a carbonatação pode apresentar sobre essas medidas (BAROGHEL-BOUNY, 1994).

O módulo de elasticidade é uma das propriedades que é influenciada pela ação da carbonatação, podendo ter um aumento em seu valor e dessa forma diminuindo a vida útil do revestimento, visto que uma argamassa ideal necessita de um baixo módulo de elasticidade (JOHN, 2003 apud POLITO, 2008).

Assim como no módulo de elasticidade, a dureza superficial também tende a aumentar devido a influência da carbonatação. Pois os dois fatores aumentam em regiões que possuem partículas de cimento não hidratadas, e a ação da carbonatação gera uma redução significativa no tamanho e na quantidade nessas partículas (HAN et al., 2015).

Contudo, além dos fatores citados, como o módulo de elasticidade e dureza superficial, nas argamassas de cimento a carbonatação se torna positiva em alguns aspectos, como o aumento da resistência mecânica, a diminuição da porosidade e da permeabilidade (YU et al., 2017).

O aumento do volume de sólidos do material também é uma consequência importante da carbonatação. A cristalização dos produtos de carbonatação verifica-se nos poros, sem que haja, necessariamente, expansão, na hipótese em que o volume dos poros seja maior em relação ao dos produtos constituídos. Estima-se um crescimento total do volume dos sólidos de aproximadamente 18% (GLASSER; MATSCHEI, 2007). Segundo pesquisas feitas por Pauletti (2009), a partir do aumento do volume dos sólidos, ocorre a redução do volume dos poros, assim como a superfície específica e do tamanho médio.

2.2 ENVELHECIMENTO DOS MATERIAIS POR CICLAGEM TÉRMICA

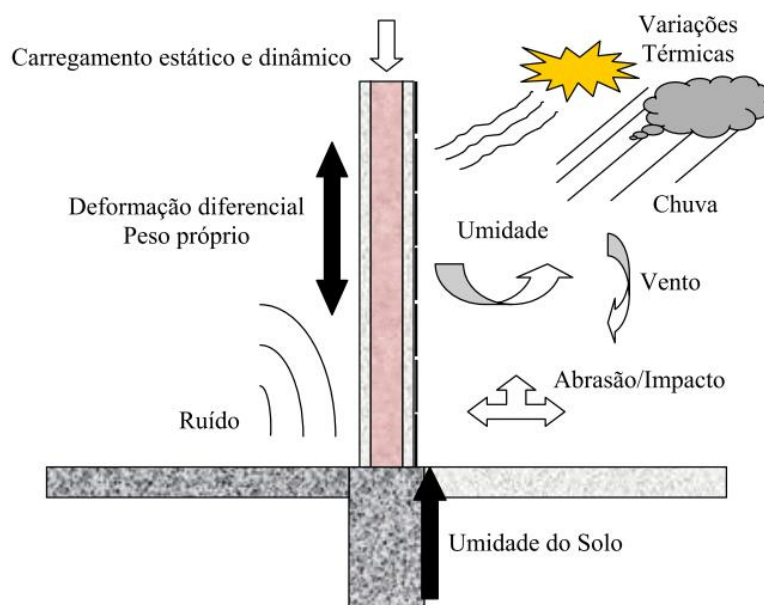
O fenômeno de envelhecimento dos materiais é amplamente estudado devido as mudanças que ocorrem nas suas propriedades. Esse conceito é conhecido devido ao conjunto de alterações físicas e químicas que ocorrem na estrutura do material, afetando diretamente sua durabilidade e desempenho. Esse fenômeno atinge principalmente os elementos de construção expostos à fatores climáticos,

como: variação de temperatura, radiação solar, umidade, vento e chuva (BOCHEN, 2015; NASCIMENTO, 2016).

As condições de exposição citadas possuem grande relevância quando se tratam de coberturas e fachadas de edifícios, devido ao frequente aquecimento oriundos dos raios solares, assim como o resfriamento decorrente das chuvas ou mudanças de temperaturas (OLIVEIRA; FONTENELLE; MITIDIARI FILHO, 2014).

A figura 6 ilustra os intemperes os quais o sistema de revestimento está submetido, como as variações térmicas, influência da chuva, vento e umidade, entre outras solicitações (UCHÔA, 2007).

Figura 6 – Solicitações que ocorrem nas fachadas das edificações



Fonte: Uchôa, 2007.

Com isso, ressalta-se que são inúmeras as manifestações patológicas que podem surgir nas fachadas de edifícios, mais precisamente em argamassas de revestimento em função das variações climáticas que ocorrem em cada lugar do Brasil e do mundo, destacando-se as fissuras e descolamentos em função da variação térmica e também a presença de manchas nos materiais (SILVA et. al, 2019). Dessa forma, nota-se a importância do estudo da ciclagem térmica para melhor entendimento da durabilidade dos materiais expostos a essa condição (OLIVEIRA; FONTENELLE; MITIDIARI FILHO, 2014).

2.2.1 Parâmetros que influenciam o envelhecimento dos materiais

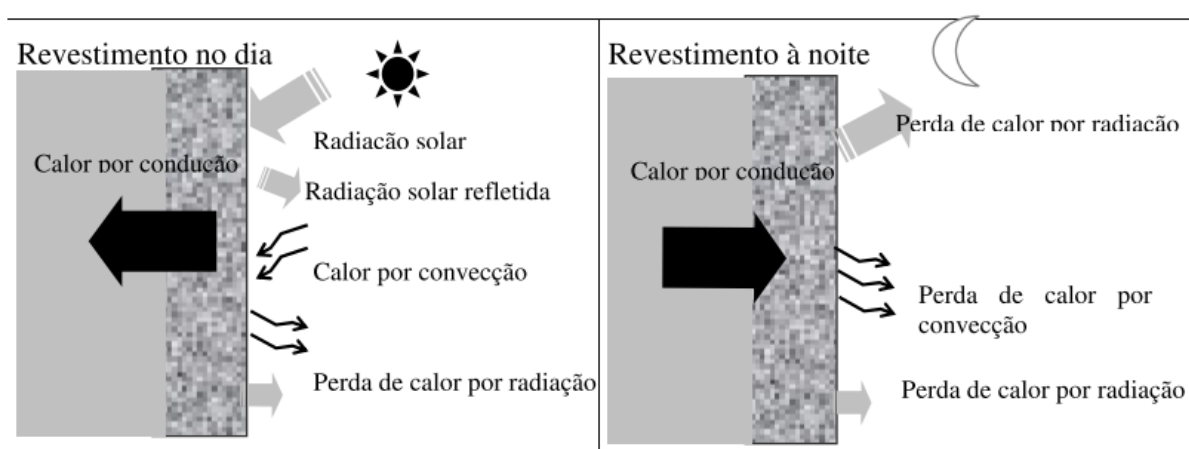
A seguir, estão descritos os parâmetros mais relevantes para o presente trabalho os quais influenciam o envelhecimento dos materiais e suas consequências, sendo eles: aquecimento e resfriamento; molhagem e secagem.

2.2.1.1 Aquecimento e resfriamento

A deterioração dos revestimentos argamassados ocorre devido as mudanças de estações e as oscilações de temperatura que acontecem durante o dia, podendo gerar dilatação com a decorrência do aumento de temperatura, e retração, esta devido a diminuição de temperatura. Eventualmente, a temperatura do ambiente pode variar rapidamente, fazendo com que o material sofra elevadas tensões internas. Esse fenômeno é conhecido como choque térmico (SENTENA; KAZMIERCZAK; KREIN, 2018).

A partir disso, destaca-se a figura 7, que representa a transferência de calor que ocorre durante o dia e a noite nas fachadas, onde, ao longo do tempo, essas oscilações de temperatura resultam no aumento e na quantidade de microfissuras, a partir do coeficiente de expansão térmica e da condutividade térmica das argamassas, provocando a deterioração do revestimento e, conseqüentemente, a diminuição da sua vida útil (SENTENA; KAZMIERCZAK; KREIN, 2018).

Figura 7 – Transferência de calor em fachadas ao longo do dia



Fonte: Esquivel, 2009.

Esquivel (2009) destaca que o efeito das tensões térmicas oriundas da oscilação da temperatura nos revestimentos vem sendo estudado ao longo dos anos em algumas situações, tais como: resistência à compressão, conforto térmico, diferenças de expansões e tensões térmicas, módulo de elasticidade e resistência de aderência, sendo os dois últimos mais relevantes para o presente trabalho.

No ano de 2004, Fu et al. estudaram argamassas de revestimento sujeitas a ciclos térmicos com temperaturas que oscilavam de 0 à 600°C. A partir dos resultados obtidos na pesquisa, os autores verificaram uma diminuição gradual do módulo de elasticidade à medida que a temperatura ia subindo. A diminuição do módulo de elasticidade também ocorre na pesquisa realizada por Sentena, Kazmierczak e Krein (2018), que avaliaram os efeitos da ciclagem térmica em argamassas com a presença de finos.

A variação de temperatura se torna prejudicial quando analisada a resistência de aderência do revestimento, devido as tensões e deformações ocorridas em cada oscilação, onde dessa forma, ocorre o comprometimento a durabilidade do material. Esse fato ainda pode ser agravado quando realizados ciclos de choques térmicos em revestimentos que possuem módulo de elasticidade elevados (ESQUIVEL, 2009).

2.2.1.2 Molhagem e secagem

A umidade é uma das maiores causadoras de efeitos patológicos nas edificações. A presença de água em revestimentos argamassados pode ocorrer de diferentes formas, sendo elas: capilaridade, infiltração por água de chuva, condensação, umidade e pressão de água (KAZMIERCZAK et al., 2016).

Ao longo dos anos, inúmeras pesquisas sobre o efeito das chuvas em edificações vêm sendo realizadas. Esse tema se torna importante devido a necessidade de se garantir a durabilidade dos materiais expostos a essa condição, visto que o excesso de água influencia fortemente para a degradação desses materiais, principalmente aqueles que compõe as fachadas, como as argamassas de revestimento (STRAUBE, 2002). Devido à chuva ser carregada por um vento atuante de uma direção, cada fachada da edificação receberá uma quantidade diferente de água. Sendo assim, a fachada que fica de frente ao vento dominante terá uma porção de água maior que as demais fachadas (FREITAS, 2012).

Thomaz (1989 apud NASCIMENTO, 2016) cita que há duas classificações para as variações dimensionais oriundas da umidade, sendo elas: reversíveis ou irreversíveis. As reversíveis ocorrem tanto na molhagem quanto na secagem do material, e possuem um limite que é estabelecido a partir do período de alteração da umidade. Por sua vez, as irreversíveis ocorrem após a fabricação do material no período que a umidade higroscópica fica em equilíbrio, sendo obtida a partir da perda ou ganho de água. Dessa forma, o autor destaca que a absorção de água de cada material varia de acordo com sua porosidade e capilaridade.

Straube (2002) cita que, de forma geral, as principais patologias decorrentes da ação da umidade em revestimentos, que são: manchas, corrosão, descolamento de revestimentos, fissuras, entre outros.

Por sua vez, a fissuração das argamassas de revestimento ocorre devido aos ciclos de secagem e molhagem a partir da ação da chuva e insolação, provocando seu inchamento e retração. As fissuras em si não são tão prejudiciais às argamassas, o que de fato gera preocupação são os mecanismos de deterioração que ocorrem a partir da presença delas, como a penetração de água e a formação de microrganismos (FREITAS, 2012).

Chen et al. (2012) observaram uma quantidade de pesquisas relevantes sobre o comportamento mecânico de materiais cimentícios que tendem a variar consideravelmente dependendo da quantidade de umidade presente nos mesmos. Dentre as pesquisas realizadas, destacam-se o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, que variam seus resultados consideravelmente quando ocorre a oscilação de água durante os processos de molhagem e secagem. Quando o material é molhado e em seguida seco, a sua resistência e módulo de elasticidade tendem a aumentar localmente. A partir do mesmo processo, também ocorre o endurecimento do material na deformação plástica (CHEN et al., 2012).

Ressalta-se que quando há um equilíbrio entre a molhagem e secagem, dificilmente ocorrerão problemas nos materiais em questão. Esse equilíbrio só ocorre caso haja um controle da umidade, ou seja, diminuindo a molhagem, que pode ocorrer a partir do aumento da estanquidade, redução no volume de penetração e absorção da água da chuva. Entretanto, visto que é praticamente impossível haver uma construção perfeita, sempre ocorrerá a molhagem dos materiais, e dessa forma, sempre haverá alterações nas propriedades mecânicas dos materiais, mesmo que ocorram de forma reduzida (STRAUBE, 2002).

2.2.2 Ensaio de envelhecimento acelerado

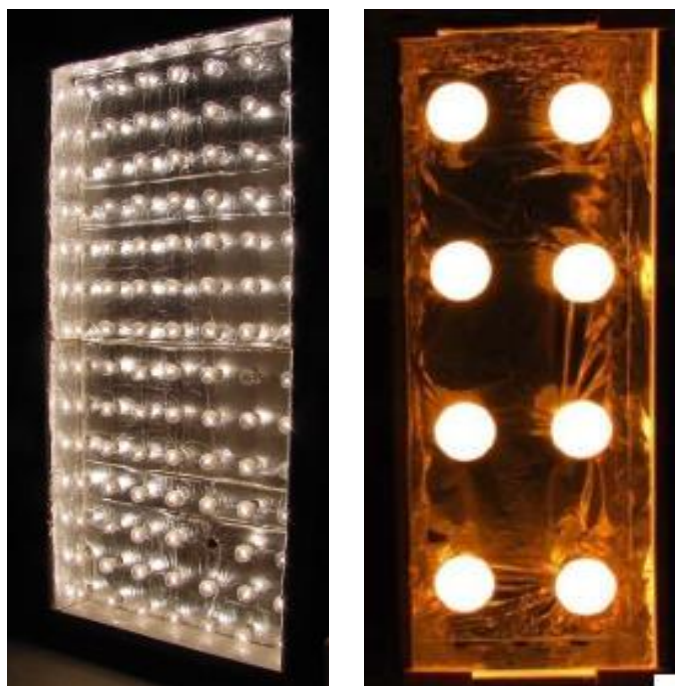
A determinação do comportamento de materiais sujeitos aos fatores atmosféricos vem sendo estudada há muitos anos a partir de testes de envelhecimento a longo prazo, executados de forma natural. Porém, apesar de haver um alto índice de confiabilidade nesse tipo de teste, há também uma grande desvantagem em função do tempo, já que ensaios naturais possuem longa duração para que se possam resultados relevantes. Com isso, cientistas desenvolveram testes que podem ser realizados a curto prazo, denominados como ensaio de envelhecimento acelerado, substituindo dessa forma os longos ensaios naturais (BOCHEN, 2013).

O ensaio de envelhecimento acelerado deve ser realizado de forma que se obtenha resultados semelhantes aos ensaios realizados em condições normais de exposição. As condições de aquecimento e resfriamento utilizadas nesse tipo de ensaio devem ser somente o necessário para que se acelere o processo de degradação, gerando apenas os fenômenos que ocorrem de forma natural (SENTENA, 2015).

Para a realização do ensaio de envelhecimento acelerado por ciclagem de temperatura e choque térmico, pesquisadores utilizam equipamentos capazes de realizar o aquecimento nos revestimentos até que se atinja a temperatura superficial das amostras, podendo variar de 70°C à 80°C \pm 5°C, dependendo do tipo de pesquisa e objetivos a serem atingidos (ESQUIVEL, 2009; MIRANDA; SELMO, 2003). O tipo de equipamento utilizado pode variar dependendo da norma a ser seguida, conforme descrito a seguir.

No Brasil, por exemplo, destacam-se os trabalhos de Miranda e Selmo (2003) e Esquivel (2009), que utilizaram um painel construído conforme modelo proposto pelo IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1998) de dimensões de 130cm x 230cm com 98 lâmpadas incandescentes, sendo 150W cada uma, conforme apresentado na figura 8a. Outro trabalho semelhante foi realizado por Sentena (2015), que realizou uma adaptação da norma ABNT NBR 15575-4:2013 para a execução do equipamento, construindo caixas térmicas com dimensões de 50cm x 40cm x 140cm compostas por 8 lâmpadas com 250W de concentração de radiação infravermelha (figura 8b).

Figura 8 – Equipamentos utilizados em ensaios de envelhecimento acelerado no Brasil



a) Painel utilizado por Esquivel (2009);
b) Caixa utilizada por Sentena (2015);

Fonte: Esquivel, 2009; Sentena, 2015.

O ensaio ocorre a partir do posicionamento das amostras no equipamento a ser utilizado, como painel ou caixa. Quando a temperatura superficial é atingida, realiza-se o resfriamento das peças que ocorre durante um tempo pré estabelecido, e posteriormente realiza-se a molhagem do revestimento simulando a água da chuva. Posteriormente são feitas as análises e os ensaios das peças envelhecidas (MIRANDA; SELMO, 2003). Ressalta-se que a quantidade de ciclos, tempo de aquecimento e resfriamento é muito relativo, dependendo da temperatura a qual o ensaio está sendo executado, bem como os resultados a serem obtidos e o equipamento utilizado, por isso os pesquisadores normalmente realizam testes pilotos para melhor entendimento do ensaio, conforme Esquivel (2009).

Bochen (2015) realizou uma pesquisa voltada a avaliação e comparação das propriedades físicas e mecânicas de argamassas de revestimento submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado por ciclagem térmica e em ambiente natural, de forma que fosse possível obter resultados e comparar a eficácia dos ensaios simulados em laboratório. Os ensaios simulados foram realizados em 500 ciclos,

sendo que a cada 100 ciclos eram necessárias de 4 a 5 semanas, onde as variações de temperatura foram de 15,9°C para mínima e 59,9°C para máxima; o ensaio natural ocorreu durante o período de 2 anos (24 meses).

Após a conclusão dos ensaios, pode-se observar as seguintes variações das propriedades nas duas situações: resistência à compressão diminuiu 3 vezes mais na situação simulada; maior absorção por capilaridade no ensaio de envelhecimento acelerado; a aderência após o envelhecimento natural foi maior do que no ensaio acelerado; permeabilidade aumentou no ensaio natural (BOCHEN, 2015).

As conclusões feitas por Bochen (2015) foram semelhantes às pesquisas realizadas por Sentena (2015), comprovando dessa forma a necessidade de estudos mais elaborados referente a ensaios de envelhecimento acelerado por ciclagem térmica, de modo que se obtenha mais respostas a partir de avaliações das outras propriedades de argamassas de revestimento, bem como a avaliação da influência de outros fenômenos, como a carbonatação.

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Sabe-se que as argamassas compostas por cal hidratada e areia são utilizadas há pelo menos 11 mil anos (CARASEK, 2010; GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2004). A função da cal hidratada em argamassas é garantir a união dos grãos de areia da forma mais prolongada possível. Assim como o cimento presente na argamassa necessita de água para reagir e endurecer, a cal necessita do CO₂ presente na atmosfera, ocorrendo a carbonatação e gerando carbonatos sólidos (GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2004).

Atualmente, o uso da cal em argamassas se torna reduzido devido ao grande consumo de cimento Portland pelo mundo. Entretanto, argamassas contendo cal em sua composição possuem uma ótima durabilidade quando comparada ao cimento e demais materiais cimentícios, além de resultarem boas propriedades mecânicas nos revestimentos (GRILO et al., 2014). As vantagens da utilização da cal em argamassas de cimento se dão devido a sua leveza e finura, o que proporciona uma melhor fluidez, coesão, retenção de água e trabalhabilidade. Além disso, ressalta-se que a cal hidratada quando acionada a argamassas de cimento gera uma redução considerável no módulo de elasticidade, sem afetar de forma significativa a resistência à tração (COELHO; TORRAL; JALALI, 2009).

Dessa forma, conclui-se que a cal é um material importante quando se trata de durabilidade de um revestimento. Onde, a durabilidade por sua vez é denominada como a resistência ao impacto que ocorre inúmeras vezes ao longo da utilização do material de construção. Porém, quando se trata de durabilidade de um revestimento, outros fatores também devem ser avaliados, como o material utilizado e suas propriedades, e também o meio agressivo o qual o revestimento está exposto (BOCHEN, 2013).

2.3.1 Resistência de aderência

A aderência é a propriedade que representa a resistência que uma argamassa tem quando está em contato com uma base ou substrato. Essa propriedade é a de maior importância quando se trata de argamassas de revestimento pois é ela quem vai resistir aos esforços de tração e cisalhamento (CARASEK, 2010).

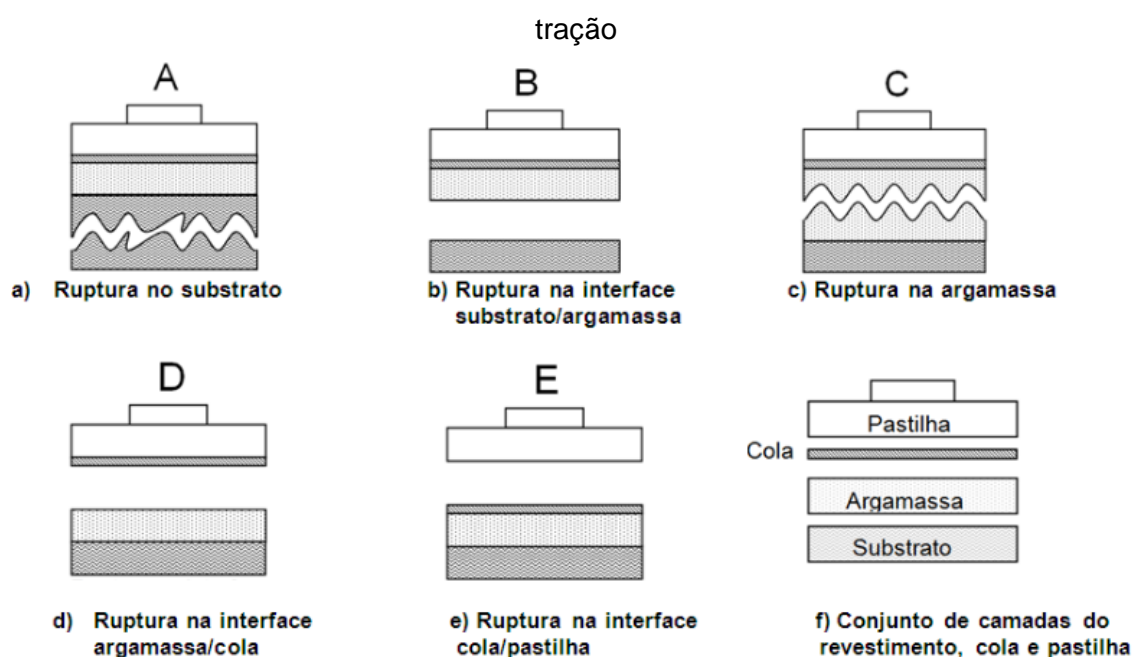
O maior problema que pode ocorrer devido à baixa aderência de uma argamassa de revestimento é a perda da estabilidade, que pode acarretar no deslocamento e na queda do revestimento de uma fachada externa, prejudicando a estética da edificação e no pior caso, danos aos humanos. Essa falha geralmente ocorre na interface entre o revestimento e a base, que pode ser provocada a partir de materiais de qualidade baixa, má aplicação, preparação da base de forma incorreta, condições climáticas, vento, umidade, reologia da argamassa, retenção de água, rugosidade e porosidade do substrato, entre outros (CARASEK, 2010; RUDUIT, 2009).

