

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Giovanna Caroline Aschebrock

**AVALIAÇÃO DA AUTOLIMPEZA DE ARGAMASSA BRANCA COM TiO_2 E COM
HIDROFUGANTE**

Porto Alegre
Novembro 2021

GIOVANNA CAROLINE ASCHEBROCK

**AVALIAÇÃO DA AUTOLIMPEZA DE ARGAMASSA BRANCA COM TiO₂ E COM
HIDROFUGANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientadora: Angela Borges Masuero
Coorientadora: Roberta Picanço Casarin

Porto Alegre
Novembro 2021

GIOVANNA CAROLINE ASCHEBROCK

**AVALIAÇÃO DA AUTOLIMPEZA DE ARGAMASSA BRANCA COM TiO₂ E COM
HIDROFUGANTE**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora, pela Coorientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 29 de novembro de 2021

BANCA EXAMINADORA

Profa. Angela Borges Masuero (UFRGS)

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Eng. Roberta Picanço Casarin (UFRGS)

MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientadora

Arq. Fernanda Lamego Guerra (UFRGS)

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Jéssica Deise Bersch (UFRGS)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Roseli e Armin, e ao Matheus, pelo imenso incentivo, apoio e carinho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Roseli e Armin, agradeço pela confiança, apoio, incentivo e pelo suporte. E mãe, sem você nada seria possível, você é força, carinho, amor e minha maior inspiração. Obrigada pelos conselhos e por me ajudarem a ser a pessoa que sou hoje, dedico tudo a vocês.

Agradeço ao Matheus, pelo amor e companheirismo e por sempre acreditar em mim. Aos seus pais, Eliane e Neori, também agradeço pelo incentivo e pela ajuda.

Agradeço a professora Angela, orientadora deste trabalho, por acreditar e confiar em mim desde o meu período como bolsista. Obrigada por todo empenho, carinho, disponibilidade e conhecimento. Você é uma inspiração, um exemplo e tem a minha gratidão.

Agradeço a Roberta, coorientadora deste trabalho, pelo apoio, auxílio, conhecimento e por estar sempre disponível para mim e para as minhas dúvidas. Agradeço especialmente por dedicar seu tempo para me ajudar durante as moldagens e na execução dos ensaios, comemorando comigo cada etapa deste trabalho. Também agradeço a Jéssica, pelo conhecimento e pelo auxílio em vários questionamentos. Sem vocês este trabalho não seria o mesmo, meu muito obrigada.

Agradeço aos muitos professores que fizeram parte da minha caminhada e que contribuíram para a minha formação acadêmica e profissional, meu mais profundo respeito e admiração. Vocês são a base para a transformação da sociedade. Agradeço, também, aos muitos amigos e colegas nestes anos de cursos, pelos trabalhos, pela parceria, pelas conversas e risadas e, inclusive, pelo nervosismo compartilhado aos finais dos semestres.

Agradeço a todos os amigos e colegas do NORIE que estão sempre disponíveis para ajudar e auxiliar. É um prazer conviver com vocês desde o meu ano de bolsista até o desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço o técnico Airton pelo auxílio nos ensaios e o técnico Ari pelas conversas, dicas e pela ajuda nas mais diversas atividades, sempre tendo as melhores ideias.

Agradeço a universidade, pela disponibilidade do laboratório para a realização da pesquisa e pela liberação de entrada no prédio branco para a exposição das amostras. Obrigada, especialmente, ao Fernando que se disponibilizou para abrir o prédio nos dias do ensaio.

Por fim, agradeço à banca avaliadora deste trabalho pela disposição e contribuições.

Os anos de graduação trouxeram não só conhecimento técnico, mas também muito crescimento pessoal e tudo isso graças a muitas pessoas que passaram pela minha vida e de alguma forma me ajudaram durante este processo de aprendizagem. Muito obrigada a todos.

RESUMO

Os revestimentos das fachadas são expostos a diferentes agentes de degradação durante toda a sua vida útil, sendo a poluição ambiental e a umidade grandes responsáveis pela perda de desempenho das edificações. Estes são fatores que podem resultar em sujidades, manchas e demais manifestações patológicas que reduzem a durabilidade dos revestimentos, prejudicam a estética das edificações e, inclusive, reduzem a refletância solar, resultando em gastos elevados com limpeza e manutenção. Soluções possíveis para o aumento da durabilidade são: a utilização de aditivos hidrofugantes, que tornam o material impermeável à água líquida e permeável ao vapor de água, reduzindo problemas devido à ação da umidade; e a adição de dióxido de titânio (TiO_2) aos materiais cimentícios de forma a obter uma superfície autolimpante e com capacidade de degradar poluentes. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência da autolimpeza de uma argamassa industrializada de cor branca de acabamento externo com adição de dióxido de titânio e de um aditivo hidrofugante. Assim, foram confeccionadas argamassas brancas com adição de 0% e 10% de TiO_2 e com adição de 0%, 2% e 8% de aditivo, ambos em relação à massa de cimento. Avaliou-se a influência do hidrofugante quanto à absorção de água por capilaridade e à permeabilidade ao vapor de água, bem como avaliou-se a capacidade autolimpante proporcionada pela adição do TiO_2 . Para isto, as amostras receberam dois tipos de manchamentos (fuligem e o corante Rodamina B) e foram expostas ao ambiente urbano natural de Porto Alegre/RS, voltadas para a orientação norte e a uma inclinação de 45° , havendo o acompanhamento da alteração de cor por meio de registros fotográficos e por análise com espectrofotômetro. Observou-se um comportamento não significativo na maioria das análises, tanto para a influência do aditivo hidrofugante no comportamento das argamassas quanto para a influência do TiO_2 . Com relação à autolimpeza das argamassas, não foi possível verificar alterações durante o período de exposição de 28 dias.

Palavras-chave: Argamassa branca; Dióxido de Titânio (TiO_2); Aditivo hidrofugante; Autolimpeza.

ABSTRACT

Facade coatings are exposed to different degradation agents throughout their life cycle, with environmental pollution and moisture being mostly responsible for the loss of performance in buildings. These are factors that can result in dirt, stains and other pathological manifestations that reduce the durability of the coatings, damage the aesthetics of buildings and even reduce solar reflectance, resulting in high costs for cleaning and maintenance. Possible solutions to increase durability are: the use of water repellent additives, which make the material impermeable to liquid water and permeable to water vapor, reducing problems due to the action of moisture, and for the addition of titanium dioxide (TiO_2) to cementitious materials to obtain a self-cleaning surface capable of degrading pollutants. Therefore, this study aims to evaluate the self-cleaning efficiency of an external white mortar with addition of titanium dioxide and a water repellent additive. Thus, white mortars were made with the addition of 0% and 10% of TiO_2 and with the addition of 0%, 2% and 8% of additive, both in relation to the cement mass. The influence of the water repellent on capillary water absorption and water vapor permeability was evaluated, as well as the self-cleaning capacity provided by the addition of titanium dioxide. For this, the samples received two soiling types (soot from diesel engines and the dye Rhodamine B) and were exposed to the natural urban environment of Porto Alegre/RS, facing north and at a 45° inclination, with the monitoring of color change through photographic registration and by analysis with a spectrophotometer. A non-significant behavior was observed, both for the influence of the water repellent additive and for the influence of TiO_2 on the mortars. Regarding the self-cleaning of the mortars, it was not possible to verify changes during the 28-day exposure period.