Valdameri (2005) realizou uma pesquisa que visava avaliar o comportamento da resistência de aderência à tração em argamassas preparadas com diferentes traços compostas por cimento, cal e areia. As argamassas com traço de 1:2:9 obtiveram uma resistência menor que as argamassas de traço 1:1:6, sendo essa última atendendo ao requisito mínimo da norma ABNT NBR 13749:2013 de $\geq 0,3$ MPa para argamassas de revestimento externas. Os resultados de Valdameri (2005) são semelhantes aos encontrados por Silva e Campiteli (2008a), que ressaltaram ainda que, quanto maior a quantidade de cimento, maior a resistência mecânica da argamassa e, portanto, maior fissuração.

Para determinar a resistência de aderência à tração utiliza-se a norma ABNT NBR 13528:2019. A norma especifica que o ensaio ocorra a partir de uma perfuração no revestimento com uma serra copo possuindo diâmetro de 50mm, que deve chegar de 1mm a 5mm para dentro do substrato. Após o corte, colam-se pastilhas metálicas circulares em cima do corpo de prova para posteriormente realizar o ensaio de tração com o auxílio do equipamento denominado Dinamômetro de tração obtendo a carga em Newtons a qual o corpo de prova rompeu. Em seguida realiza-se a medição da área do corpo de prova e calcula-se o valor final de resistência à tração.

Vale destacar, que além da carga em Newtons atingida pelo ensaio de resistência de aderência à tração, a norma ABNT NBR 13528:2019 também sugere que sejam analisadas as formas de ruptura obtidas pelo ensaio, como mostra a figura 9.

Figura 9 – Formas de rupturas obtidas pelo ensaio de resistência de aderência à



Fonte: ABNT NBR 13528:2019.

Carasek (2010) salienta que a forma de ruptura é de extrema importância para a análise de resultados de resistência de aderência à tração. A autora explica que quando as rupturas ocorrem no substrato ou na argamassa (figura 9a e figura 9c, respectivamente) os valores de resistência são pouco preocupantes, desde que não estejam muito baixos. Porém, quando a ruptura ocorre na interface (figura 9b), os valores são mais alarmantes, visto que há uma maior possibilidade para a

ocorrência de problemas patológicos. Quando a ruptura ocorre conforme a figura 9d, significa que a superfície da argamassa é a parte menos resistente, e somando a valores de resistência baixos, aponta que a resistência superficial é inadequada. Por fim, a figura 9e denota-se um defeito na colagem da pastilha, tendo esse resultado descartado da análise final (CARASEK, 2010).

Após a realização do ensaio, Carasek (2011 apud MALAGONI; SCARTEZINI, 2013) ainda sugere que para a análise de resultados obter mais informações, é importante realizar a média das resistências encontradas assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação. A autora afirma que os resultados obtidos no ensaio de resistência de aderência à tração em argamassas geralmente apresentam coeficientes de variação distintos, podendo variar de 10% a 35%, mas também é comum chegarem a valores mais altos, como 50 e 60%.

2.3.2 Módulo de elasticidade

Argamassas que possuem maior resistência de aderência inicial muitas vezes podem ter uma vida útil menor do que as argamassas que possuem menor aderência. Esse fato ocorre devido aos esforços cíclicos de molhagem e secagem das argamassas influenciarem diretamente na tensão de cisalhamento, bem como a fluência, a retração da estrutura e por secagem, e a carbonatação. Com a atuação desses esforços, a argamassa e sua base tendem a contar com a presença de microfissuras na sua interface. A causa desse para isso é o fato de haver um aumento do módulo de elasticidade da argamassa, pois isso gera uma maior tensão de cisalhamento (JOHN, 2003 apud POLITO, 2008).

Para ser considerada de qualidade e possuir boa durabilidade, as argamassas de revestimento devem possuir capacidade de absorver deformações, e o módulo de elasticidade é a propriedade capaz de determinar esse efeito. Essa propriedade consegue gerar os resultados que dizem respeito sobre a deformação e a rigidez dos revestimentos argamassados, que se dão a partir da avaliação do comportamento elástico dos mesmos. O módulo de elasticidade é uma das propriedades mecânicas de mais interesse quando se diz respeito as argamassas de revestimento, visto que possui uma forte ligação no surgimento de fenômenos patológicos nesse tipo de material, destacando-se a fissuração (SILVA; CAMPITELI, 2008a, 2008b).

As argamassas que possuem cal hidratada em sua composição geralmente possuem um módulo de elasticidade baixo, inferior a 10GPa (GOMES, 1995 apud POLITO 2008), sendo esse geralmente considerado ideal pela literatura. Isso significa que esse tipo de argamassa tem uma capacidade maior de suportar as movimentações que ocorrem nas edificações, e dessa forma, reduzem a tendência do surgimento de trincas e fissuras (GUIMARÃES; GOMES; SEABRA, 2004).

A determinação do módulo de elasticidade de argamassas pode ser realizada a partir da ABNT NBR 15630:2009 através de propagação de ondas ultrassônicas. Conforme a norma, para se obter o resultado do módulo de elasticidade são utilizados transdutores que propagam as ondas de forma longitudinal nos corpos de prova de argamassa com dimensões de 4cm x 4cm x 16cm com frequência de 20 kHz. Porém, ao utilizar esse método em conjuntos de argamassa/bloco, Lunardi (2021) chegou a conclusão de que não se há confiabilidade, visto que o ensaio gera uma variabilidade elevada, em torno de 7%.

Đureje e Prošek (2017) explicam que há outros diferentes métodos capazes de detectar o módulo de elasticidade, podendo se dividir em métodos de contato e sem contato (visual) (ZHU et al., 2018). Como um método de contato, destacam-se a utilização de extensômetros, que consistem em medir a deformação média das amostras a partir de dados obtidos por uma conexão em uma prensa hidráulica. Contudo, a utilização dos extensômetros se torna pouco viável, visto que esse material pode facilmente sofrer danos caso ocorra uma falha no corpo de prova ensaiado, além de não possuírem precisão de leitura para conseguir detectar o deslocamento e a tensão necessária na etapa elástica do material, devido ao fato de a argamassa ter uma baixa resistência mecânica. Dessa forma, os métodos ópticos são mais viáveis, como o Digital Image Correlation (DIC) que tem como princípio a utilização da tecnologia para realizar as medições necessárias para se obter o módulo de elasticidade (ĐUREJE; PROŠEK, 2017; ZHU et al., 2018).

2.3.2.1 Módulo de elasticidade por Digital Image Correlation (DIC)

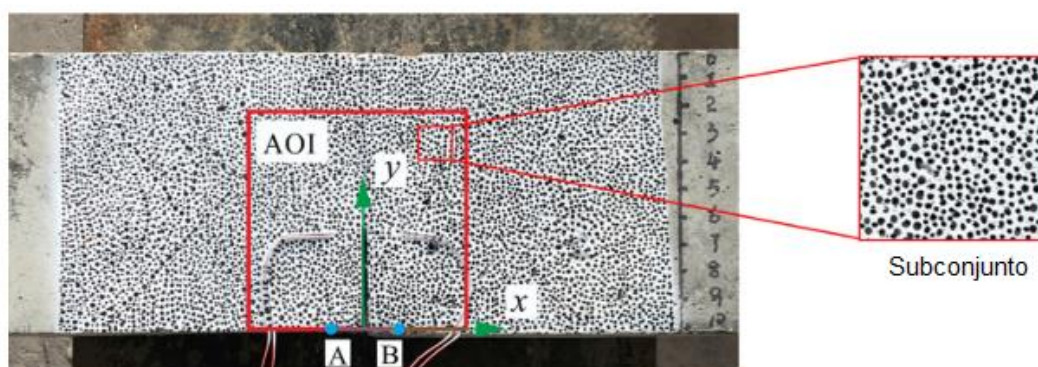
A técnica de Digital Image Correlation (DIC) foi desenvolvida nos anos 80 e segue sendo amplamente estudada, pois devido ao avanço da tecnologia, pesquisadores procuram novas maneiras de aperfeiçoar o método. Essa técnica se trata de realizar a medição das deformações e deslocamentos de materiais de forma

visual, ou seja, sem contato com a amostra em questão (BLABER; ADAIR; ANTONIOU, 2015; CHU; RANSON; SUTTON, 1985; MCCORMICK; LORD, 2010) McCormick e Lord (2010) consideram o método ideal para realizar essas medições em campo, pois possui grande potencial de se tornar uma solução precisa, fácil e de baixo custo, em comparação com outras técnicas.

O método de DIC trata da interpretação do deslocamento de certos pontos de um material rastreando pixels de registros fotográficos. Isso possibilita a produção de campos vetoriais de deformação da área desejada, podendo ser 2D e/ou 3D, além de registrar o mapa de deformação da amostra (BLABER; ADAIR; ANTONIOU, 2015; MCCORMICK; LORD, 2010). Esses registros ocorrem a partir de uma imagem de referência, com o material ainda sem deformação, até a imagem que resulta em frações de segundos antes da ruptura (BLABER; ADAIR; ANTONIOU, 2015).

Zhao et al. (2021) realizaram uma pesquisa propondo um método experimental para a realização do DIC. Os autores observam que antes da realização do ensaio ocorre primeiramente a partir da preparação de uma amostra, que é pintada com uma tinta branca e posteriormente são acrescentados, de forma similar (porém aleatória), diversos pontos pretos em sua superfície (figura 10). Essa preparação ocorre para que se tenha uma melhor qualidade dos pixels das imagens.

Figura 10 – Preparo da amostra do método DIC



Fonte: Adaptado de Zhao et al., 2021.

Após o preparo, as amostras são colocadas em uma prensa hidráulica onde recebem a carga de tração na flexão. No experimento de Zhao et al. (2021) foram utilizadas duas luzes para controle do brilho e duas câmeras de alta velocidade posicionadas em pontos estratégicos em frente a prensa para que se obtivesse a deformação bidirecional da amostra, capturando dessa forma o processo completo

de deformação (figura 11). Uma das câmeras era capaz de capturar 25 fotos por segundo, registrando do início do processo até o colapso da amostra. A outra câmara capturou 250 fotos por segundo, e a partir dessas imagens foi possível observar o momento exato do colapso do corpo de prova.

Figura 11 – Posicionamento da amostra, câmeras e luzes para o ensaio de DIC



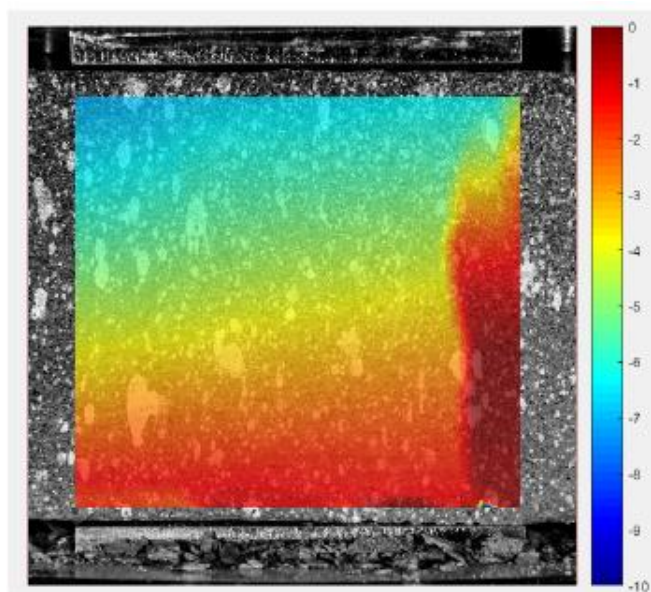
Fonte: Zhao et al., 2021.

Como citado anteriormente, o DIC é um método que vem sendo estudado há algumas décadas, e dessa forma, diversos softwares e fórmulas já foram estudadas para o auxílio na compreensão dos resultados dos registros fotográficos. Sendo assim, o software mais utilizado pelos pesquisadores tem sido o Ncorr, que se baseia na análise 2D dos subconjuntos estudados (BLABER; ADAIR; ANTONIOU, 2015). Contudo, o software Ncorr expressa seus valores na forma de deslocamento de pixels, com isso, os mesmos devem ser adicionados a um plug in ligado ao software para serem convertidos em valores de deslocamento e deformação em escala. Após a conversão, é possível obter os valores reais e conseqüentemente gerar o gráfico de tensão x deformação (KUMAR; ARAVIND; HOSSINEY, 2019).

O software Ncorr gera valores e imagens separadas de deslocamento e tensão nos eixos vertical, horizontal e diagonal. Geralmente, os autores utilizam apenas a imagem de tensão para a realização da análise visual, podendo ser em qualquer sentido, variando de acordo com o ensaio. Os deslocamentos são utilizados para a realização de cálculos de gráficos, aparecendo pouco de forma

visual. A figura 12 representa uma a imagem que contém as tensões já processada pelo software Ncorr, onde sua análise visual é realizada a partir das cores representadas, sendo a cor vermelha onde ocorreu o maior deslocamento de tração e a cor azul o maior deslocamento de compressão (SUTTON; ORTEU; SCHREIR, 2009; VORA et al., 2018).

Figura 12 – Processamento realizado no Ncorr



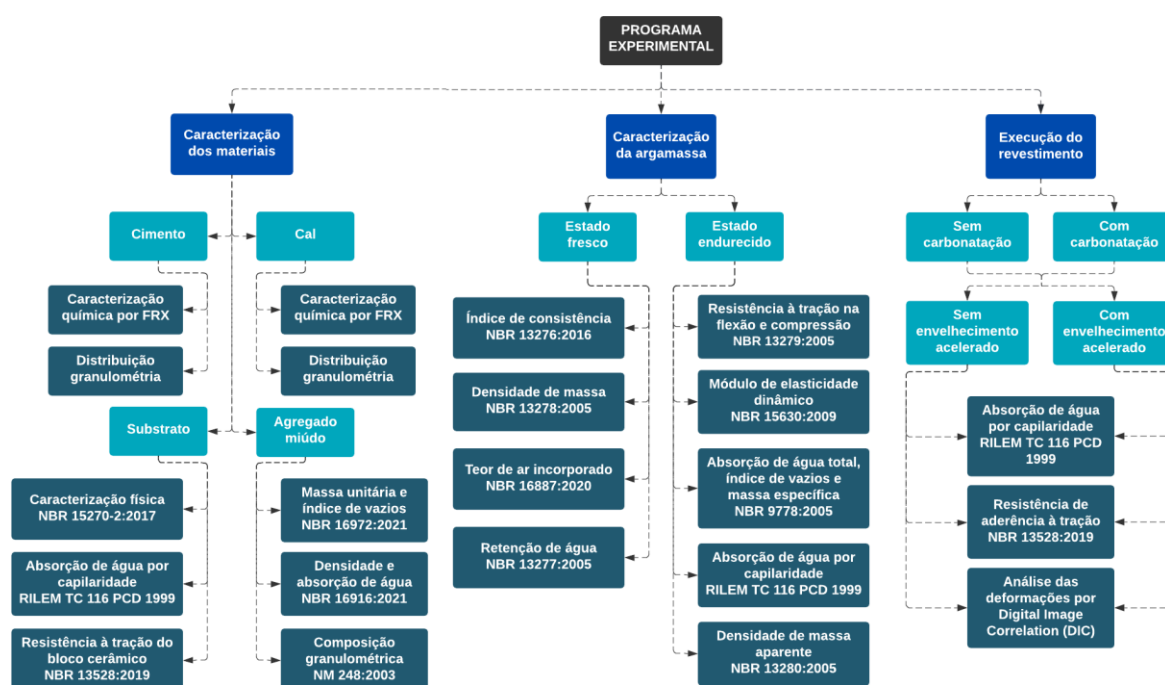
Fonte: Āureje e Prošek, 2017.

Āureje e Prošek (2017) utilizaram o método DIC para determinarem o módulo de elasticidade em pastas de cimento. Após a análise de resultados, os autores chegaram à conclusão de que esse método é mais eficaz e preciso que o método ultrassônico e o método de ressonância.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo serão descritos os fatores de controle e níveis de resposta necessários para a execução do trabalho, seguindo com o programa experimental e os métodos a serem realizados. A figura 13 representa o fluxograma detalhado do programa experimental que se divide em caracterização dos materiais, caracterização da argamassa nos estados fresco e endurecido e os ensaios referentes ao sistema de revestimento.

Figura 13 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1. FATORES E VARIÁVEIS

Os fatores e variáveis propostos para a execução do programa experimental estão descritos a seguir.

3.1.1 Fatores de controle com níveis variáveis

Com o objetivo de avaliar o comportamento do revestimento argamassado em diferentes situações, foram propostos 4 tipos de combinações de argamassas que

serão executadas nesse trabalho. No quadro 1 é possível observar os fatores de controle, os níveis de estudo e a nomenclatura proposta para cada tipo de combinação.

Quadro 1 – Fatores de controle, níveis de estudo e nomenclatura

Fatores de controle	Não carbonatado		Carbonatado	
	Sem envelhecimento acelerado	Com envelhecimento acelerado	Sem envelhecimento acelerado	Com envelhecimento acelerado
Níveis de estudo				
Nomenclatura	NC	NC E	C	C E

Fonte: Elaborado pela autora.

Onde:

NC: não carbonatado;

C: carbonatado;

E: envelhecimento acelerado.

3.1.2 Fatores fixos

Os fatores fixos utilizados nesse trabalho foram:

- a) Tipo de cimento: CP II-F-40;
- b) Tipo de cal: Cal hidratada CH I;
- c) Agregado miúdo: areia fina;
- d) Traço da mistura: 1:1,5:4;
- e) Relação água/aglomerante: 0,9;
- f) Cura: 61 dias em ambiente com umidade relativa de 90% ± 5%;
- g) Sazonamento: 25 dias com UR de 60% ± 5%;
- h) Carbonatação: 54 dias na câmara de carbonatação com teor de CO₂ de 3%, temperatura de 26°C e UR de 60% ± 5%;
- i) Envelhecimento acelerado: 10 ciclos.

3.1.3 Variáveis de Resposta

Com o objetivo de realizar análises macroestruturais dos revestimentos argamassados, antes e depois da carbonatação e do envelhecimento acelerado por

ciclagem térmica, o quadro 2 foi elaborado com o intuito de identificar as variáveis de resposta e seus respectivos números de repetições realizados no programa experimental.

Quadro 2 – Variáveis de resposta e número de amostras

Variáveis de resposta	Nº de amostras
Análise de deformação por DIC	20
Absorção de água por capilaridade	16
Resistência de aderência à tração	64

Fonte: Elaborado pela autora.

Com o quadro 2, observa-se as variáveis de resposta e a quantidade de amostras utilizadas. Para a análise de deformações por DIC foram utilizadas 20 amostras de 5cm x 5 cm x 3,5cm, visto que o valor de 3,5 cm é espessura média da amostra (substrato 1 cm + argamassa 2,5 cm), sendo 5 amostras por variável.

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade, utilizou-se 16 amostras de 14cm x 19cm x 3,5cm, sendo 4 amostras por variável. Com as mesmas amostras realizou-se o ensaio de resistência de aderência à tração, onde foram extraídas 4 amostras cilíndricas com diâmetro de 5cm, totalizando 16 corpos de prova por variável. A forma de extração está descrita no item 3.3.8.2. Essa quantidade de amostras extraídas é um terço a mais do que indicada na norma de referência, a ABNT NBR 13528:2019. Optou-se por utilizar mais corpos de prova devido a probabilidade de perder amostras durante o ensaio. Dessa forma, o ensaio de tração resultou em 64 amostras no total.

O bloco cerâmico utilizado para a realização das amostras possui dimensões de 14cm x 19cm x 9cm, e no total foram executadas 30 placas de revestimentos, sendo 20 para a execução do trabalho e 10 reservas para caso houvesse alguma perda durante os ensaios.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais e suas respectivas caracterizações que foram utilizados nesse trabalho para o desenvolvimento do sistema de revestimento e das argamassas estarão descritos nos itens a seguir.

3.2.1 Cimento

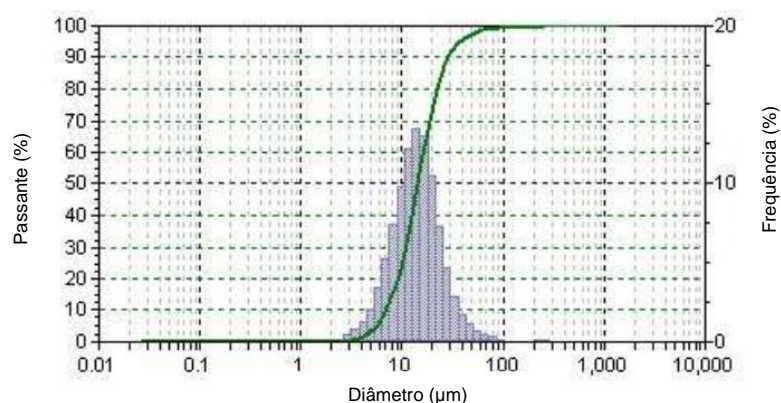
O cimento que será utilizado na pesquisa é o CP II-F-40, da marca Votorantim, localizada em Canoas-RS. Optou-se por utilizar esse tipo de cimento por ser amplamente utilizado na produção de argamassas. A quantidade de sacos de cimento utilizadas foram adquiridas diretamente do silo. Para evitar que o material pegasse umidade, o cimento foi ensacado em diversos sacos com menor quantidade e estocados em um tonel no LMC da UNISINOS. A tabela 1 representa a caracterização química e a figura 14 a distribuição granulométrica do cimento, que apresentou D50 14,33 μ m e D90 28,49 μ m. Os testes de caracterização química e de granulometria foram realizados pelo Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais (IcvMAT), da UNISINOS.

Tabela 1 – Caracterização química do cimento por FRX

Resultado	%
Na ₂ O	0,486
MgO	3,709
Al ₂ O ₃	2,477
SiO ₂	13,070
P ₂ O ₅	0,124
SO ₃	1,723
K ₂ O	0,761
CaO	45,531
TiO ₂	0,236
Cr ₂ O ₃	0,009
MnO	0,063
Fe ₂ O ₃	2,403
ZnO	0,020
SrO	0,087
L.O.I	6,272

Fonte: Laboratório de caracterização e valorização dos materiais (IcvMAT).

Figura 14 – Distribuição granulométrica do cimento



Fonte: Laboratório de caracterização e valorização dos materiais (IcvMAT).

A tabela 2 representa os dados de finura, tempo de pega e resistência à compressão do cimento fornecidos pelo fabricante e foram realizados no próprio laboratório do fabricante.

Tabela 2 – Finura, tempo de pega e resistência à compressão do cimento

	Finura (%)		Tempo de pega (min.)		Resistência à compressão (MPa)			
	#200	#325	Início	Fim	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Média	0,00	0,33	255,71	325,48	23,74	34,70	40,00	47,23
Desvio Padrão	0,00	0,26	5,31	8,65	0,85	0,89	0,45	0,35
Mínimo	0,00	0,00	240,00	300,00	22,60	33,30	39,00	46,80
Máximo	0,00	1,40	260,00	340,00	25,20	36,50	41,30	48,40

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante.

3.2.2 Cal

A cal utilizada foi a cal hidratada CH I, da marca Hidracal, localizada na cidade de Canoas-RS. A quantidade de cal também foi obtida de um único lote, para que se obtivesse um maior controle de suas propriedades. De acordo com Sentena (2015), antes de realizar os ensaios de caracterização e produção das argamassas, a cal deve ser misturada com água 24 horas antes. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de garantir a adsorção de água pela cal. A tabela 3 representa a caracterização química e a figura 15 a distribuição granulométrica da cal, que apresentou D50 25,85μm e D90 61,41μm. Os valores de D50 e D90 da cal e do

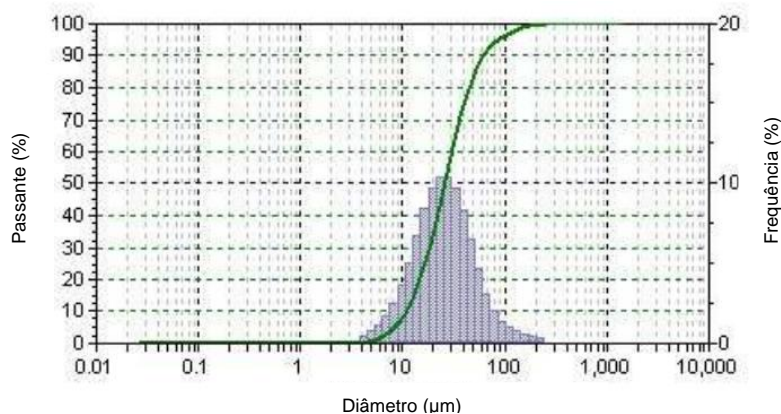
cimento (item 3.2.1) mostram que o cimento possui uma granulometria inferior a da cal.

Tabela 3 - Caracterização química da cal por FRX

Resultado	%
Na ₂ O	ND
MgO	30,555
Al ₂ O ₃	0,359
SiO ₂	0,818
P ₂ O ₅	0,205
SO ₃	0,037
K ₂ O	0,125
CaO	41,205
TiO ₂	0,018
MnO	0,029
Fe ₂ O ₃	0,312
SrO	0,000
L.O.I	23,258

Fonte: Laboratório de caracterização e valorização dos materiais (IcvMAT).

Figura 15 – Distribuição granulométrica da cal



Fonte: Laboratório de caracterização e valorização dos materiais (IcvMAT).

3.2.3 Agregado Miúdo

A areia utilizada no trabalho é de granulometria fina e foi adquirida na empresa Coneresul, localizada na cidade de Novo Hamburgo-RS. Para que fosse retirada toda sua água, de modo a estabelecer a quantidade exata de água utilizada na mistura da argamassa, a areia foi seca em estufa a 100°C. Com a areia seca, a mesma foi peneirada inicialmente na peneira #4,8, porém, como havia a presença

de muitas pedras, realizou-se um novo peneiramento com a peneira #2,38. Posteriormente, a areia foi estocada em sacos de 100 litros em um tonel do LMC da UNISINOS, de forma que a mesma estivesse em temperatura ambiente quando fosse realizada a mistura.

A seguir, estão representadas as normas da ABNT, utilizadas para a caracterização da areia, e os respectivos ensaios realizados:

- a) ABNT NBR 16972:2021: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios;
- b) ABNT NBR 16916:2021: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água;
- c) ABNT NBR NM 248:2003: Agregados – Determinação da composição granulométrica.

A tabela 4 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização do agregado miúdo.

Tabela 4 – Caracterização do agregado miúdo

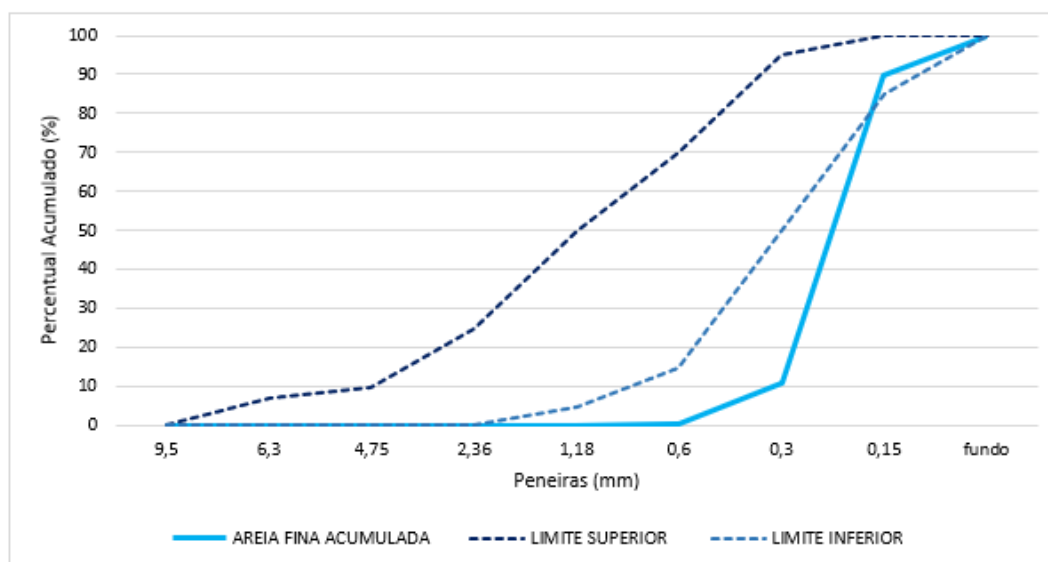
Ensaio	Norma	Resultado	Unidade de medida
Massa específica seca	ABNT NBR 16916:2021	2,62	g/cm ³
Massa específica saturada superfície seca	ABNT NBR 16916:2021	2,64	g/cm ³
Massa unitária	ABNT NBR 16972:2021	1,52	g/cm ³
Índice de vazios	ABNT NBR 16972:2021	99,94	%
Absorção de água	ABNT NBR 16916:2021	0,79	%

Fonte: Elaborado pela autora.

A figura 16 representa a granulometria da areia utilizada no trabalho. Os limites máximo e mínimo utilizados no gráfico são os mesmos estabelecidos pela norma ABNT NBR 7211:2009. Dessa forma, é possível visualizar que a granulometria da areia não se enquadra nos limites da norma, porém, a mesma se mostrou satisfatória para a realização dos ensaios do presente trabalho. Ressalta-se que a norma é utilizada como referência para a fabricação de concretos, e muitos autores não recomendam sua utilização para a seleção de agregado miúdo para

argamassas. Em um trabalho semelhante, Lunardi (2021) utilizou uma areia com características parecidas que também apresentou bons resultados.

Figura 16 – Granulometria do agregado miúdo



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.4 Água

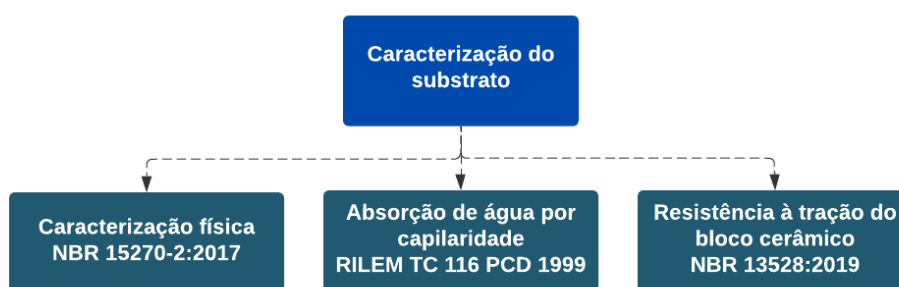
Para realizar a execução das argamassas, a água utilizada na mistura será fornecida pelo SEMAE, concessionária que abastece a cidade de São Leopoldo – RS, onde o campus da UNISINOS é localizado.

3.2.5 Substratos Cerâmicos

Os substratos cerâmicos utilizados no trabalho foram adquiridos na empresa Construrohr localizada na cidade de Bom Princípio-RS. Os blocos são de classificação estrutural EST08 e possuem face lisa e dimensões de 14cm x 19cm x 9cm. Foram utilizados 15 blocos, onde foram cortadas as 2 maiores faces de cada um (14 cm x 19 cm), totalizando 30 faces no trabalho.

A seguir, serão apresentados os ensaios realizados para a caracterização do substrato, que seguirão a ordem e as normas expressas na figura 17.

Figura 17 – Fluxograma de caracterização do substrato

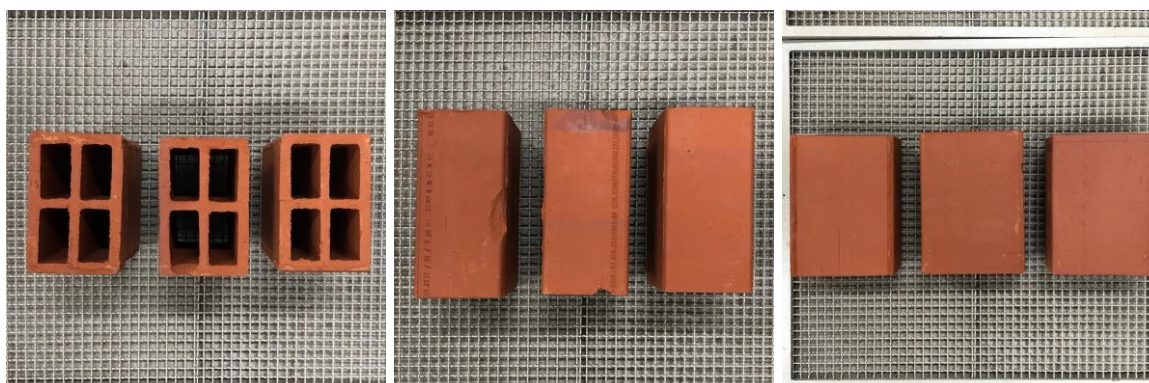


Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.5.1 Caracterização física dos substratos

Para se obter a caracterização física dos substratos, foi utilizada a norma ABNT NBR 15270-2:2017. Destaca-se que para a realização desses ensaios, foram utilizados 3 blocos cerâmicos inteiros, como apresentados na fotografia 1.

Fotografia 1 – Substratos com dimensões de 14cm x 19cm x 9cm



Fonte: Registrado pela autora.

3.2.5.2 Absorção de água por capilaridade dos substratos

Esse ensaio foi realizado em três faces inteiras de bloco. Para o ensaio executou-se o isolamento das laterais da face com fita adesiva reforçada. E na parte superior, o isolamento foi realizado com um balão de 25 polegadas (fotografia 2). Esses isolamentos foram realizados para que ocorresse a saída de ar durante o processo e também para evitar o aumento de pressão (LUNARDI, 2021).

Fotografia 2 – Ensaio de absorção de água por capilaridade nos blocos



Fonte: Registrado pela autora.

A face foi colocada em uma bandeja com três milímetros de água durante todo o período de ensaio, como mostra a fotografia 2. A realização do ensaio em si, se deu a partir do acompanhamento da pesagem da face com os intervalos de tempo descritos a seguir.

Os intervalos de absorção de água por capilaridade são descritos na norma RILEM TC 116 PCD (1999), que especifica os intervalos de: 10 minutos, 1 hora, 4 horas, 24 horas e em alguns casos, estendido por mais 24 horas. Porém, a fim de obter uma curva de absorção mais detalhada, o ensaio seguiu a adaptação feita por Valentini (2018), que consiste realizar os intervalos em: 1, 2, 5, 30 e 60 minutos, 2 horas, 6 horas e 24 horas.

Para cada intervalo descrito, retirou-se a face da água, onde em seguida foi seca superficialmente com o intuito de que o excesso de água fosse removido, e pesada de modo que se registrasse sua respectiva massa.

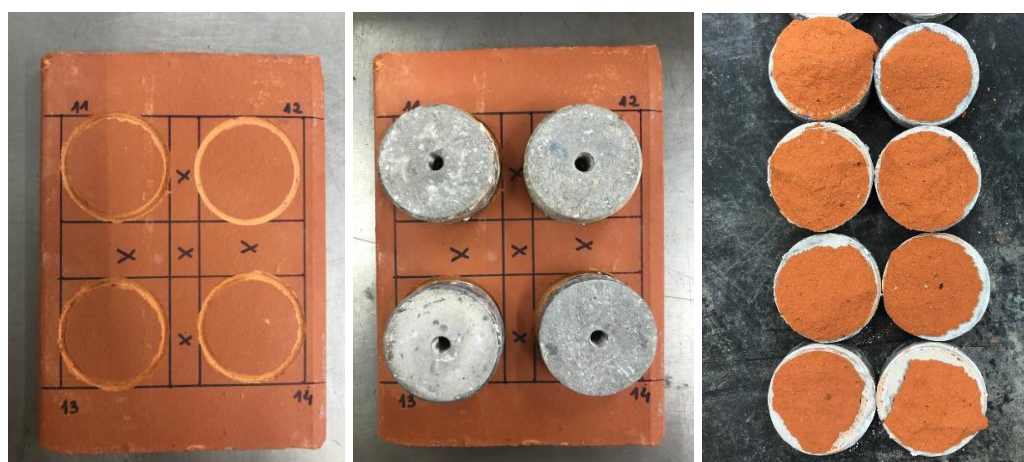
3.2.5.3 Resistência de aderência à tração do bloco cerâmico

A medição da resistência de aderência à tração do bloco cerâmico foi realizada com o propósito de investigar a alterabilidade das consequências dentro do mesmo bloco cerâmico e, também, entre os demais blocos cerâmicos. Como objetivo, tem-se a descoberta da resistência máxima de aderência na interface das argamassas/substrato, sem que ocorresse ruptura no bloco cerâmico (LUNARDI, 2021).

Esse ensaio foi realizado conforme a norma ABNT NBR 13528:2019 parte 1 e parte 2. A norma especifica que sejam ensaiados 12 corpos de prova que possuam as mesmas características.

Os corpos de prova foram extraídos com o auxílio de uma serra-copo (fotografia 3a), que teve como limite a profundidade de 5mm dentro do substrato. Em seguida, foram coladas as pastilhas metálicas onde permaneceram 72 horas antes de realizar o ensaio (fotografia 3b). Com as 72 horas cumpridas, foi realizado o ensaio de arrancamento, com o auxílio de um dinamômetro de tração da marca Dinatest, modelo DS2-DPU-1100, que possui capacidade máxima de 5000 N. A figura 3c representa os padrões de ruptura em algumas das amostras.

Fotografia 3 – Ensaio de resistência à tração do bloco cerâmico



a) Corte realizado pela serra copo; b) pastilhas coladas; c) padrões de ruptura;

Fonte: Registrado pela autora.

3.3. METODOS

A seguir serão descritos os métodos utilizados para a realização do programa experimental.

3.3.1 Preparo das argamassas, definição do traço e relação água/aglomerante

O traço utilizado nesse trabalho foi de 1:1,5:4 (cimento:cal:areia) em volume. Esse traço foi escolhido com objetivo de obter boa aderência, que estarão apresentados no capítulo 4.

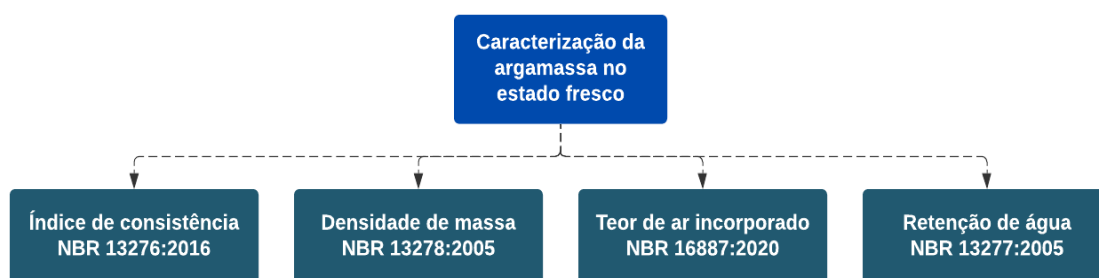
O procedimento iniciou um dia antes da definição da relação água/aglomerante e também do processo de execução das argamassas para o revestimento, onde realizou-se a hidratação da cal conforme a norma ABNT NBR 7200:1998, que sugere que se faça a mistura entre a cal e a areia e com uma quantidade fixa de relação água/aglomerante, que nesse caso foi de 0,7. A quantidade de água utilizada nessa etapa foi somada com a relação encontrada na mistura com o cimento para que atingisse o índice de consistência ideal, no intervalo de $260\text{mm} \pm 5\text{mm}$, conforme descrito na norma ABNT NBR 13276:2016. Assim, foi definida uma relação água/aglomerante de 0,9. A realização do ensaio de índice de consistência está especificada a seguir no item 3.3.2.1.

Ressalta-se que para ambos os procedimentos, definição de relação água/aglomerante e execução do revestimento, a argamassa foi misturada em uma argamassadeira de bancada. O método utilizado para o preparo das argamassas seguiu o especificado pela norma ABNT NBR 16541:2016.

3.3.2 Caracterização da argamassa no estado fresco

A seguir, serão apresentados os ensaios realizados para a caracterização da argamassa no estado fresco, que seguirão a ordem e as normas expressas na figura 17.

Figura 18 – Fluxograma da caracterização da argamassa no estado fresco



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.2.1 Índice de consistência

O índice de consistência foi o primeiro ensaio a ser realizado, pois dessa forma obteve-se a relação água/aglomerante adequada para a mistura das

argamassas que foram utilizadas no revestimento. O ensaio seguiu as recomendações da norma ABNT NBR 13276:2016, que especifica o índice de consistência no intervalo de $260\text{mm} \pm 5\text{mm}$.

Para a realização desse ensaio, primeiro realizou-se uma limpeza no tampo da mesma e no molde troncônico, de modo que nenhuma sujeira interferisse nos resultados. Posteriormente, centralizou-se o molde troncônico no tampo da mesa que posteriormente recebeu a argamassa preparada conforme a norma ABNT NBR 16541:2016. Com isso, realizou-se mais uma limpeza no tampo da mesa e no molde, para eliminar as partículas de argamassa que respigaram na hora do ensaio. Após a limpeza, o molde foi retirado verticalmente, e assim começou a aplicação dos 30 golpes necessários prescritos na norma. Imediatamente após os 30 golpes, realizou-se a medição do espalhamento da argamassa com o auxílio de uma régua. Essa medição foi realizada em três diâmetros, onde realizou-se a média para a obtenção do índice de consistência da argamassa.

O procedimento foi realizado até que o intervalo estabelecido pela norma fosse obtido. Dessa forma, para o traço 1:1,5:4, foi encontrada a relação água/aglomerante de 0,9, como mostra a fotografia 4.

Fotografia 4 – Índice de consistência



Fonte: registrado pela autora.

3.3.2.2 Densidade de massa

Para a determinação da densidade de massa seguiu-se a norma ABNT NBR 13278:2005. A norma especifica que antes da realização do ensaio sejam pesados o recipiente cilíndrico com a placa de vidro a serem utilizados, obtendo-se a massa.

Posteriormente, obtém-se a massa do mesmo recipiente cilíndrico com a placa de vidro, dessa vez com água destilada.

O início do ensaio ocorre após o preparo da argamassa, como já citado anteriormente. Com o auxílio de uma colher, colocou-se a argamassa no recipiente calibrado, formando-se três camadas de alturas aproximadamente iguais. Para cada camada, realizou-se 20 golpes com a colher. Os golpes foram realizados somente com a força necessária para que se penetrasse na superfície da camada inferior. No caso da primeira camada, os golpes foram realizados com pouca força.

Após a execução dos golpes, realizaram-se três movimentos de queda do recipiente, com altura de aproximadamente 3cm, de forma que não ocorressem vazios entre a argamassa e a parede do recipiente. Com isso, realizou-se o nivelamento da superfície do recipiente com o auxílio de uma espátula (fotografia 5). Ao final do ensaio, foi realizada a pesagem do recipiente com a argamassa.

Fotografia 5 – Recipiente cilíndrico com argamassa



Fonte: registrado pela autora.

3.3.2.3 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado pode ser obtido a partir da mesma norma da densidade de massa (ABNT NBR 13278:2005), porém optou-se por utilizar o método pressométrico, conforme a norma ABNT NBR 16887:2020, que determina o teor de ar em concreto fresco, sendo dessa forma adaptado para argamassas.

O ensaio consiste em encher o recipiente com 3 camadas de argamassa, que posteriormente foi vedado com a outra parte do equipamento (fotografia 6a). Após a

vedação, acrescentou-se a água até alcançar o meio da coluna graduada. Com isso, levou-se à marca zero o nível de água do tubo graduado, que posteriormente teve sua pressão baixada gradualmente devido a abertura da parte superior da coluna de água. Em seguida, realizou-se a verificação do teor de ar incorporado registrado pelo equipamento, conforme fotografia 6b.

Fotografia 6 – Aparelho para determinar o ar incorporado



a) Equipamento de medição vedado; b) Registro do teor de ar incorporado;

Fonte: Registrado pela autora.

3.3.2.4 Retenção de água

A determinação da retenção de água das argamassas seguiu a ABNT NBR 13277:2005 e consistiu em verificar a massa antes e depois de passar pelo processo de sucção da água descrito pela norma.