Keywords: White mortar; Titanium Dioxide (TiO_2); Water repellent additive; Self-cleaning.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa | 23 |
| Figura 2 – Agentes de degradação das fachadas. | 26 |
| Figura 3 – Elementos constituintes dos revestimentos de argamassa: (a) Emboço e reboco e (b) Massa única | 27 |
| Figura 4 – Estruturas cristalinas do TiO ₂ : (a) rutilo, (b) anatase e (c) broquita..... | 32 |
| Figura 5 – Ilustração dos orbitais moleculares dos materiais..... | 33 |
| Figura 6 – Esquema da reação de oxirredução de semicondutores. | 34 |
| Figura 7 – Esquema dos mecanismos de despoluição do ar e de autolimpeza de superfícies com TiO ₂ devido à fotocatalise e à hidroflicidade do material. | 35 |
| Figura 8 – Catedral <i>Dives in Misericordia</i> , em Roma: (a) em 2003 e (b) em 2014..... | 36 |
| Figura 9 – Aplicação de TiO ₂ em túneis: (a) Túnel Umberto I em Roma e (b) Túnel Leopold II em Bruxelas. | 36 |
| Figura 10 – Edifício Guaspari em 2018. | 37 |
| Figura 11 – Museu Iberê Camargo em Porto Alegre: (a) fachada em condições originais e (b) sujidades presentes na fachada. | 38 |
| Figura 12 – Fenômeno do transporte de água por capilaridade..... | 40 |
| Figura 13 – Fenômeno do transporte de água por difusão | 40 |
| Figura 14 – Tipos de hidrofugantes quanto ao seu funcionamento nos materiais porosos: (a)modificador de tensão superficial, (b) bloqueador de poros e (c) formador de película. | 42 |
| Figura 15 – Representação esquemática das combinações realizadas | 44 |
| Figura 16 – Representação esquemática do programa experimental por combinação de acabamento | 45 |
| Figura 17 – Argamassa de base: (a) estado seco e (b) estado fresco..... | 46 |
| Figura 18 – Argamassa de acabamento: (a) estado seco e (b) estado fresco..... | 48 |
| Figura 19 – Aditivo hidrofugante | 50 |
| Figura 20 – Dióxido de Titânio | 51 |
| Figura 21 – Características dos corpos de prova da argamassa de base..... | 51 |
| Figura 22 – Adição do aditivo hidrofugante na mistura na betoneira | 53 |
| Figura 23 – Adição do TiO ₂ na mistura: (a) Dispersão do TiO ₂ em água deionizada e (b) imediata adição na mistura na betoneira..... | 53 |
| Figura 24 – Características dos corpos de prova de acabamento | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 25 – Execução do acabamento sobre a base: (a) suporte para execução dos acabamentos e (b) acabamento executado | 55 |
| Figura 26 – Plaquinha sem manchamento, com manchamentos de Rodamina B e com manchamentos de fuligem..... | 56 |
| Figura 27 – Manchamento com fuligem: (a) aplicação da fuligem, (b) aspersão de água deionizada após 24 horas e (c) espalhamento final com pincel sobre superfície úmida | 57 |
| Figura 28 – Manchamento de Rodamina B: (a) amostras imersas em solução aquosa de Rodamina B e (b) secagem das amostras à temperatura ambiente..... | 58 |
| Figura 29 – Amostras expostas ao ambiente urbano de Porto Alegre/RS..... | 59 |
| Figura 30 – Ensaio de absorção por capilaridade para 6 amostras de 3 combinações de acabamento | 61 |
| Figura 31 – Ensaio para determinação do coeficiente de absorção por imersão parcial | 62 |
| Figura 32 – Câmara de Permeabilidade ao Vapor: (a) representação esquemática da câmara do ensaio, (b) vista superior da câmara e (c) copo teste com a amostra..... | 64 |
| Figura 33 – Vista superior da câmara de iluminação, com o furo onde a câmara é encaixada | 65 |
| Figura 34 – Placa de argamassa com o molde para as medições com o espectrofotômetro | 66 |
| Figura 35 – Sólido do espaço de cores $L^*a^*b^*$ | 67 |
| Figura 36 – Índice de consistência para as argamassas de acabamentos no estado fresco..... | 69 |
| Figura 37 – Efeito isolado, em relação ao índice de consistência, das adições de: (a) TiO_2 e (b) hidrofugante..... | 70 |
| Figura 38 – Efeito da combinação dos fatores de adição de TiO_2 e de adição de hidrofugante em relação ao índice de consistência | 71 |
| Figura 39 – Densidade de massa para as argamassas de acabamentos no estado fresco | 72 |
| Figura 40 – Teor de ar incorporado para as argamassas de acabamentos no estado fresco | 72 |
| Figura 41 – Efeito isolado da adição de TiO_2 para a resistência à compressão | 75 |
| Figura 42 – Módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas de acabamentos..... | 76 |
| Figura 43 – Efeito isolado, em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, das adições de: (a) TiO_2 e (b) hidrofugante..... | 77 |
| Figura 44 – Absorção de água aos 10 e 90 minutos para as argamassas de acabamentos | 79 |
| Figura 45 – Efeito isolado da adição de hidrofugante em relação ao coeficiente de capilaridade | 80 |
| Figura 46 – Efeito combinado, em relação ao coeficiente de capilaridade, das adições de: (a) TiO_2 e (b) hidrofugante..... | 81 |