O ensaio iniciou-se com o posicionamento de um papel-filtro umedecido no fundo de um prato, que foi colocado sobre um funil de Buchner. Em seguida, acionou-se a bomba de vácuo, para que ocorresse uma sucção de 51mm de mercúrio no conjunto. Posteriormente, abriu-se a torneira para a retirada do excesso de água do papel-filtro durante 90 segundos. A partir disso, o conjunto funil/papel-filtro úmido vazio foi pesado, a fim de registrar sua massa.

Após a pesagem do conjunto vazio, preencheu-se o prato com a argamassa (fotografia 7a). Com o auxílio de um soquete metálico, foram realizados 37 golpes a fim de obter o adensamento da argamassa, onde 16 golpes foram aplicados junto à

borda e os outros 21 em pontos uniformemente distribuídos no centro da amostra. Com isso, realizou-se a pesagem do conjunto com argamassa, registrando sua massa. Em seguida, o prato com argamassa foi posicionado no equipamento e então abre-se a torneira do funil para aplicar na amostra a sucção correspondente à coluna 51mm de mercúrio durante 15 minutos (fotografia 7b). Após, removeu-se o prato do funil e realizou-se a pesagem do conjunto novamente.

Fotografia 7 – Ensaio de retenção de água



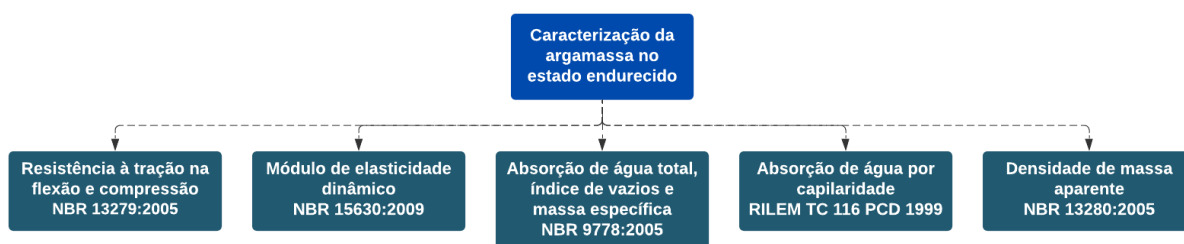
a) Prato com argamassa; b) Ensaio do conjunto;

Fonte: Registrado pela autora.

3.3.3 Caracterização da argamassa no estado endurecido

Nesse tópico serão apresentados os ensaios realizados para a caracterização da argamassa no estado endurecido, que seguirão a ordem e as normas expressas na figura 19.

Figura 19 – Fluxograma da caracterização da argamassa no estado endurecido



Fonte: Elaborado pela autora.

Para cada ensaio foram realizados 3 corpos de prova prismáticos de 4cm x 4cm x 16cm, totalizando 9 corpos de prova. Todos os corpos de prova foram executados conforme norma ABNT NBR 13279:2005, onde a argamassa foi inserida nos moldes com uma fina camada de desmoldante a base de água em suas laterais para que facilitasse a desmoldagem que ocorreu 48h após a realização desse procedimento. Com a moldagem realizada, os corpos de prova foram submetidos à cura submersa até que atingissem a idade de 28 dias, para que posteriormente fosse possível realizar os ensaios descritos a seguir.

3.3.3.1 Resistência à tração na flexão e compressão

Assim como para a moldagem dos corpos de prova, a resistência à compressão e tração na flexão também seguem a norma ABNT NBR 13279:2005. Para realizar a resistência à tração na flexão, os corpos de prova foram posicionados em uma prensa do LMC (fotografia 8a), onde receberam a carga de (50 ± 10) N/s, até que ocorresse a ruptura da amostra.

Para o ensaio de resistência à compressão foram utilizadas as metades dos três corpos de prova do ensaio de flexão (fotografia 8b), que foram posicionadas na prensa. Nesse equipamento os corpos de prova receberam uma carga aplicada de (500 ± 50) N/s, de forma que ocorresse a ruptura dos mesmos.

Fotografia 8 – Ensaio de resistência à tração na flexão e compressão



a) Tração na flexão; b) Compressão;

Fonte: Registrado pela autora.

3.3.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Para realizar o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico, foi utilizada a norma ABNT NBR 15630:2009. O corpo de prova foi inserido entre as faces dos transdutores (fotografia 9), a fim de que ocorresse um contato contínuo na menor espessura possível. Os transdutores utilizados possuíam uma frequência de vibração de onda longitudinal de 54 kHz. Essa vibração percorre o interior do corpo de prova a ser ensaiado, onde o modo de vibração das partículas possui deslocamento na mesma direção da propagação da vibração.

Fotografia 9 – Módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Registrado pela autora.

Para este ensaio, a norma especifica que sejam ensaiados no mínimo 3 corpos de prova, que especifica tamanhos de 4cm x 4cm x 16cm, onde suas faces de ensaio (4cm x 4cm) deveriam estar lisas e planas para que fossem bem acopladas aos transdutores.

O ensaio começou a partir da inserção dos corpos de prova entre os transdutores. Posteriormente foram realizadas três leituras por corpo de prova, que foram obtidas com o auxílio de um mostrador digital, onde para cada leitura foi registrado apenas o menor valor.

3.3.3.3 Absorção de água total, índice de vazios e massa específica

Para a realização desses ensaios, seguiu-se a norma ABNT NBR 9778:2005. O ensaio se iniciou após o condicionamento dos corpos de prova em uma estufa à

temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 72h. Ao serem retirados da estufa, os corpos de prova foram pesados a fim de registrar sua massa.

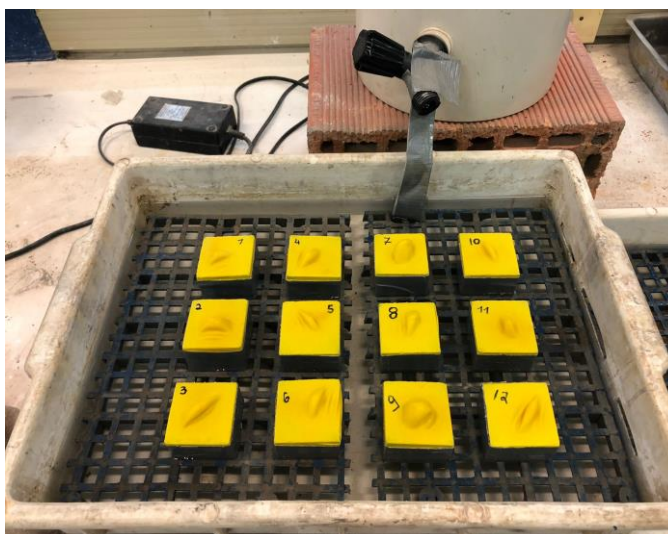
Em seguida, os corpos de prova foram submersos em água durante 72h. Com essa etapa concluída, os corpos de prova foram submersos em um recipiente com água, e permaneceram durante o período de 5h, o que acarretou o preenchimento dos poros permeáveis por água. Após a fervura, a água foi esfriada naturalmente em temperatura ambiente, e com isso foi possível obter o valor da massa dos corpos de prova saturados. Em seguida, as amostras foram retiradas da água e pesadas novamente, registrando sua massa.

Os resultados obtidos durante o ensaio, foram utilizados nas equações especificadas na norma.

3.3.3.4 Absorção de água por capilaridade

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade nas argamassas em estado endurecido, seguiu-se o mesmo modelo e intervalos descritos no item 3.2.3.2, conforme utilizado por Valentini (2018). Para esse ensaio, foram utilizadas 3 amostras prismáticas, que foram divididas em 4 partes iguais, totalizando 12, para que se obtivesse mais dados para se comparar, conforme mostra fotografia 10, que foram ensaiadas após a condição de cura descrita no início do presente tópico.

Fotografia 10 – Absorção de água por capilaridade no estado endurecido



Fonte: Registrado pela autora.

3.3.3.5 Densidade de massa aparente

A determinação da densidade de massa aparente das argamassas no estado endurecido seguiu a especificação da norma ABNT NBR 13280:2005.

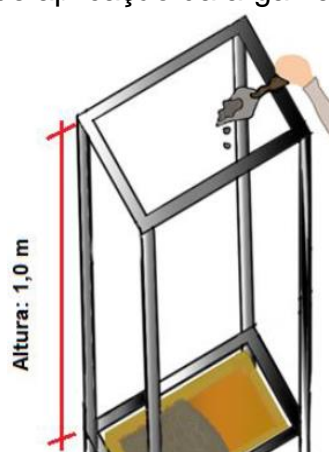
O ensaio se iniciou após os 3 corpos de prova serem retirados da cura de 28 dias. Com o auxílio de um paquímetro, cada corpo de prova teve sua altura, largura e comprimento medidos em duas posições, obtendo-se o resultado em centímetros. Posteriormente, os corpos de prova foram pesados, a fim de registrar sua massa para a realização dos cálculos descritos na norma.

3.3.4 Método e aplicação da argamassa nos substratos cerâmicos

Nesse trabalho foram utilizados 15 blocos cerâmicos com dimensões de 14cm x 19cm x 9cm. Devido ao espaço limitado das câmaras e estufas nas quais os blocos revestidos foram acondicionados, optou-se por realizar o corte das faces, com o auxílio de uma serra circular de bancada, totalizando, dessa forma, 30 faces cortadas, sendo 20 para a realização do trabalho e 10 reservas. Após o corte, as faces foram secas em estufa à $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24h, e posteriormente foram colocados em uma sala climatizada com umidade relativa de $60\% \pm 5\%$ e temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, a fim de que todos obtivessem umidade interna de 60% para a aplicação das argamassas.

A fim de realizar o ensaio da forma mais realista possível, a aplicação da argamassa nas faces ocorreu de forma manual, simulando a energia de impacto gerada pelo trabalhador na hora de aplicar a argamassa de revestimento na parede (LUNARDI, 2021). A aplicação contou com o auxílio da caixa de queda utilizada no LMC da UNISINOS. Essa caixa de queda não teve sua função exercida, pois apenas sua altura foi utilizada como gabarito para a aplicação manual da argamassa. Segundo Lunardi (2021) essa adaptação foi utilizada a fim de obter um menor desperdício de argamassa na aplicação, já que os lançamentos obtidos pela caixa de queda geram um desperdício maior. A figura 20 representa a caixa de queda e a adaptação proposta por Lunardi (2021).

Figura 20 – Método de aplicação da argamassa na placa cerâmica



Fonte: Lunardi, 2021.

Para realizar o procedimento, a face cerâmica foi depositada em um molde de madeira que comportava três faces por vez, localizado no interior do gabarito (fotografia 11a), que já possuía altura pré-estabelecida. Após, a argamassa foi lançada na superfície do bloco manualmente, esse procedimento foi executado até que fosse atingido o completo revestimento do bloco.

A argamassa foi aplicada sem a realização de chapisco e sequência para a aplicação do material sobre as faces cerâmicas foi a mesma utilizada por Sentena (2015), onde primeiramente foi realizado o lançamento da argamassa (fotografia 11b), após executou-se o sarrafeamento (fotografia 11c) e por fim, após quinze minutos foi feita a execução do desempenho e o desmolde (fotografia 11d).

Fotografia 11 – Execução da moldagem dos revestimentos



- a) Faces no molde no interior do gabarito; b) Revestimento após o lançamento; c) Revestimento após o sarrafeamento; d) Revestimento já desempenado e desmoldado.

Fonte: Registrado pela autora.

3.3.5 Cura

O processo de cura das placas com revestimento foi feito durante 61 dias na câmara úmida do LMC da UNISINOS com umidade relativa de $95\% \pm 5\%$ (fotografia 12). Todas as amostras do trabalho passaram por esse processo a fim de se garantir que o cimento e a cal alcançassem quase toda a sua hidratação, para posteriormente dar início aos ensaios descritos a seguir.

Fotografia 12 – Parte das placas com revestimento acondicionadas na câmara úmida



Fonte: Registrado pela autora.

3.3.6 Sazonamento

O processo de sazonalamento é realizado de maneira que os revestimentos estejam em condições ideais para a realização da carbonatação acelerada e ensaio de envelhecimento acelerado. Pletsch (2019) explica que nesse processo deve-se garantir que ocorra a estabilização da umidade interna em 60%. A temperatura elevada condicionada ao ensaio garante a distribuição homogênea da umidade dos revestimentos, conforme especificado pela RILEM TC 116 PCD (1999).

O sazonalamento iniciou-se após os 61 dias que os revestimentos passaram pelo processo de cura. Antes de realizar o processo de sazonalamento, três revestimentos foram retirados da sala de cura, pesados e submetidos à estufa com temperatura de $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, a fim de obter a porcentagem total de água de cada amostra. Os revestimentos foram constantemente pesados até que se estabilizasse sua massa. Com os valores obtidos, realizou-se uma média entre os revestimentos

para fixar a porcentagem de água total perdida, e assim, foi possível estabelecer a porcentagem que chegasse à 40% nos demais revestimentos, a fim de que todos obtivessem a umidade interna de 60%.

Para perder os 40% de umidade, os revestimentos foram acondicionados em uma estufa à 40°C (fotografia 13a), onde também foram pesadas constantemente até atingirem a massa calculada. Esse processo durou cerca de 2 a 3 dias. Em seguida, as amostras foram armazenadas em uma câmara com umidade controlada de 60% (fotografia 13b), de forma que todas estabilizassem a umidade ideal descrita em todo o interior da amostra.

Fotografia 13 – Processo de sazonalização



a) Revestimentos na estufa à 40°C;

b) Revestimentos na câmara com umidade controlada;

Fonte: Registrado pela autora.

A câmara foi devidamente fechada e vedada de forma que não ocorresse troca de gás com o meio externo, para que não ocorresse carbonatação, e sua umidade interna foi controlada com o auxílio de brometo de sódio. O processo de sazonalização dentro da câmara ocorreu durante 25 dias. Após a realização do sazonalização, os revestimentos foram direcionados a carbonatação acelerada e ao ensaio de envelhecimento acelerado.

3.3.6 Processo de carbonatação acelerada

Nessa etapa, 10 placas de revestimentos foram submetidas ao processo de carbonatação. Metade das placas de revestimentos serviram para realizar o ensaio de envelhecimento acelerado, e os demais foram sujeitos à avaliação da absorção de água por capilaridade, resistência de aderência à tração e análise de deformações por Digital Image Correlation (DIC)

O ensaio começa quando os revestimentos vindos do sazonalamento são colocados na câmara de carbonatação do LMC da UNISINOS. Essa câmara (fotografia 14) possuía umidade relativa de 60%, valor esse considerado ideal para a ocorrência de carbonatação, conforme pesquisas realizadas por Bourguignon (2004). A temperatura se manteve entre 22°C e 26°C, intervalo esse que está dentro dos valores ideais (20°C a 50°C) apontados por Drouet et al. (2019) para que ocorra uma maior taxa de carbonatação. Para que a umidade relativa se mantivesse constante, a câmara foi frequentemente verificada a partir do uso de um TinyTag. A concentração de CO₂ utilizada foi de 3%, valor próximo ao que Castellote et al. (2009) acreditam gerar produtos de carbonatação equivalentes ao da carbonatação natural.

Fotografia 14 – Câmara de carbonatação acelerada



Fonte: Registrado pela autora.

Para verificar a carbonatação nos revestimentos sujeitos a carbonatação acelerada, foi realizado o procedimento de aspersão de fenolftaleína. Esse ensaio

serve para medir o pH do material e foi realizado após a extração do corpo de prova e em seguida, foi aspergida a solução na sua superfície. Após a realização do procedimento, foram analisadas as amostras, onde segundo Neville (2016), caso o pH estivesse alcalino, ou seja, acima de 9,5, apresentaria uma coloração rosada e afirmando que não ocorreu a carbonatação. Caso não houvesse coloração, significava que o pH estava neutro, abaixo de 9,5, apresentando a carbonatação do material.

3.3.7 Ensaio de envelhecimento acelerado

Para a realização do ensaio, foram utilizadas as caixas térmicas produzidas por Sentena (2015). Essas caixas possuem um temporizador que permite as programações de tempo e dimensões de 50cm x 40cm x 140cm. Seu interior é revestido com folhas de alumínio e composto por 8 lâmpadas, para que ocorra o aquecimento. O referido autor realizou adaptações da norma ABNT NBR 15575-4:2013 (agora ABNT NBR 15575-4:2021) para a execução das caixas. A seguir, na fotografia 15a é possível visualizar o interior da caixa térmica. A fotografia 15b apresenta as amostras distribuídas no interior da caixa, onde foi executada uma base revestida de papel filme a fim de que ocorresse uma menor perda de calor. E por fim, a fotografia 15c representa a caixa em funcionamento durante o ciclo térmico.

Fotografia 15 – Procedimento de envelhecimento acelerado



a) Interior da caixa térmica;

b) Amostras distribuídas no interior da caixa;

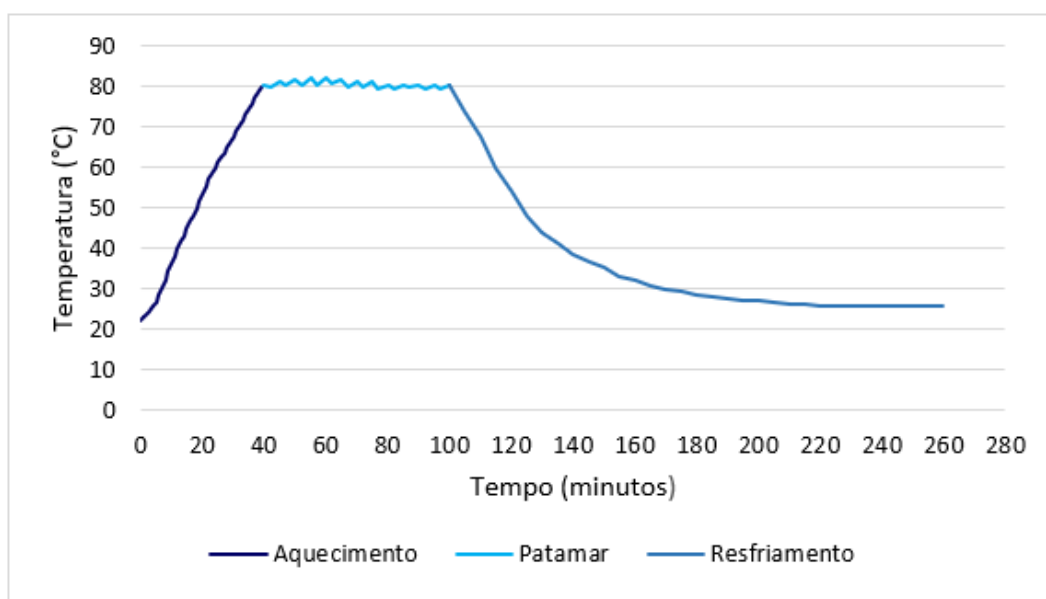
c) Caixa térmica em funcionamento;

Fonte: Registrado pela autora.

A norma ABNT NBR 15575-4:2021 especifica que a temperatura de aquecimento dos revestimentos chegue a $80^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e que após se estabilize nessa temperatura durante uma hora. Com os 60 minutos de estabilização ocorridos, deve-se realizar o choque térmico com a aspersão de jatos de água na superfície dos revestimentos, e assim o ensaio se encerra a partir da estabilização da em $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Antes de realizar o ensaio nas placas de revestimentos, foram feitos inúmeros testes para descobrir os tempos ideais de aquecimento e resfriamento com a caixa de ciclagem térmica. Para o aquecimento de $80^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ foram necessários 40 minutos, a estabilização de temperatura ocorreu durante uma hora com os intervalos de 2 e 3 minutos, sendo 2 minutos com a caixa desligada e 3 minutos com a caixa ligada. Esses intervalos foram utilizados pois a temperatura de resfriamento ocorre de forma mais rápida do que a de aquecimento. Após a estabilização, para provocar o choque térmico e causar tensões internas nos revestimentos, foram aspergidos 4 jatos de água na superfície dos revestimentos com intervalo de 5 minutos cada, após 220 minutos ocorreu a estabilização em temperatura ambiente. Os tempos e temperaturas descritas podem ser analisados a partir do gráfico representado na figura 21.

Figura 21 – Tempos obtidos para o ensaio de envelhecimento acelerado



Fonte: Elaborado pela autora.

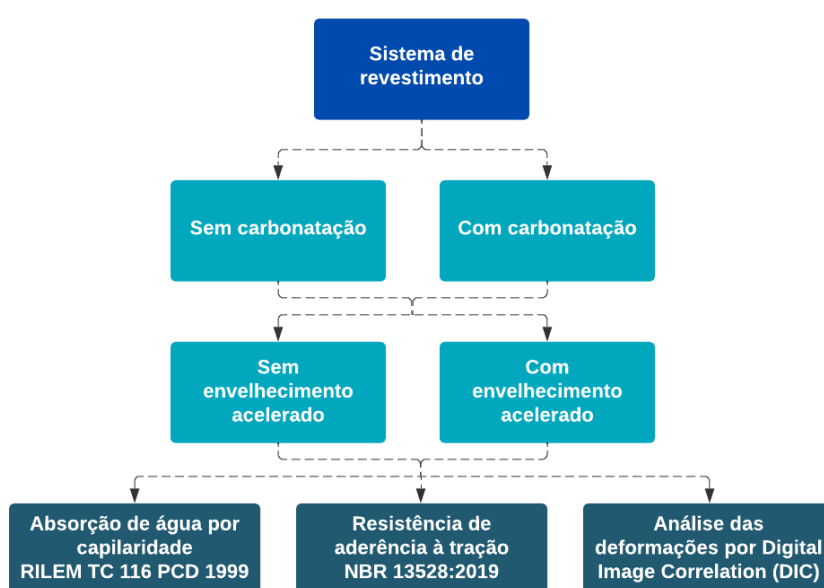
O ensaio foi realizado em uma sala climatizada com umidade relativa de 60% \pm 5% e temperatura controlada de 23°C \pm 2°C. Ao final dos ciclos, os revestimentos foram acondicionados na câmara com umidade relativa controlada de 60%. Esse procedimento foi realizado a fim de garantir a mesma umidade para todas as amostras, e também para que não ocorresse carbonatação nos revestimentos que não foram sujeitos a carbonatação acelerada.

Para esse ensaio, foram utilizadas 10 placas de revestimentos, sendo 5 carbonatados e 5 não carbonatados. A partir do ensaio dessas placas, foram avaliados a absorção de água por capilaridade, resistência de aderência à tração e o ensaio de análise de deformações.

3.3.8 Ensaio do sistema de revestimento

Nos ensaios do sistema de revestimento foram avaliadas as seguintes propriedades: absorção de água por capilaridade, resistência de aderência à tração e análise de deformação. A fim de realizar uma comparação entre as amostras, as condições das placas ensaiadas foram realizadas conforme descritas no item 3.1.1, podendo elas estarem ou não totalmente carbonatadas e submetidas ou não ao ensaio de envelhecimento acelerado, como mostra o fluxograma da figura 22.

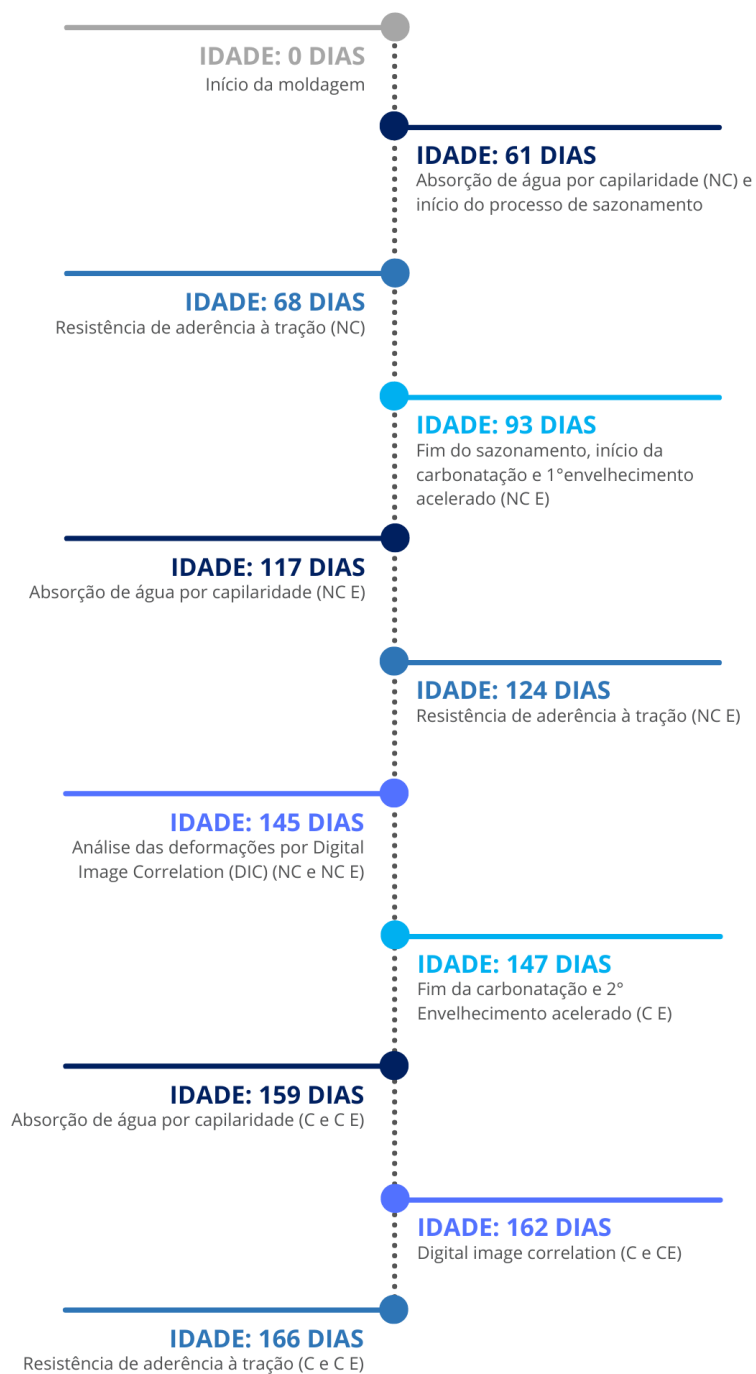
Figura 22 – Fluxograma dos ensaios do sistema de revestimento



Fonte: Elaborado pela autora.

As amostras cuja nomenclatura é “NC”, ou seja, que não foram submetidas aos ensaios de carbonatação e/ou envelhecimento acelerado, foram ensaiadas após a cura de 61 dias. A figura 23 demonstra uma linha do tempo destacando a idade dos revestimentos em cada ensaio realizado.

Figura 23 – Linha do tempo dos ensaios de absorção, tração e deformação

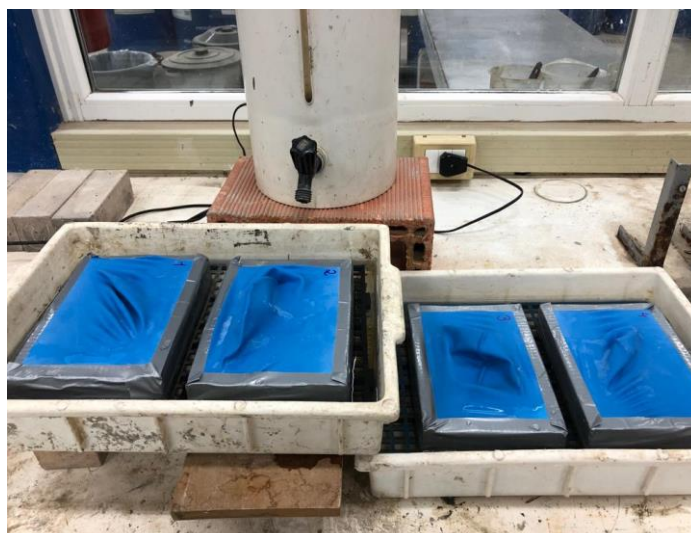


Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.8.1 Absorção de água por capilaridade

Para esse ensaio, foram avaliados os revestimentos carbonatados, não carbonatados e submetidos ou não ao ensaio de envelhecimento acelerado, onde foram utilizadas 4 placas de revestimentos por variável, totalizando 16 no ensaio. Para a definição da absorção de água por capilaridade nos revestimentos, seguiu-se o mesmo procedimento descrito no item 3.2.3.2, conforme recomendações do RILEM TC 116 PCD (1999) e adaptação de Valentini (2018), porém com intervalos maiores de 1, 2, 5, 30 e 60 minutos, 2 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas. Ressalta-se que nesse procedimento os revestimentos foram ensaiados inteiros (fotografia 16) e posteriormente foram submetidos ao ensaio de resistência de aderência à tração.

Fotografia 16 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

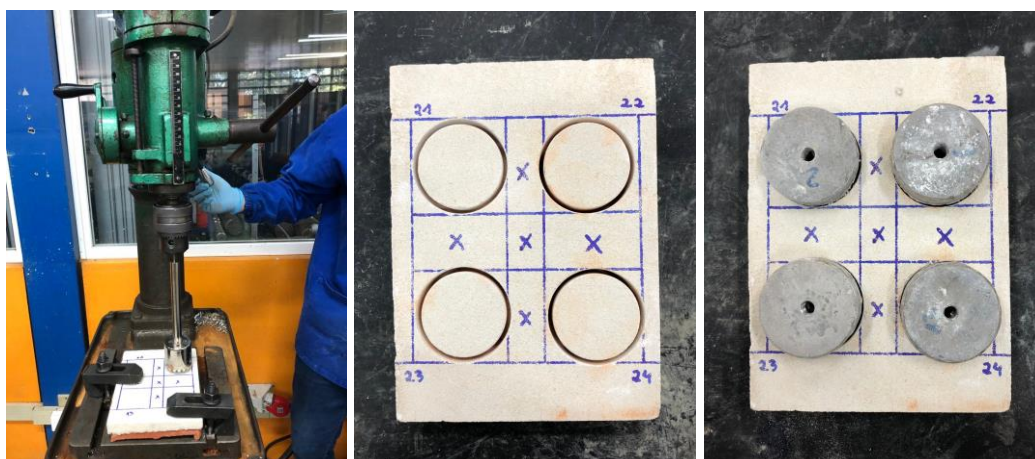


Fonte: Registrado pela autora.

3.3.8.2 Resistência de aderência à tração

A resistência de aderência à tração foi avaliada conforme a norma ABNT NBR 13528:2019 parte 1 e parte 2. A norma especifica que sejam ensaiados 12 corpos de prova que possuam as mesmas características, porém optou-se por utilizar 4 corpos de prova a mais devido as chances de quebra dos corpos de prova, portanto, conforme especificado no item 3.1.1, foram utilizadas no total 64 amostras. A fotografia 17 representa a perfuração com a serra copo, a amostra perfurada e as pastilhas coladas, respectivamente.

Fotografia 17 – Ensaio de resistência de aderência à tração



a) Perfuração com a serra copo; b) amostra perfurada; c) pastilhas coladas;

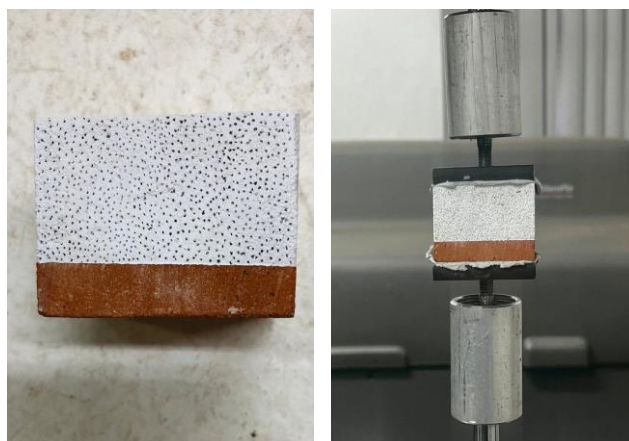
Fonte: Registrado pela autora.

3.3.8.3 Análise das deformações dos revestimentos por DIC

A análise das deformações dos revestimentos deste trabalho é um estudo piloto de futuros trabalhos do Grupo de Pesquisa em Materiais e Reciclagem - GMAT da UNISINOS, que está atuando para o desenvolvimento do Digital Image Correlation (DIC) em ensaios de tração. O intuito é desenvolver esse método no conjunto de revestimento (substrato/argamassa) de forma que se obtenha o módulo de elasticidade ao longo de um ensaio de tração, visto que o método de ultrassom utilizado por Lunardi (2021) não se mostrou eficaz, além de não ser possível avaliar a forma de ruptura e propagação das rupturas durante o ensaio de tração. Como esse trabalho trata-se de um estudo piloto, as análises dos resultados foram realizadas apenas de forma visual, como demonstrado no capítulo 2.

Antes de tudo, as amostras foram cortadas em 5cm x 5cm x 3,5cm e aparadas para que ficassem o mais retas possível. Em seguida, as amostras foram preparadas conforme o método de Zhao et al. (2021), onde primeiramente foi escolhida uma das faces da amostra e a mesma recebeu a aplicação de uma tinta branca fosca que posteriormente foi revestida de diversos pontos pretos aplicados de forma aleatória, conforme demonstra a fotografia 18a. Em seguida, foram coladas duas pastilhas de 5x5cm na base e na superfície da amostra, de forma que as duas pudessem engatar nas peças utilizadas para realizar o ensaio de tração no equipamento de ensaio (fotografia 18b).

Fotografia 18 – Preparo da amostra para o método DIC



- a) Amostra após a pintura e aplicação dos pontos;
- b) Amostra com as pastilhas coladas e já fixadas no equipamento de ensaio;

Fonte: Registrado pela autora.

Após a fixação da peça no equipamento de ensaio, foram posicionadas uma câmera Sony XDCAM capaz de capturar 120 frames por segundo com resolução de 1920 x 1080 pixels, na frente da amostra e outra em frente a tela do computador, capturando o processo no software, para que fosse possível capturar simultaneamente o deslocamento e a tensão da amostra em ambas as atividades. A fotografia 19a representa o cenário de ensaio com o posicionamento das duas câmeras e a fotografia 19b o enquadramento da amostra na câmera.

Fotografia 19 – Cenário de ensaio



- a) Cenário de ensaio com o posicionamento das duas câmeras;
- b) Enquadramento da amostra na câmera;

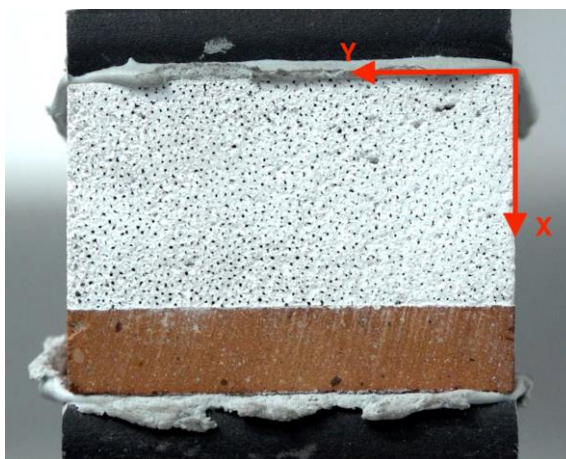
Fonte: Registrado pela autora.

A fim de se obter mais precisão do momento exato da ruptura e o comportamento da amostra durante o ensaio, as duas gravações foram colocadas lado a lado para que fosse possível correlacionar a deformação e a tensão específica no exato momento da imagem. O programa utilizado para a extração dos frames e análise das deformações foi o Ncorr.

Como a análise ocorre de forma visual, é importante destacar que o software gera automaticamente a escala de cores ideal baseada nas deformações máximas e mínimas de cada frame de cada amostra. Destaca-se que todas as amostras foram avaliadas no mesmo esforço de tração, independente da sua tensão máxima. Os critérios utilizados estão detalhados no capítulo 4.

O software Ncorr permite que sejam colocados extensômetros virtuais na parte da amostra a ser analisada. Os eixos dos extensômetros estão representados na fotografia 20, onde o eixo x corresponde a análise na vertical e o eixo y a análise horizontal. Nesse caso, o extensômetro foi colocado na argamassa no sentido de análise vertical (eixo x) em todas as amostras.

Fotografia 20 – Sentido dos eixos de análise do Ncorr



Fonte: Elaborado pela autora.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresentará os resultados das caracterizações do substrato e argamassa bem como os resultados dos ensaios realizados no revestimento.

4.1 CARACTERIZAÇÃO

A seguir, estão representados os resultados referentes as caracterizações do substrato e da argamassa nos estados fresco e endurecido.

4.1.1 Substrato

A tabela 5 apresenta os valores obtidos nos ensaios referentes a caracterização do substrato.

Tabela 5 – Caracterização do substrato

Ensaio	Norma	Resultado	Desvio padrão	Unidade de medida
Área bruta	ABNT NBR 15270-2:2017	143,93	1,30	cm ²
Área líquida	ABNT NBR 15270-2:2017	1790,93	7,57	cm ²
Absorção de água inicial	ABNT NBR 15270-2:2017	58,81	5,30	(g/194 ²)/min
Absorção de água total	ABNT NBR 15270-2:2017	18,32	0,23	%
Resistência à compressão	ABNT NBR 15270-2:2017	4,65	1,29	MPa
Resistência à tração do bloco cerâmico	ABNT NBR 13528:2019	0,23	0,03	MPa
Absorção de água por capilaridade	RILEM TC 116 PCD 1999	0,35	0,03	g/cm ² .h ^{1/2}

Fonte: Elaborado pela autora.

O substrato utilizado no presente trabalho se refere a um bloco estrutural classe EST80. A resistência à compressão encontrada, de 4,65 MPa, indica que o bloco está abaixo da norma ABNT NBR 15270-1:2017, que indica uma resistência à

compressão mínima de 8 MPa. A absorção de água total encontrada de 18,32% está de acordo com a estipulada pelo fabricante (18%) e que também se enquadra na norma, que sugere uma absorção entre 8% e 21%.

O valor de resistência à tração do bloco cerâmico foi de 0,23 MPa com baixo desvio padrão, de 0,03 MPa. Esse valor também se encontra abaixo do mínimo sugerido pela norma ABNT NBR 13749:2013 de 0,3 MPa para resistência à tração do revestimento. Lunardi (2021) explica que caso a resistência à tração da argamassa e da interface forem maiores que a do substrato, a forma de ruptura será predominante no próprio substrato, porém quando a resistência da argamassa for inferior a resistência do bloco cerâmico, ela poderá ocorrer na interface ou na argamassa. Portanto, como o bloco se encontra com uma resistência de tração inferior a recomendada, diversas rupturas podem ocorrer no substrato. Destaca-se que os ensaios de caracterização do bloco foram realizados após a execução de todos os revestimentos, e devido ao curto prazo, não foi possível realizar a troca do bloco.

4.1.2 Argamassa no estado fresco e endurecido

A tabela 6 apresenta os valores obtidos nos ensaios referentes a caracterização da argamassa no estado fresco e endurecido, respectivamente.

Tabela 6 – Caracterização da argamassa no estado fresco e endurecido

	Ensaio	Norma	Resultado	Desvio padrão	Unidade de medida
Estado fresco	Índice de consistência	ABNT NBR 13276:2016	260	0,00	mm
	Densidade de massa	ABNT NBR 13278:2005	2,02	0,02	g/cm ³
	Teor de ar incorporado	ABNT NBR 16887:2020	3	0,12	%
	Retenção de água	ABNT NBR 13277:2005	98,98	0,10	%

Estado endurecido	Resistência à tração na flexão	ABNT NBR 13279:2005	1,40	0,03	MPa
	Resistência à compressão	ABNT NBR 13279:2005	4,60	0,29	MPa
	Módulo de elasticidade dinâmico	ABNT NBR 15630:2009	8,59	0,09	GPa
	Absorção de água total	ABNT NBR 9778:2005	18,99	0,12	%
	Índice de vazios	ABNT NBR 9778:2005	32,23	0,11	%
	Massa específica seca	ABNT NBR 9778:2005	1,70	0,01	g/cm ³
	Massa específica saturada	ABNT NBR 9778:2005	2,98	0,00	g/cm ³
	Massa específica real	ABNT NBR 9778:2005	2,50	0,00	g/cm ³
	Absorção de água por capilaridade	RILEM TC 116 PCD 1999	0,74	0,02	g/cm ² .h ^{1/2}
	Densidade de massa aparente	ABNT NBR 13280:2005	1679,0	4,99	kg/cm ³

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados obtidos o valor do índice de vazios é coerente com o obtido por Vieira (2021) que também utilizou o traço cimento:cal:areia (1:1:6), obtendo um índice de 27,94%. Comparando os resultados obtidos por Lunardi (2021), que utilizou uma argamassa contendo cimento e areia, é possível destacar o índice de vazios também reflete na capacidade de absorção de água por capilaridade, onde a argamassa contendo cal apresenta uma absorção 41,80% maior que argamassa sem cal.

A utilização da cal também influenciou positivamente no módulo de elasticidade obtido de 8,59 GPa, que é considerado dentro do esperado conforme explica John (2003 apud POLITO, 2008) que sugere um limite de 10 GPa para argamassas de revestimento serem consideradas ideais. Os demais valores

encontrados também se mostram dentro do esperado conforme a comparação com os trabalhos de Vieira (2021) e Lunardi (2021) e a literatura apresentada no capítulo 2.

4.2 ENSAIOS DO REVESTIMENTO

A seguir, serão apresentados os resultados da caracterização do revestimento propostos nos objetivos desse trabalho. Todas as análises foram realizadas nas quatro variáveis sendo elas: não carbonatadas (NC), não carbonatadas envelhecidas (NC E), carbonatadas (C) e carbonatadas envelhecidas (C E).

4.2.1 Resistência de aderência à tração

A tabela 7 representa o resumo dos valores obtidos no ensaio de resistência de aderência à tração para todas as variáveis do trabalho.

Tabela 7 – Resistência de aderência à tração

Variável	N° amostras	Ruptura		Média (MPa)	Desvio (MPa)	Coeficiente de variação (%)
		Bloco	Interface			
NC	11	7	4	0,34	0,04	10,60%
NC E	13	8	5	0,47	0,11	23,38%
C	10	2	8	0,53	0,06	10,70%
C E	9	1	8	0,32	0,15	47,12%

Fonte: Elaborado pela autora.

Foram ensaiados 16 corpos de prova por variável, porém 2 valores das variáveis NC e C, considerados como *outliers*, foram retirados desta análise, porém estão representados nos apêndices A e B, sendo os valores de resistência de aderência à tração e seus padrões de ruptura, respectivamente. Esses valores provavelmente são decorrentes de algum erro durante os procedimentos de moldagem e ensaio, e poderiam prejudicar as avaliações dos resultados. Além disso, destaca-se que houve uma perda nas amostras ensaiadas na hora do corte com a serra copo, onde as não carbonatadas (NC) perderam 3 corpos de prova, não

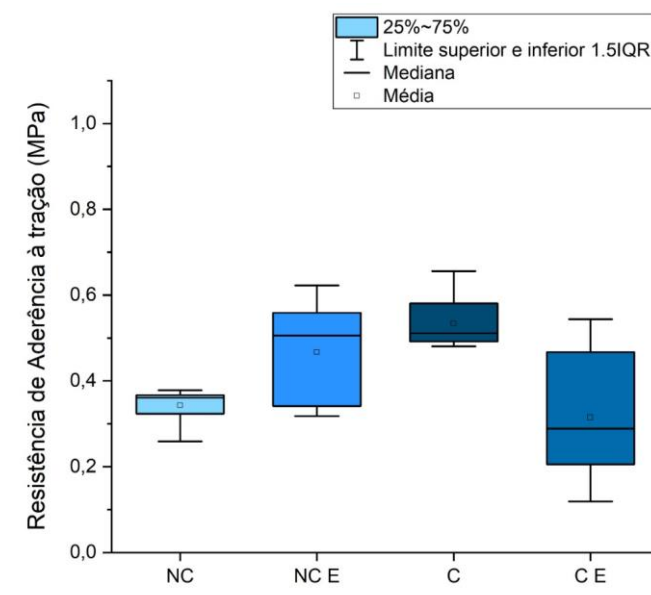
carbonatadas envelhecidas (NC E) 3 corpos de prova, carbonatadas (C) 4 corpos de prova e carbonatadas envelhecidas (C E) 7 corpos de prova.

A análise realizada nesse tópico foi feita a partir dos valores onde a ruptura ocorreu tanto na interface quanto no bloco, pois como visto na tabela 6, muitas das rupturas ocorreram no bloco, e caso realizasse a análise de forma separada não seria possível obter o valor mínimo ou próximo de amostras sugerido pela norma que são 12 amostras. Destaca-se que os valores obtidos no bloco e na interface, tanto em tensão, desvio padrão e coeficiente de variação ficaram próximos em todas as variáveis, dessa forma foi possível realizar as comparações contemplando os dois padrões de ruptura.

A grande quantidade de rupturas no bloco pode ter ocorrido por o mesmo possuir uma resistência de 0,23 MPa, inferior ao mínimo sugerido pela norma ABNT NBR 13749:2013 para o arrancamento de argamassas, de 0,3 MPa, como citado no item 4.1.1 e a argamassa estar entre os padrões ideais de resistência.

A figura 24 representa o gráfico contendo todas as variáveis e seus respectivos resultados que serão analisados separadamente a seguir.

Figura 24 – Resistência de aderência à tração

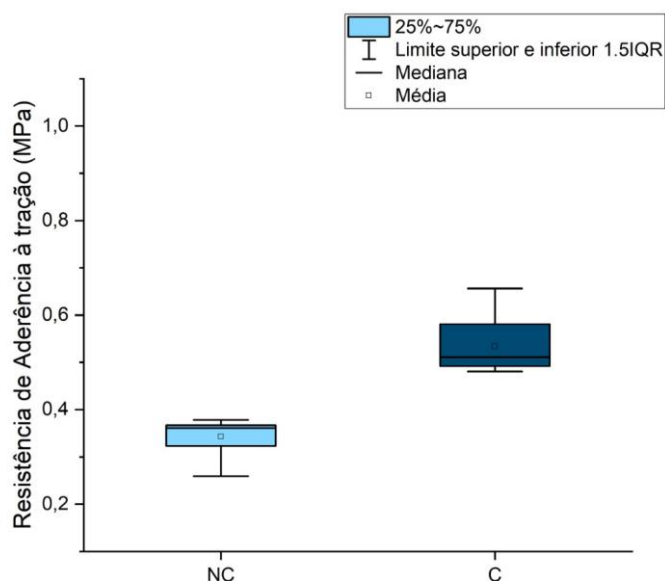


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1.1 Não Carbonatadas x Carbonatadas

Na figura 25 está apresentado o gráfico referente as variáveis não carbonatadas (NC) e carbonatadas (C).

Figura 25 – Resistência de aderência à tração dos revestimentos NC e C



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao analisar o gráfico da figura 25, é possível observar que a carbonatação aumentou a resistência de aderência à tração, como explica Yu et al. (2017). O aumento de resistência por carbonatação também ficou evidente em trabalhos semelhantes, como o de Lunardi (2021), que utilizou argamassa de cimento e areia, onde obteve resultados significativos quando comparado a argamassa não carbonatada. Esse aumento de resistência por carbonatação está associado ao processo de neutralização da fase líquida saturada do hidróxido de cálcio e outros compostos hidratados presentes na matriz cimentícia pelo CO_2 aplicado na câmara de carbonatação, que na presença da umidade ideal (60%) gerou o carbonato de cálcio (POSSAN et al., 2017).

Apesar de as médias terem sido significativamente diferentes uma da outra, sendo não carbonatadas 0,34 MPa e carbonatadas 0,53 MPa, é importante analisar que o coeficiente de variação de ambas teve resultados muito semelhantes (NC = 10,60% e C = 10,70%), isso indica que a carbonatação ocorreu de forma homogênea nas amostras C.

Tabela 8 - Análise de variância (ANOVA) para a resistência de aderência à tração das amostras NC e C

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,190814	1	0,190814	85,05278	1,91E-08	4,38075	Sim
Dentro dos grupos	0,042626	19	0,002243				
Total	0,23344	20					

Fonte: Elaborado pela autora.

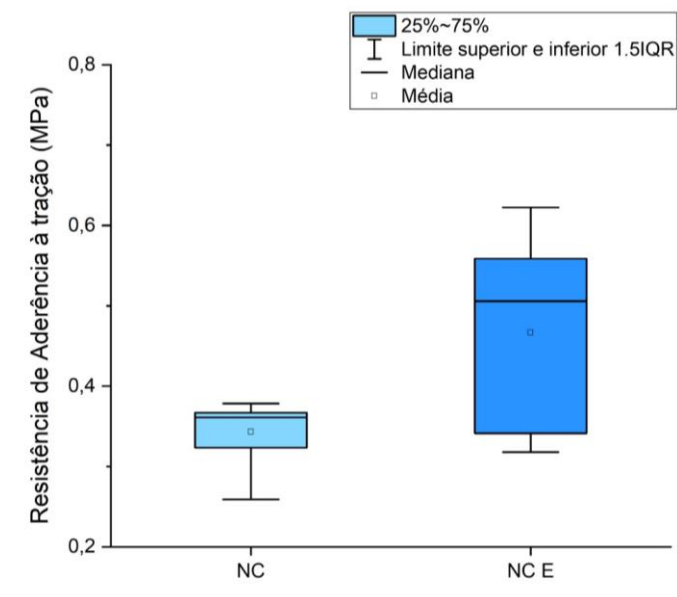
A tabela 8 representa a análise de variância (ANOVA) para as variáveis NC e C, onde a mesma apresentou um valor-p de 1,91E-08. Portanto, para um nível de confiança de 95% (valor-p inferior a 0,05) a análise representa significância entre as variáveis, confirmando que ambas são diferentes entre si.

Outro fato importante a ser salientado, é a diferença de ruptura de ambas as variáveis (tabela 7), onde a variável NC apresenta 7 rupturas das 11 no bloco, e a variável C apenas 2. Para esse fato, uma hipótese seria que por possuírem elevada finura, a cal e o cimento tenham penetrado o suficiente nos poros do substrato e com a reação do CO₂ tenham carbonatado, ocasionando em um aumento de suas propriedades mecânicas, visto que a resistência à tração superficial do bloco era inicialmente de 0,23 MPa, valor esse considerado abaixo do mínimo requerido pela norma ABNT NBR 13749:2013. E a partir da carbonatação do cimento e da cal nos poros do substrato, o mesmo pode ter ficado com uma resistência à tração superficial maior que a da argamassa, sendo assim, a ruptura das amostras carbonatadas se deu na interface. Para verificar se a hipótese está correta, seria ideal a realização do ensaio DRX ou MEV com EDS para verificar a presença de carbonato de cálcio no bloco, na região próxima da interface com a argamassa.

4.2.1.2 Não Carbonatadas x Não Carbonatadas Envelhecidas

Na figura 26 está apresentado o gráfico referente as variáveis não carbonatadas (NC) e não carbonatadas envelhecidas (NC E).

Figura 26 – Resistência de aderência à tração dos revestimentos NC e NC E



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da figura 26, pode-se observar que houve um ganho de resistência para as amostras envelhecidas (Média = 0,47 MPa) em comparação com as amostras não envelhecidas (Média = 0,34 MPa). Conforme a literatura (BOCHEN, 2015; ESQUIVEL, 2009; SENTENA, 2015; SENTENA; KAZMIERCZAK; KREIN, 2018; entre outros), o ensaio de envelhecimento acelerado geralmente representa uma diminuição de resistência quando comparado com amostras não envelhecidas, o que não ocorreu. O fato do ganho de resistência a partir do ensaio de envelhecimento acelerado, pode ser atribuído a uma hidratação retardada do cimento devido aos efeitos da elevada temperatura e/ou a carbonatação da cal com a presença de CO₂, com o hidróxido de cálcio se transformando em carbonato de cálcio, conforme sugere a literatura (CADORE, 2008).

Também pode-se observar a partir da tabela 6 e figura 23 a grande diferença de variabilidade das amostras não carbonatadas (CV = 10,60%) e não carbonatadas envelhecidas (CV = 23,38%). Chen et al. (2012) explica que uma variabilidade maior pode ocorrer nas amostras submetidas ao envelhecimento acelerado devido a alteração da umidade presente nos corpos de prova ensaiados, que ocorrem a partir da oscilação de água presente nas amostras durante o processo de molhagem e secagem, podendo também aumentar a resistência localmente.

Ressalta-se que um dos fatores pelo qual o envelhecimento acelerado não ter apresentado efeitos negativos, é que além do efeito da cal em garantir boa durabilidade quando comparada com argamassas contendo apenas cimento (GRILLO et al., 2014).

Tabela 9 – Análise de variância (ANOVA) para a resistência de aderência à tração das amostras NC e NC E

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,091203	1	0,091203	12,84783	0,001652	4,30095	Sim
Dentro dos grupos	0,156172	22	0,007099				
Total	0,247375	23					

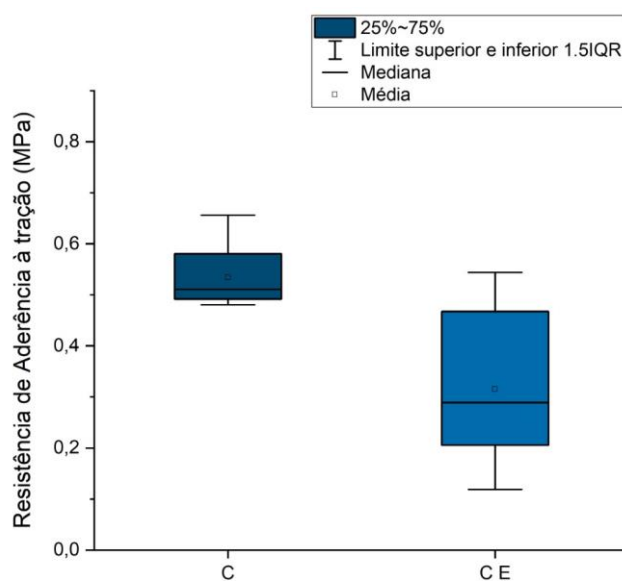
Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 9 representa a análise de variância (ANOVA) para as variáveis NC e NC E, onde a mesma apresentou um valor-p de 0,001652. Portanto, para um nível de confiança de 95% (valor-p inferior a 0,05) a análise representa significância entre as variáveis, confirmando que ambas são diferentes entre si.

4.2.1.3 Carbonatadas x Carbonatadas Envelhecidas

Na figura 27 está apresentado o gráfico referente as variáveis carbonatadas (C) e carbonatadas envelhecidas (C E).

Figura 27 – Resistência de aderência à tração dos revestimentos C e C E



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da figura 27, pode-se observar primeiramente uma resistência de aderência maior na variável carbonatada (Média = 0,53 MPa) quando comparada a variável carbonatada envelhecida (Média = 0,32 MPa). Nesse caso, como houve a carbonatação das amostras, simultaneamente houve um aumento no módulo de elasticidade (HAN et al., 2015). Sendo assim, a baixa resistência da variável C E se deu justamente pelo material estar com módulo de elasticidade elevado, sofrendo dessa forma uma maior degradação devido aos ciclos de choques térmicos (ESQUIVEL, 2009).

Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) para a resistência de aderência à tração das amostras C e C E

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,226532	1	0,226532	18,69134	0,000461	4,451322	Sim
Dentro dos grupos	0,206033	17	0,01212				
Total	0,432565	18					

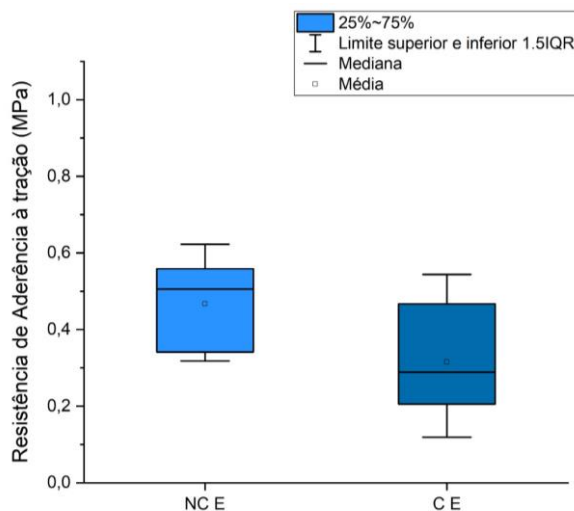
Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 10 representa a análise de variância (ANOVA) para as variáveis C e C E, onde a mesma apresentou um valor-p de 0,000461. Portanto, para um nível de confiança de 95% (valor-p inferior a 0,05) a análise representa significância entre as variáveis, confirmando que ambas são diferentes entre si.

4.2.1.4 Não Carbonatadas Envelhecidas x Carbonatadas Envelhecidas

Na figura 28 está apresentado o gráfico referente as variáveis não carbonatadas envelhecidas (NC E) e carbonatadas envelhecidas (C E).

Figura 28 - Resistência de aderência à tração dos revestimentos NC E e C E



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir do gráfico representado na imagem 28, pode-se verificar o que foi descrito anteriormente, onde a variável não carbonatada envelhecida possui uma resistência à tração média de 0,47 MPa e a carbonatada envelhecida de 0,32 MPa. Como explicado anteriormente as hipóteses são de que o envelhecimento acelerado contribuiu para a hidratação do cimento e/ou carbonatação da cal na presença de CO_2 , e dessa forma o envelhecimento contribuiu, de forma indireta, para a melhoria da resistência da argamassa. Quando comparado a argamassa carbonatada envelhecida, se percebe uma notória diminuição de sua resistência, isso devido ao elevado módulo de elasticidade inicial provocado pela carbonatação, e dessa forma os choques térmicos contribuíram para a degradação do material.

Outro fator importante a ser ressaltado é a alta variabilidade das duas variáveis envelhecidas, onde a NC E obteve uma variação de 23,38% e a C E de 47,12%, sendo que a última extrapola a variação máxima sugerida por Carasek (2010) de 10% a 35%. Acreditasse que a alta variabilidade das variáveis que sofreram os ciclos térmicos se dá devido ao envelhecimento não ter ocorrido de forma homogênea nas amostras analisadas, visto que a variabilidade maior ocorre com a alteração da umidade interna decorrente dos processos de molhagem e secagem de cada amostra, causando efeitos de forma local na argamassa (CHEN et al., 2012).

Tabela 11 – Análise de variância (ANOVA) para a resistência de aderência à tração das amostras NC E e C E

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,122136	1	0,122136	7,643573	0,011953	4,351244	Sim
Dentro dos grupos	0,319579	20	0,015979				
Total	0,441715	21					

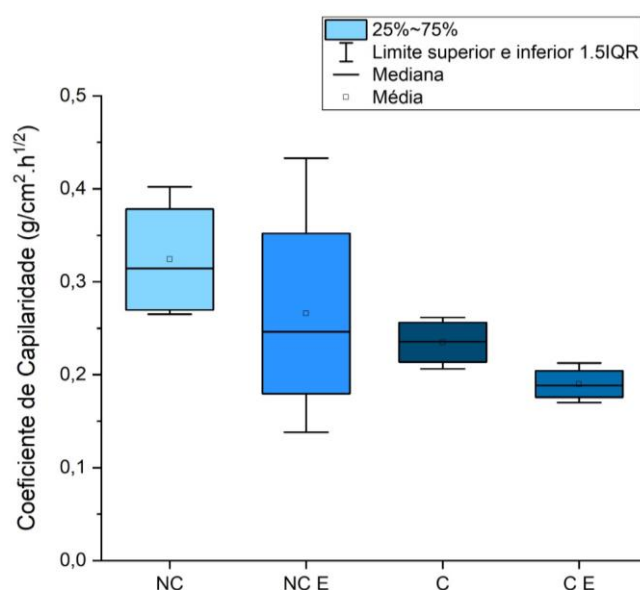
Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela 11 representa a análise de variância (ANOVA) para as variáveis NC E e C E, onde a mesma apresentou um valor-p de 0,011953. Portanto, para um nível de confiança de 95% (valor-p inferior a 0,05) a análise representa significância entre as variáveis, confirmando que ambas são diferentes entre si.

4.2.2 Absorção de água por capilaridade

A partir da absorção de água por capilaridade foi possível calcular o coeficiente de capilaridade nos revestimentos NC, NC E, C e C E a partir das retas de absorção capilar. A figura 29 representa o gráfico contendo a comparação de todas as variáveis do trabalho, e seus respectivos resultados que serão analisados separadamente a seguir.

Figura 29 – Coeficiente de capilaridade de cada variável

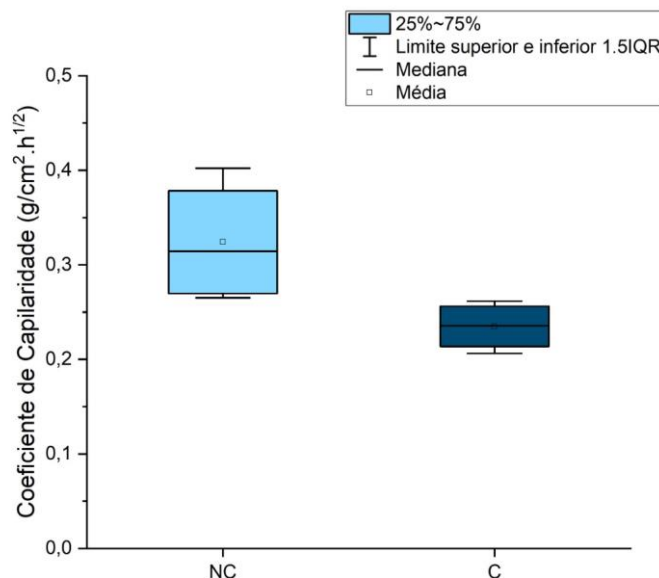


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2.1 Não Carbonatadas x Carbonatadas

Na figura 30 está apresentado o gráfico referente as variáveis não carbonatadas (NC) e carbonatadas (C).

Figura 30 – Coeficiente de capilaridade das variáveis NC e C



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao analisar o gráfico representado na figura 30, observa-se primeiramente que as duas variáveis possuem valores distintos, com a não carbonatada (NC) possuindo um coeficiente médio de $0,32 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ e a variável carbonatada (C) $0,23 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$. Acredita-se que, apesar de o trabalho não avaliar a quantificação da porosidade de cada variável, é possível perceber que na variável carbonatada houve uma menor absorção capilar quando comparada a amostra não carbonatada, dessa forma efetivando a contribuição do fenômeno de carbonatação para que houvesse a diminuição da quantidade de poros capilares, sendo esse um dos principais efeitos decorrentes do fenômeno (HAN et al., 2015; YU et al., 2017).

A diminuição do coeficiente de capilaridade na amostra carbonatada está diretamente relacionada a maior resistência obtida no ensaio de resistência de aderência à tração como mostrado no item 4.2.1.1, onde quanto menor for a porosidade e permeabilidade, maior será o aumento da resistência mecânica (YU et al., 2017).

Ao realizar a análise de variância (ANOVA) na tabela 12, percebe-se novamente a significância entre as variáveis para a confiança de 95%, sendo o valor-p de 0,044804, comprovando a diferença estatística entre ambas.

Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) para o coeficiente de capilaridade das variáveis NC e C

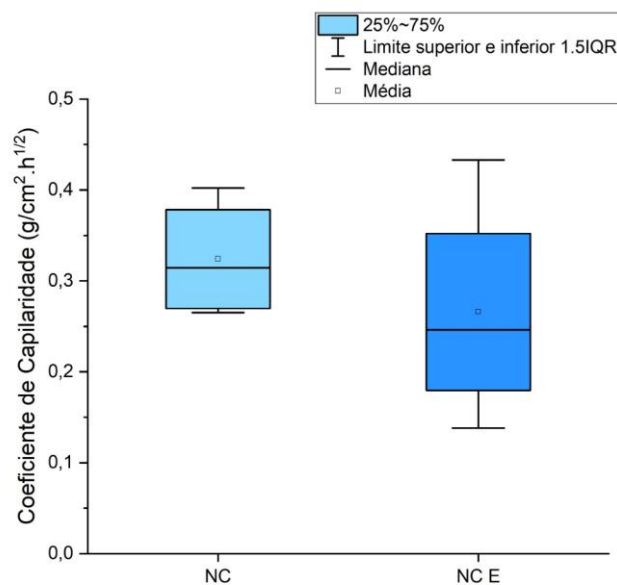
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,015927	1	0,015927	6,390499	0,044804	5,987378	Sim
Dentro dos grupos	0,014954	6	0,002492				
Total	0,030881	7					

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2.2 Não Carbonatadas x Não Carbonatadas Envelhecidas

Na figura 31 está apresentado o gráfico referente as variáveis não carbonatadas (NC) e não carbonatadas envelhecidas (NC E).

Figura 31 – Coeficiente de capilaridade das variáveis NC e NC E



Fonte: Elaborado pela autora.

A figura 31 representa a comparação dos gráficos das amostras NC (média = 0,32 $\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) e NC E (média = 0,27 $\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$), e por ela nota-se que os revestimentos envelhecidos apresentaram menor absorção que os não envelhecidos. Além disso, quando comparados os resultados de resistência à tração

e os de absorção de água, ressalta-se novamente a hipótese de uma hidratação retardada do cimento durante a ciclagem térmica ocasionada a partir dos choques térmicos.

A influência da quantidade de cal também contribui para uma baixa absorção de água (SALVI, 2017), dessa forma, a segunda probabilidade exposta na análise de resistência à tração também segue sendo uma hipótese, reforçando uma provável carbonatação da cal durante o ensaio de envelhecimento acelerado, visto que a carbonatação diminui a absorção de água em revestimentos (YU et al., 2017).

Tabela 13 – Análise de variância (ANOVA) para o coeficiente de capilaridade das variáveis NC e NC E

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,006782	1	0,006782	0,686266	0,43914	5,987378	Não
Dentro dos grupos	0,059294	6	0,009882				
Total	0,066076	7					

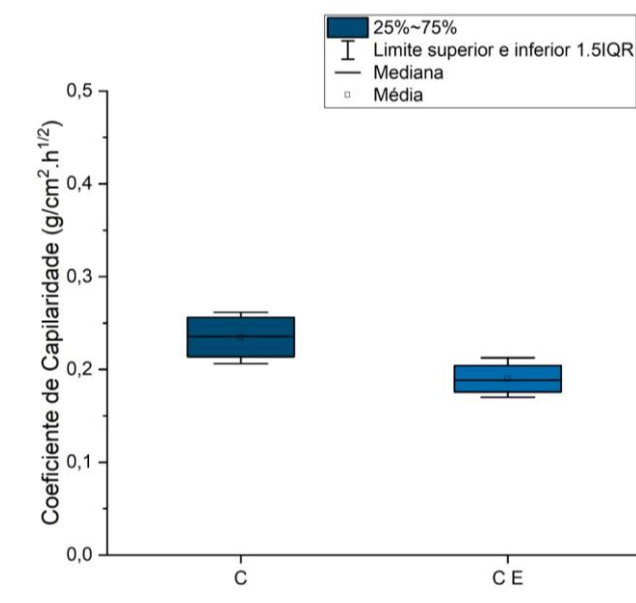
Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar de o gráfico representado na figura 28 e os valores de resistência à tração terem dado resultados significantes, onde as variáveis NC e NC E se mostraram diferentes entre si, a tabela 13 que representa a análise de variância (ANOVA) para o coeficiente de capilaridade apresentou um valor-p de 0,43914, mostrando que estatisticamente as amostras não possuem diferença significativa a ponto de serem consideradas diferentes.

4.2.2.3 Carbonatadas x Carbonatadas Envelhecidas

Na figura 32 está apresentado o gráfico referente as variáveis carbonatadas (C) e carbonatadas envelhecidas (C E).

Figura 32 – Coeficiente de capilaridade das variáveis C e C E



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando a figura 32, observa-se que a variável carbonatada envelhecida possui uma absorção capilar um pouco menor que a variável carbonatada, possuindo médias de $0,19 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ e $0,23 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$, respectivamente. Os resultados de capilaridade da amostra carbonatada envelhecida não se torna coerente ao resultado de resistência de aderência a tração visto anteriormente, onde a mesma resultou em valores baixos e significantes comparados com a variável carbonatada. Um resultado semelhante foi encontrado no trabalho de Lunardi (2021) que trabalhou com argamassa de cimento e areia, onde ocorreu uma menor absorção capilar na carbonatada envelhecida e também menor resistência à tração na mesma variável. A hipótese para esse resultado seria que a elevada temperatura decorrente da ciclagem tenha hidratado o cimento e conseqüentemente melhorando as propriedades da argamassa, porém não alterando sua rede de poros. Para obter certeza, pode ser realizado o ensaio porosimetria por intrusão de mercúrio em amostras do revestimento e/ou o ensaio de resistência à compressão da argamassa em exemplares carbonatados e carbonatados envelhecidos, visto que a porosidade altera diretamente essa propriedade, mas não possui tanta influência na resistência de aderência.

Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) para o coeficiente de capilaridade das variáveis C e C E

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,004051	1	0,004051	8,124904	0,029165	5,987378	Sim
Dentro dos grupos	0,002991	6	0,000499				
Total	0,007042	7					

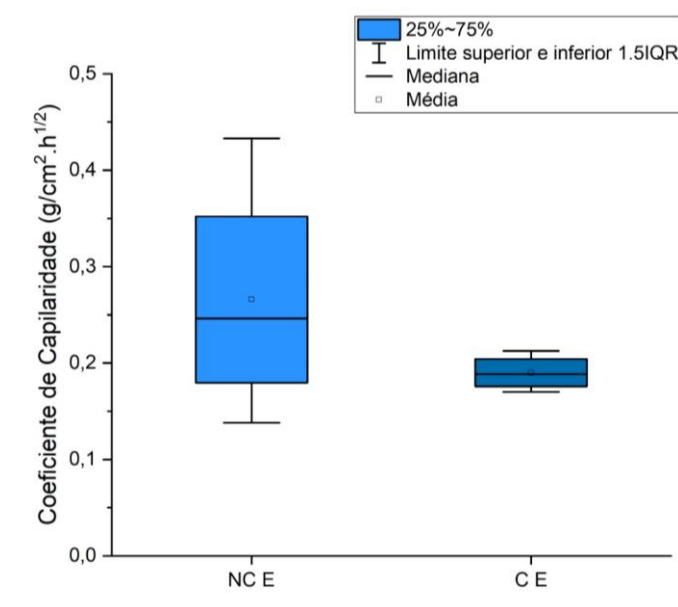
Fonte: Elaborado pela autora.

Após analisar a ANOVA obtida na tabela 14, observa-se que há diferença entre as variáveis, visto que seu valor-p de 0,029165 encontra-se abaixo de 0,05 para seu nível de confiança de 95%. Ressalta-se que a diferença entre as variáveis também foi obtida na resistência de aderência, como descrito anteriormente.

4.2.2.4 Não Carbonatadas Envelhecidas x Carbonatadas Envelhecidas

Na figura 33 está apresentado o gráfico referente as variáveis não carbonatadas envelhecidas (NC E) e carbonatadas envelhecidas (C E).

Figura 33 – Coeficiente de capilaridade das variáveis NC E e C E



Fonte: Elaborado pela autora.

Além das explicações sobre a carbonatação e o envelhecimento descritos anteriormente entre as demais variáveis, ao analisar a figura 33 é possível observar que a variável NC E possui um coeficiente de variação expressivamente maior que a

variável C E, sendo 46,74% e 10,94%, respectivamente. Com isso, a hipótese é que os poros da variável que não ocorreu carbonatação não possuem regularidade em seus tamanhos, e após a carbonatação os poros maiores foram fechados e os menores seguiram com um padrão de tamanho parecidos, tendo gerado uma uniformidade na variável C E, e dessa forma, ocasionaram uma menor variação.

Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA) para o coeficiente de capilaridade das variáveis NC E e C E

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre grupos	0,011555	1	0,011555	1,464781	0,271682	5,987378	Não
Dentro dos grupos	0,047331	6	0,007889				
Total	0,058886	7					

Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar de graficamente as variáveis terem apresentado grande diferença entre si, a partir dos resultados da ANOVA obtidos na tabela 15, nota-se que estatisticamente as amostras não possuem diferença, visto que o valor-p obtido foi de 0,271682, estando acima do valor-p de 0,05 para um nível de confiança de 95%.

4.2.3 Análise das deformações dos revestimentos por DIC

Para realizar a análise de deformação dos revestimentos das quatro variáveis utilizaram-se dois critérios para escolher a amostra ideal de cada uma para o ensaio, de forma que fosse possível realizar as comparações. Sendo os critérios:

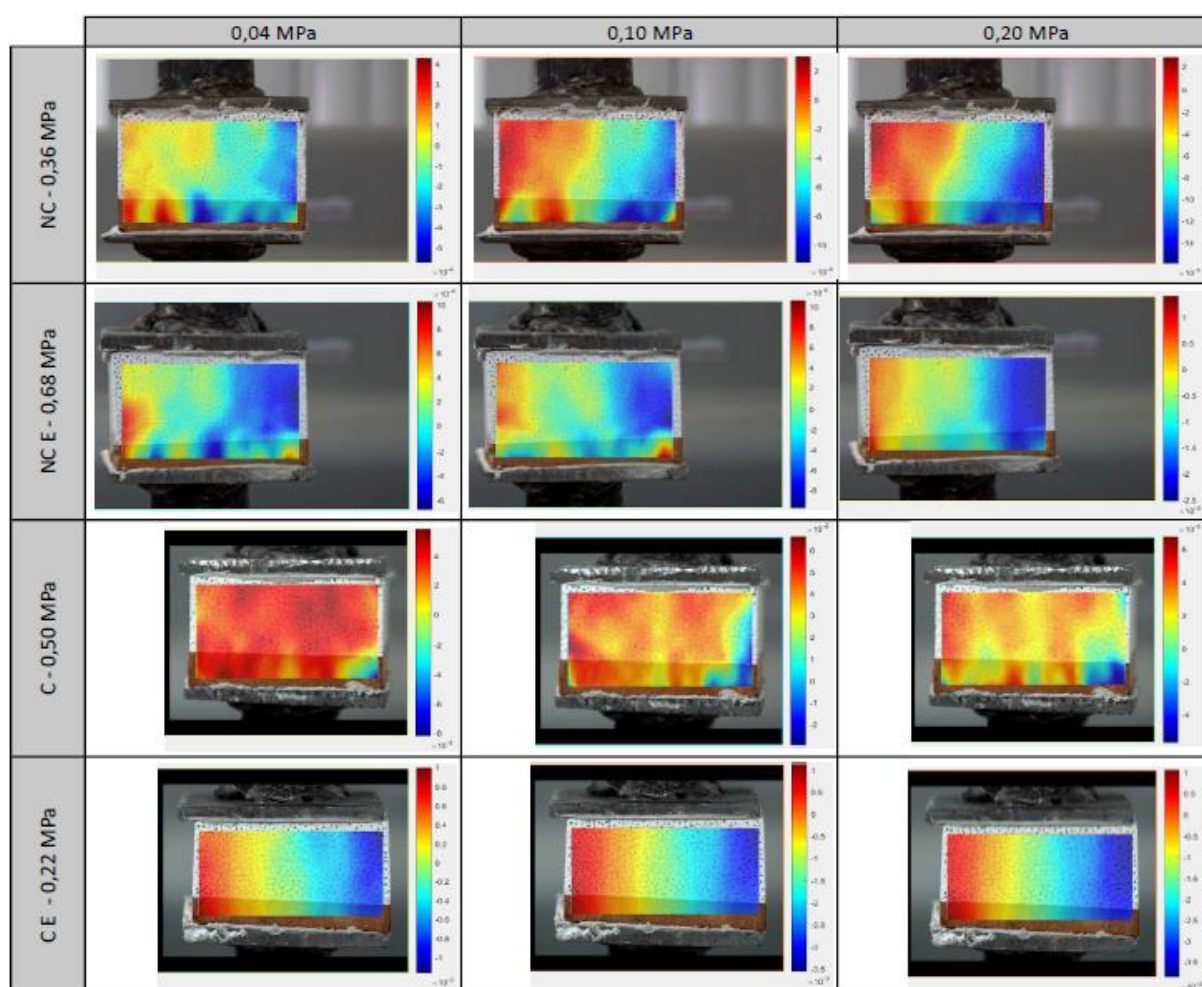
- **1º critério:** utilizaram-se as amostras que tiveram a tensão mais próxima das médias obtidas em cada variável, calculadas a partir do ensaio de tração. Esse critério foi definido para que se obtivessem os valores mais precisos obtidos em cada variável;
- **2º critério:** todas as quatro amostras analisadas deveriam ter sua ruptura na interface e não no substrato, pois assim estaria sendo avaliada a força de aderência.

Com as amostras estando dentro dos dois critérios, cada uma foi analisada individualmente, e a partir disso definiu-se um padrão de cargas a serem avaliados, de modo que todas as amostras tivessem esses carregamentos, independentemente de sua tensão máxima. Senso assim, a amostra referência utilizada foi a carbonatada envelhecida (C E) que rompeu com 0,21 MPa ou 51,26 kgf, sendo a

amostra com o menor carregamento de ruptura. A partir disso, definiu-se os valores de 10 kgf, 25 kgf e 50 kgf, que convertidos para MPa ficam 0,04, 0,10 e 0,20, respectivamente. Destaca-se que a imagem final de cada amostra não foi avaliada neste trabalho devido a diferença de tensão que poderia prejudicar e confundir a análise de resultados, com isso, essas imagens encontram-se no Apêndice C.

A partir do padrão de cargas definidos, foram obtidos os dados visuais de tensão em cada carregamento no sentido da tração (vertical) de cada variável, como demonstra o quadro 3. Destaca-se que as imagens referentes ao sentido horizontal não foram analisadas nesse trabalho, pois no primeiro momento não ajudariam na análise de resultados, visto que o método ainda está sendo desenvolvido, e a partir disso, realizar a correlação se tornaria mais complexa. Dessa forma, imagens estão localizadas no apêndice D.

Quadro 3 – Dados de tensão visuais de cada variável



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir do quadro 3, observa-se que a amostra não carbonatada (NC) teve uma deformação lenta em 0,04 MPa comparada com as demais, porém ao longo do ensaio começou a sofrer rapidamente maiores esforços de tração, e por possuir baixa resistência e um menor módulo, chegou em sua ruptura à medida que as deformações ficaram mais evidentes.

A amostra carbonatada (C) já obteve um comportamento completamente diferente da não carbonatada (NC). Na carga de 0,04 MPa, essa amostra suportou o maior esforço de tração inicial comparado com as demais devido a sua elevada rigidez. Isso ocorreu por consequência do processo de carbonatação e hidratação da cal, que melhorou suas propriedades mecânicas, garantindo que a amostra suportasse maior esforço de tração.

As amostras não carbonatada envelhecida (NC E) e carbonatada envelhecida (C E) obtiveram um comportamento semelhante, independente da carga final, porém na carbonatada envelhecida o esforço de tração se tornou mais evidente. Esse fato ocorre devido ao módulo inicial dessa amostra (antes do envelhecimento) estar mais elevado, e a partir dos ciclos térmicos ocorreu uma maior degradação, precisando de um menor esforço de tração para romper.

Já a não carbonatada envelhecida (NC E) sofreu um esforço de tração menor que as demais durante o ensaio, acredita-se que seja pelo fato de o processo de envelhecimento acelerado não ser homogêneo, o que gerou uma degradação local da metade para o lado esquerdo da amostra. No entanto, mesmo degradando obteve uma resistência de aderência alta, pois provavelmente o lado que comprimiu (direito) não sofreu degradação de forma tão significativa quanto o outro e, portanto, conseguiu resistir e suprir a demanda de tração.

Destaca-se que todas as análises realizadas por esse método estão condizentes com o comportamento das variáveis no ensaio de resistência de aderência à tração visto anteriormente. Indicando que a variável carbonatada (C) possui tendência de suportar maiores esforços de tração, devido aos efeitos da carbonatação que resultam em um maior módulo de elasticidade, conforme descrito na literatura (HAN et al., 2015; YU et al., 2017). A variável não carbonatada (NC) precisando de esforços de tração menores para romper devido suas propriedades mecânicas serem inferiores quando comparado com a carbonatada. A variável não carbonatada envelhecida (NC E) possuindo uma resistência à tração maior que a variável sem envelhecimento, porém com deformação semelhante a variável

carbonatada envelhecida (C E), o que sugere que o módulo de elasticidade de ambas tenha reduzido em relação as variáveis que não sofreram envelhecimento, independentemente de sua resistência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve como objetivo analisar a influência da carbonatação e do envelhecimento acelerado por ciclagem térmica nas propriedades mecânicas das argamassas de revestimento compostas por cimento, cal e areia.

Com relação ao ensaio de resistência de aderência à tração, observou-se que as amostras carbonatadas apresentaram uma melhora em sua resistência, sendo 55,88% maior que as amostras não carbonatadas. Quando comparados os resultados de resistência da variável não carbonatada com a não carbonatada envelhecida, obteve-se um cenário diferente do esperando, onde a não carbonatada possuiu menor resistência que a não carbonatada envelhecida. A hipótese é que houve uma hidratação retardada do cimento devido a elevada temperatura decorrente do ensaio de envelhecimento acelerado, ou a ocorrência da hidratação da cal por carbonatação a partir da presença de CO₂ no ambiente. Contudo, o envelhecimento acelerado causou o efeito contrário na amostra carbonatada envelhecida que teve sua resistência diminuída drasticamente em comparação com a carbonatada e não carbonatada envelhecida. Acredita-se que a degradação ocorreu por as amostras estarem mais rígidas por conta do elevado módulo de elasticidade devido a carbonatação, visto que as argamassas com módulo mais alto tendem a degradar mais.

Os padrões de ruptura das amostras no ensaio de resistência de aderência à tração também apresentaram comportamentos diferentes, onde as amostras que não foram submetidas a carbonatação romperam majoritariamente no bloco e as amostras ensaiadas após a carbonatação ocorreram em sua maioria na interface. A hipótese levantada para esse caso é de que, como o cimento e a cal possuem elevada finura, ambos podem ter penetrado nos poros do substrato e carbonatado com a presença de CO₂, e dessa forma, aumentado as propriedades mecânicas do bloco, que anteriormente possuía baixa resistência à tração.

A partir do ensaio de absorção de água por capilaridade, é possível concluir que a carbonatação diminui a velocidade de absorção capilar e também a variabilidade das amostras. Já o envelhecimento não gerou grandes diferenças entre as amostras carbonatadas e não carbonatadas. A diminuição da capilaridade na amostra que sofreu o carbonatação e envelhecimento acelerado, difere dos resultados de resistência de aderência à tração. A hipótese é de que a elevada

temperatura tenha hidratado o cimento, porém não alterado a rede de poros capilares da argamassa.

As análises visuais obtidas a partir da determinação das deformações em material frágil sobre esforços de tração por Digital Image Correlation (DIC) se mostraram coerentes com os resultados obtidos no ensaio de resistência de aderência à tração, o que sugere que o método é eficaz. Com isso, ressalta-se que esse método deve ser estudado mais profundamente, visto que já é possível realizar o cálculo do módulo de elasticidade por DIC em ensaios de compressão, e agora deve ser desenvolvido o cálculo do módulo de elasticidade para esforços de tração.

A partir da análise visual também foi possível verificar que as quatro variáveis tiveram comportamentos distintos, indicando como o envelhecimento acelerado e a carbonatação afetam diretamente na deformação dos revestimentos. A variável não carbonatada (NC) resultou na tendência esperada, resultando em uma menor deformação inicial e rompendo logo que as deformações ficaram mais evidentes. A variável carbonatada (C) apresentou uma maior deformação devido ao efeito da carbonatação, que resultou numa melhora de suas propriedades, suportando um maior esforço de tração, o que condiz com a literatura. Nas variáveis envelhecidas (NC E e C E), pôde-se observar uma grande semelhança em seus comportamentos, indicando, mais uma vez, que houve uma degradação nas amostras a partir do envelhecimento acelerado, o que provavelmente diminuiu o módulo de elasticidade de ambas, quando comparadas as suas respectivas referências.

Por fim, pode-se concluir que a carbonatação gerou bons resultados, aumentando a resistência de aderência à tração e diminuindo a absorção capilar das amostras ensaiadas. O envelhecimento acelerado contribuiu para o ganho de resistência das amostras que não sofreram carbonatação. O ensaio de envelhecimento acelerado também obteve um efeito positivo gerando uma menor absorção capilar das amostras carbonatadas, porém diminuindo consideravelmente sua resistência devido ao elevado módulo de elasticidade provocado pela carbonatação. As análises visuais realizadas por Digital Image Correlation (DIC) também se mostraram coerentes, comprovando que o método é eficaz. Dessa forma sugere-se um estudo mais aprofundado desse método para se obter certeza dos dados.

REFERÊNCIAS

ADORNA, D. DA L. **Carbonatação acelerada em concretos com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água**. 2016. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

ANDRADE, C.; BUJÁK, R. Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion. **Cement and Concrete Research**, v. 53, p. 59–67, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 7200:1998: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 9778:2005: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 13276:2016: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 13277:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 13278:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 13279:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 13280:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 13528:2019: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 13749:2013: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 15261:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 15575:2013: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 15630:2009: Determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método do ultrassom. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 15839:2010: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 16541:2016: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 16887:2020: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 16916:2021: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 16972:2021: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AUROY, M. et al. Comparison between natural and accelerated carbonation (3% CO₂): Impact on mineralogy, microstructure, water retention and cracking. **Cement and Concrete Research**, v. 109, n. April, p. 64–80, 2018.

BAKKER, R. F. M. Initiation period. In: Schiessl, P. ed. **Corrosion of steel in concrete**. London, Chapman and Hall, 1988, cap. 3, p. 22-55.

BAROGHEL-BOUNY, V. **Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - Méthodes analyse, interprétations**. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1994.

BASTOS, Pedro Kopschitz Xavier. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. 2001. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, São Paulo, 2001.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. IBRACON, 2011.

BLABER, J.; ADAIR, B.; ANTONIOU, A. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. **Experimental Mechanics**, v. 55, n. 6, p. 1105–1122, 2015.

BOCHEN, J. Durability assessment of building materials exposed to atmosphere agents by testing in simulated environment. **Architecture Civil Engineering Environment**, v. 6, n. 1, p. 17–25, 2013.

BOCHEN, J. Weathering effects on physical-chemical properties of external plaster mortars exposed to different environments. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 192–206, 2015.

BOURGUIGNON, K. M. B. G. **Influência da resistência à compressão na carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. 2004. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004

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

CARASEK, H. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2ª ed. São Paulo. IBRACON, 2010, v. 2, p. 885-936.

CASTELLOTE, M. et al. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. **Materials and Structures**, v. 42, n. 4, p. 515–525, 2009.

CHEN, D.; SHEN, W.Q.; SHAO, J.F.; YURTDAS, I. Micromechanical modeling of mortar as a matrix-inclusion composite with drying effects. **Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.** 2012, 37, 1034–1047.

CHU, T. C.; RANSON, W. F.; SUTTON, M. A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. **Experimental Mechanics**, v. 25, n. 3, p. 232–244, 1985.

COELHO, Ana Zulmira Gomes; TORRAL, F. Pacheco; JAGALI, Said. **A cal na construção.** 1. ed. Portugal: TecMinho, 2009. 132 p. ISBN 978-972-99179-8-1.

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

DE WEERDT, K. et al. Effect of carbonation on the pore solution of mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 118, n. January, p. 38–56, 2019.

DROUET, E. **Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires - prise en compte des transferts hydriques.** 2010. 314 f. Tese (DOCTEUR DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN) - Faculdade de Mecânica e Engenharia Civil, Cachan, 2010.

DROUET, E. et al. Carbonation of hardened cement pastes: Influence of temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 115, n. September 2018, p. 445–459, 2019.

ĎUREJE, J.; PROŠEK, Z. Foamed Cement Composites: Detection of the Modulus of Elasticity Using Dic Analysis and Comparison With Other Methods. **Acta Polytechnica CTU Proceedings**, v. 13, n. M, p. 35–38, 2017.

EKOLU, S. O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 306–320, 2016.

ESQUIVEL, J. T. **Avaliação da Influência do Choque Térmico na Aderência dos Revestimentos de Argamassa**. 262 f. São Paulo, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, 2013.

FREITAS, Juliana Gomes. **A Influência das Condições Climáticas na Durabilidade dos Revestimentos de Fachada: Estudo de Caso na Cidade de Goiânia - GO**. 2012. 197 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, 2012.

FU, Y. F. et al. Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 5, p. 789–797, 2004.

GALAN, I.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M. Natural and accelerated CO₂ binding kinetics in cement paste at different relative humidities. **Cement and Concrete Research**, v. 49, p. 21–28, 2013.

GLASSER, F. P.; MATSCHEI, T. Interactions Between Portland Cement and Carbon Dioxide F.P. Glasser 1 , T. Matschei 1 1 University of Aberdeen, Old Aberdeen, AB24 3UE Scotland, UK. **12th International Congress on the Chemistry of Cement**, 2007.

GONTARSKI, T. DE L.; CASALI, R. M.; MIKOWSKI, A. Dureza Vickers – Definição, normatização e perspectivas de pesquisa: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 15736–15754, 2021.

GRILO, J. et al. New natural hydraulic lime mortars - Physical and microstructural properties in different curing conditions. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 378–384, 2014.

GUIMARÃES, J. E. P.; GOMES, R. D.; SEABRA, M. A. Guia das argamassas nas construções: construindo para sempre com cal hidratada. 8. ed. São Paulo: **Associação Brasileira de Produtores de Cal**, 2004.

HAN, J. et al. Monitoring the Evolution of Accelerated Carbonation of Hardened Cement Pastes by X-Ray Computed Tomography. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 3, p. 347–354, 2013.

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.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Livre Docência). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 1993.

VIEIRA, L. H. **Estudo da aderência do revestimento de argamassa em substrato cerâmico, através dos ensaios de tração e cisalhamento**. 2021. 126 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Unidade acadêmica de graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2021.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 17, n. 3, p. 489–504, 1987.

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.

ISHIDA, T.; MAEKAWA, K. Modeling of pH Profile in Pore Water Based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory. **Doboku Gakkai Ronbunshu**, v. 47, n. 648, p. 203–215, 2000.

JIANG, L.; LIN, B.; CAI, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 699–702, 2000.

JOHANNESSON, B.; UTGENANNT, P. Microstructural changes caused by

carbonation of cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 6, p. 925–931, 2001.

KAZMIERCZAK, C. DE S. et al. Considerações sobre a Avaliação da Durabilidade de Revestimentos de Argamassa com Incorporação de Resíduos por Meio de Ensaio Acelerados com Ciclos Térmicos. **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade**, n. August, p. 147–176, 2016.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2002.

KUMAR, S. L.; ARAVIND, H. B.; HOSSINEY, N. Digital image correlation (DIC) for measuring strain in brick masonry specimen using Ncorr open source 2D MATLAB program. **Results in Engineering**, v. 4, n. August, p. 100061, 2019.

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

LI, B. et al. Influence of carbonation on the volume change of hardened cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119709, 2020.

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

LIU, L. et al. Development of a CO₂ solidification method for recycling autoclaved lightweight concrete waste. **Journal of Materials Science Letters**, v. 20, n. 19, p. 1791–1794, 2001.

LUNARDI, Monique Palavro. **Avaliação multiescalar do efeito da carbonatação na durabilidade de argamassas de revestimento**. 2021. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2021.

MAGALHÃES, A. G. et al. The Influence of the Water/Cement Ratio in the Open Porosity and in the Carbonation Front Advancing in Cementitious Matrix Composites. **Applied Mechanics and Materials**, v. 864, n. April, p. 313–317, 2017.

MALAGONI, M. A., SCARTEZINI, V. **Análise dos resultados de resistência de aderência em revestimentos de argamassa**. 2013. 391 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2013.

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

MAZZA, R. **Carbonatação acelerada de concretos com cinza de casca de arroz sem moagem**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MCCORMICK, N.; LORD, J. Digital image correlation. **Materials Today**, v. 13, n. 12, p. 52–54, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 674 p. São Paulo: IBRACON, 2008.

MIRANDA, L.; SELMO, S. Efeito de choques térmicos na fissuração de revestimentos de argamassa com RCD. In: Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas, 5, São Paulo, 2003. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2003. p. 583-594.

MORAES, G. A. et al. Análise da profundidade de carbonatação em argamassas de revestimento com substituição parcial de areia natural por resíduo de construção civil (RCC). **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 6, p. 3212–3225, 2018.

MUNTEAN, A. et al. **A note on limitations of the use of accelerated concrete-carbonation tests for service-life predictions**. p.1-15. Universität Bremen, 2005.

MUNTEAN, A.; BÖHM, M. Interface conditions for fast-reaction fronts in wet porous mineral materials: The case of concrete carbonation. **Journal of Engineering Mathematics**, v. 65, n. 1, p. 89–100, 2009.

NASCIMENTO, M. L. M. **Aplicação da Simulação Higrotérmica na Investigação da Degradação de Fachadas de Edifícios**. 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado em

Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

NUNES, D. G. **Carbonatação acelerada em concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. 2014. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 912 p. 5 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 448 p. 2 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013.

OLIVEIRA, L. A.; FONTENELLE, J. H.; MITIDIERI 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.

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

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. **AIChE Journal**, v. 35, n. 10, p. 1639–1650, 1989.

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

PARROTT, L. J. Variations of water absorption rate and porosity with depth from an exposed concrete surface: Effects of exposure conditions and cement type. **Cement and Concrete Research**, v. 22, n. 6, p. 1077–1088, 1992.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a**

partir de ensaios acelerados e de modelos de predição. 2009. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PETER, M. A. et al. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1385–1393, 2008.

PLETSCH, Alexander. **Avaliação da carbonatação em materiais cimentícios com substituição de cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar.** 2019. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2019.

POLITO, Giulliano. **Avaliação da introdução de cal hidratada nas argamassas aplicadas sobre blocos cerâmicos e sua influência no desempenho e morfologia.** Orientador: Antônio Neves de Carvalho Júnior. 2008. 181 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Belo Horizonte, 2008.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado.** 2004. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

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

PROAÑO, L. et al. Techno-economic evaluation of indirect carbonation for CO₂ emissions capture in cement industry: A system dynamics approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, 2020.

RILEM TC 116-PCD. Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability: Tests for gas permeability of concrete. **Materials and Structures**, v. 32, n. April, p. 174–179, 1999.

RUDUIT, F. R. **Contribuição ao estudo da aderência de revestimentos de argamassa e chapisco em substrato de concreto**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SAETTA, A. V.; SCHREFLER, B. A.; VITALIANI, R. V. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 4, p. 761–772, 1993.

SALVI, Chanalisa Ruggini. **Avaliação da resistência de aderência à tração de argamassas de revestimento sobre diferentes substratos na cidade de Guaporá/RS**. 2017.113 f. Monografia – Curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, Lajeado, 2017.

SENTENA, Jeferson Alcantara Alves. **Discussão sobre métodos acelerados para a avaliação do envelhecimento de revestimentos de argamassas submetidos a ciclos térmicos: aplicação em argamassa com fíler de concreto**. 2015. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2015.

SENTENA, J. A. A.; KAZMIERCZAK, C. DE 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.

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

SILVA, H. J. M. et al. Comparativo na avaliação da influência do clima em revestimentos de argamassa e cerâmicos: estudo de caso em goiânia-go, *In: XIII SBTA – Simposio Brasileiro De Tecnologia das Argamassas*, Goiânia, GO, Jun. 2019.

SILVA, N. G. DA; CAMPITELI, V. C. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 42, p. 21–35, 2008a.

SILVA, N. G. DA; CAMPITELI, V. C. Módulo de elasticidade dinâmico de argamassa de revestimento. **2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais**, p. 1–9, 2008b.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzidas**. 2007. 306 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2007.

STRAUBE, J. F. Moisture in buildings. **ASHRAE Journal**, v. 44, n. 1, p. 15–19, 2002.

SUTTON, A.M.; ORTEU, J.J.; SCHREIER, H.A. **Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements**. Boston: Springer, 2009.

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

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. Nova Iorque: Thomas Telford Publishing, 1997. 469 p. v. 2.

THIERY, M. **Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques**. Engineering Sciences. Ecole des Ponts Paris Tech, 2005.

THIERY, M. et al. A prediction model for concrete carbonation based on coupled CO₂-H₂O-ions transfers and chemical reactions. **10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components**, n. January, p. 17–20, 2005.

TURCRY, P. et al. Analysis of an accelerated carbonation test with severe preconditioning. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p. 70–78, 2014.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 473 p.

UCHÔA, J. C. B. **Procedimento numérico e experimental para a avaliação da resistência à fadiga de sistemas de revestimento**. 2007. 159 f. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

VALDAMERI, C. Z. **Avaliação dos parâmetros e desempenho para certificação de argamassas intermediárias**. 2005. 169 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

VALENTINI, Paola. **Avaliação da interação de argamassas de revestimento com utilização de filer e substratos com diferentes rugosidades na resistência de aderência**. 2018. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2018.

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.

YU, M. et al. The effect of random porosity field on supercritical carbonation of cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 144–155, 2017.

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

APÊNDICE A

RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DE CADA VARIÁVEL

ARGAMASSA NÃO CARBONATADA – 68 DIAS

ARGAMASSA NÃO CARBONATADA (Idade: 68 dias)					
N° mostra	Resistência (MPa)	Forma de ruptura			
		Bloco	Interface	Argamassa	Cola
1	0,36	100%			
2	0,36	98%	2%		
3	0,38	100%			
4	0,37		100%		
5	0,36		100%		
6	0,32	100%			
7	0,26	100%			
8	0,37		100%		
9	0,31	100%			
10	0,36	10%	90%		
11	0,45	100%			
12	0,52	30%	70%		
13	0,32	10%	90%		
Resistência média = 0,36 MPa		Coeficiente de variação = 17,38%			

Observação: as amostras pintadas de azul são as exceções descartadas.

ARGAMASSA NÃO CARBONATADA ENVELHECIDA – 124 DIAS

ARGAMASSA NÃO CARBONATADA ENVELHECIDA (Idade: 124 dias)					
N° mostra	Resistência (MPa)	Forma de ruptura			
		Bloco	Interface	Argamassa	Cola
1	0,56	20%	80%		
2	0,57	100%			
3	0,56	100%			
4	0,32	100%			
5	0,34	90%	10%		
6	0,32	80%	20%		
7	0,53	90%	10%		
8	0,33		100%		
9	0,48		100%		
10	0,51		100%		
11	0,52	98%	2%		
12	0,40		100%		
13	0,62	100%			
Resistência média = 0,47 MPa		Coeficiente de variação = 23,38%			

ARGAMASSA CARBONATADA – 166 DIAS

ARGAMASSA CARBONATADA (Idade: 166 dias)				
N° mostra	Resistência (MPa)	Forma de ruptura		
		Bloco	Interface	Argamassa Cola
1	0,66	70%	30%	
2	0,54		100%	
3	0,49		100%	
4	0,85		100%	
5	0,49		100%	
6	0,49		100%	
7	0,58		100%	
8	0,52		100%	
9	0,48		100%	
10	0,50		100%	
11	0,58		100%	
12	0,91		100%	
Resistência média = 0,59 MPa		Coeficiente de variação = 24,43%		

Observação: as amostras pintadas de azul são as exceções descartadas.

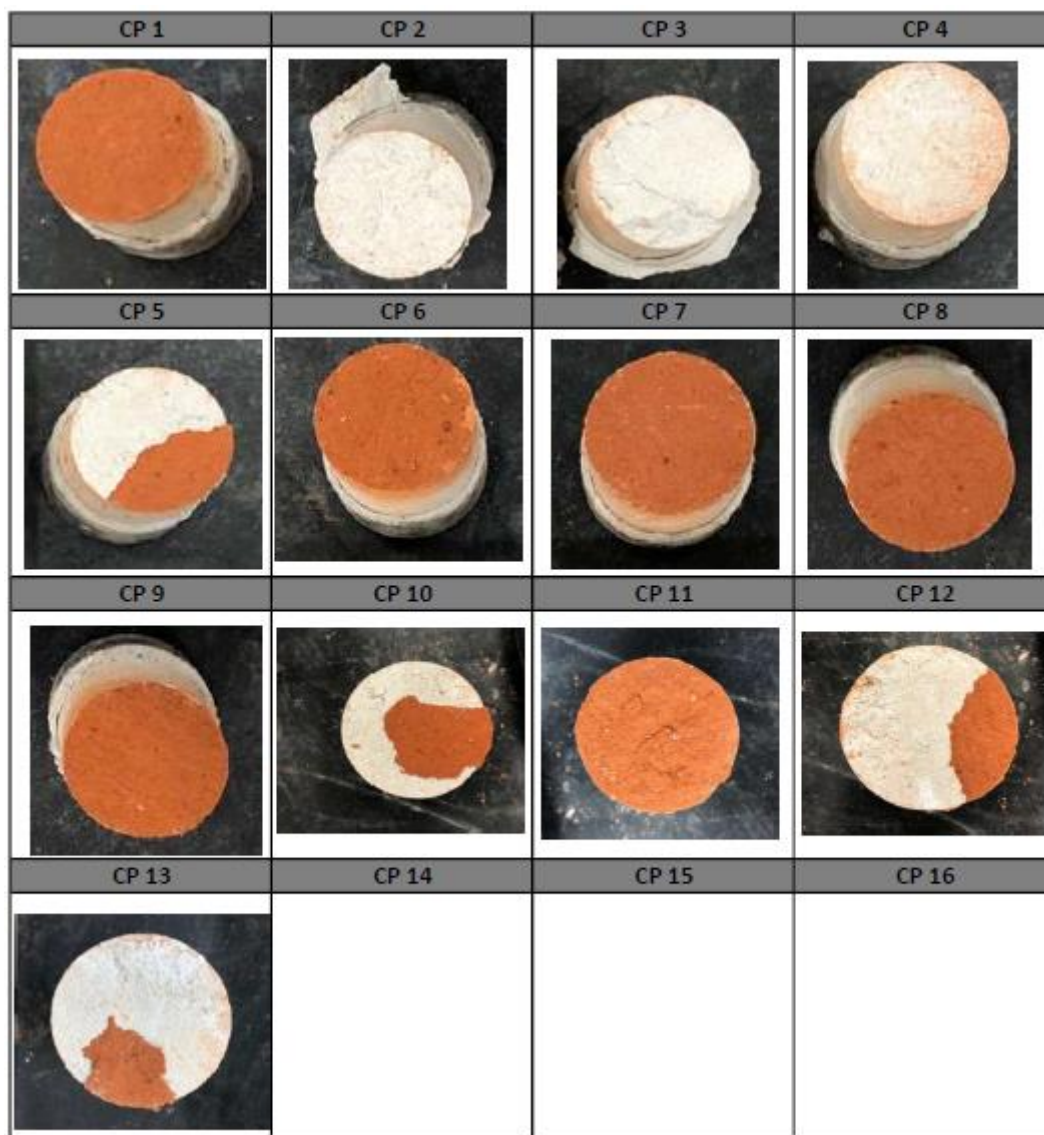
ARGAMASSA CARBONATADA ENVELHECIDA – 166 DIAS

ARGAMASSA CARBONATADA ENVELHECIDA (Idade: 166 dias)				
N° mostra	Resistência (MPa)	Forma de ruptura		
		Bloco	Interface	Argamassa Cola
1	0,31	90%	10%	
2	0,47	70%	30%	
3	0,21		100%	
4	0,48		100%	
5	0,54		100%	
6	0,29		100%	
7	0,26		100%	
8	0,17		100%	
9	0,12		100%	
Resistência média = 0,32 MPa		Coeficiente de variação = 47,12%		

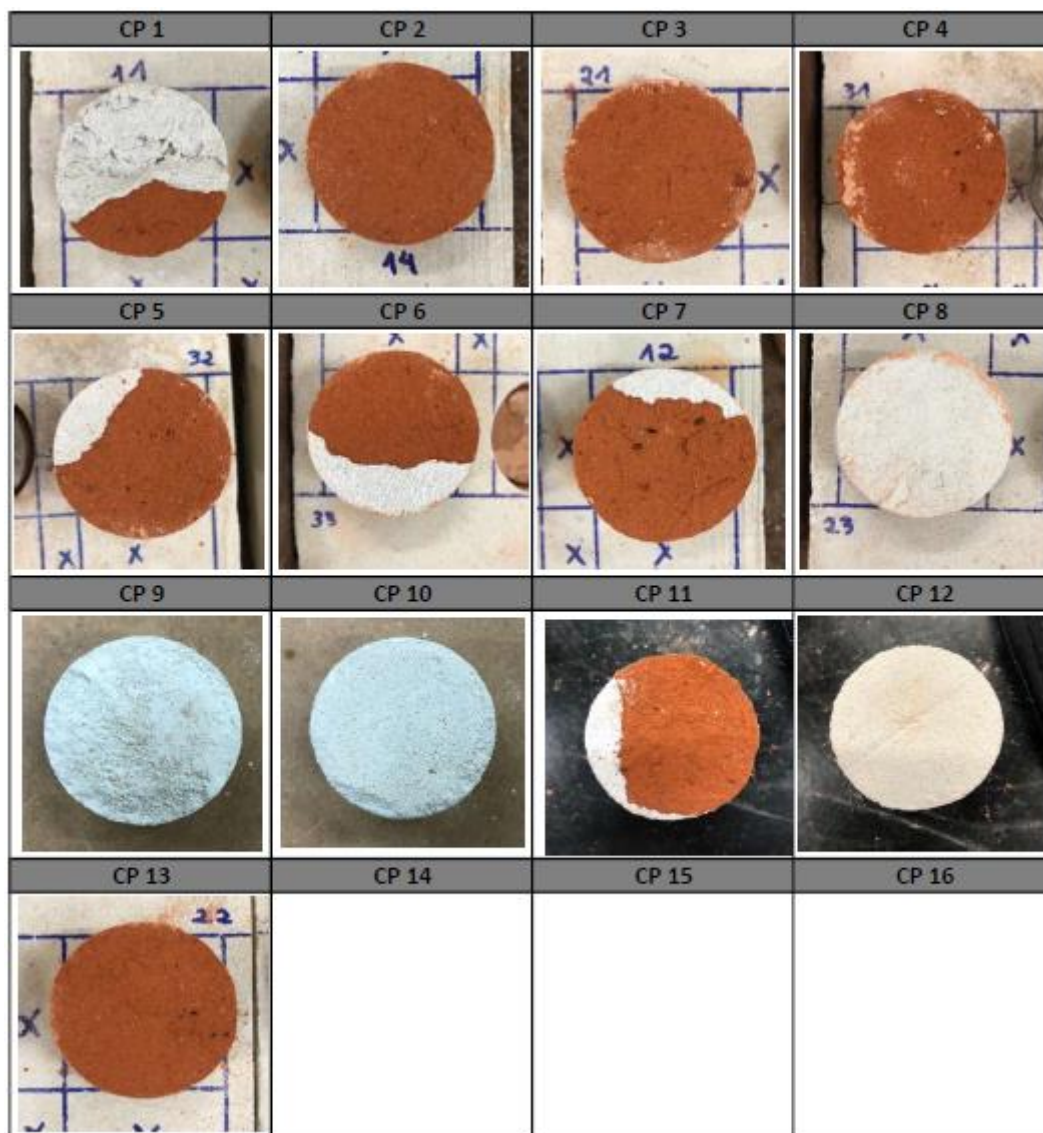
APÊNDICE B

FORMA DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA DE CADA VARIÁVEL

ARGAMASSA NÃO CARBONATADA – 68 DIAS



ARGAMASSA NÃO CARBONATADA ENVELHECIDA – 124 DIAS



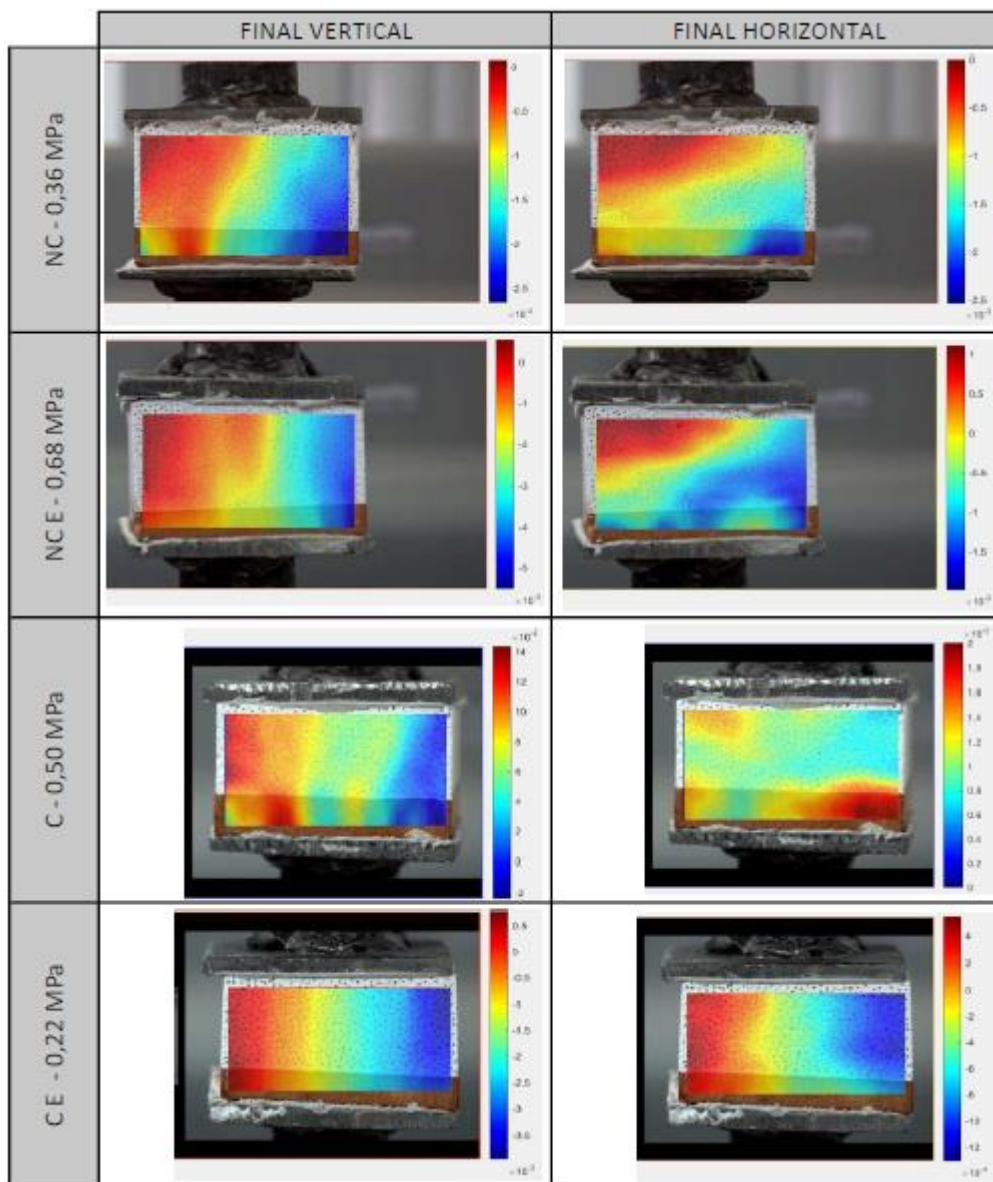
ARGAMASSA CARBONATADA – 166 DIAS

CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
			
CP 5	CP 6	CP 7	CP 8
			
CP 9	CP 10	CP 11	CP 12
			
CP 13	CP 14	CP 15	CP 16

ARGAMASSA CARBONATADA ENVELHECIDA – 166 DIAS



APÊNDICE C

IMAGENS DAS DEFORMAÇÕES FINAIS DO ENSAIO DE DIGITAL IMAGE
CORRELATION (DIC)

APÊNDICE D

IMAGENS DAS DEFORMAÇÕES HORIZONTAIS DO ENSAIO DE DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC)