| | |
|--|-----|
| Figura 47 – Efeito isolado da adição de TiO ₂ em relação ao coeficiente de absorção por imersão parcial | 83 |
| Figura 48 – Efeito combinado, em relação ao coeficiente de absorção, das adições de: (a) TiO ₂ e (b) hidrofugante | 83 |
| Figura 49 – Absorção de água ao longo de 24 h para as argamassas de acabamentos..... | 84 |
| Figura 50 – Permeabilidade ao vapor média para as argamassas compostas por base e acabamento | 86 |
| Figura 51 – Efeito isolado da adição de TiO ₂ em relação à permeabilidade ao vapor de água | 87 |
| Figura 52 – Permeabilidade ao vapor média para as argamassas de acabamentos | 87 |
| Figura 53 – Comparação entre a cor original com a cor das plaquinhas sem manchamentos nos dias 1 e 28 de exposição: (a) 0T0H, (b) 0T2H, (c) 0T8H, (d) 10T0H, (e) 10T2H e (f) 10T8H | 89 |
| Figura 54 – Comparação entre os dias 1 e 28 de exposição das plaquinhas com fuligem: (a) 0T0H, (b) 0T2H, (c) 0T8H, (d) 10T0H, (e) 10T2H e (f) 10T8H | 90 |
| Figura 55 – Variação das plaquinhas manchadas com Rodamina B: dias 1, 5 e 7 de exposição ao ambiente natural: (a) 0T0H, (b) 0T2H, (c) 0T8H, (d) 10T0H, (e) 10T2H e (f) 10T8H | 91 |
| Figura 56 – Amostras manchadas com Rodamina B nos dias 1, 2, 5 e 7 de exposição | 92 |
| Figura 57 – Efeito isolado do tipo de manchamento em relação à variação de cor ao longo do tempo | 94 |
| Figura 58 – Valores individuais (por CP por manchamento) e médios de ΔE entre o dia 1 e o dia 28 de exposição por combinação de argamassa. | 95 |
| Figura 59 – Efeito isolado do tipo de manchamento em relação à variação da luminosidade ao longo do tempo | 96 |
| Figura 60 – Valores médios da variação da coordenada L* de acordo com as combinações de argamassa para os dias 1 e 28 de exposição. | 97 |
| Figura 61 – Valores médios de ΔE entre o dia 1 e o dia 5 de exposição por combinação de argamassa..... | 98 |
| Figura 62 – Efeito isolado da adição do TiO ₂ em relação à variação de cor ao longo do tempo entre o dia 1 e o dia 5 de exposição | 99 |
| Figura 63 – Efeito isolado da adição do hidrofugante em relação à variação de cor ao longo do tempo entre o dia 1 e o dia 5 de exposição | 99 |
| Figura 64 – Modelo da formação da matriz de cimento e polímero..... | 101 |
| Figura 65 – Placas com manchamentos de fuligem – Placas nº 1 | 121 |
| Figura 66 – Placas com manchamentos de fuligem – Placas nº 2 | 122 |

| | |
|---|-----|
| Figura 67 – Placas com manchamentos de fuligem – Placas nº 3..... | 123 |
| Figura 68 – Placas com manchamentos de Rodamina B – Placas nº 4 | 124 |
| Figura 69– Placas com manchamentos de Rodamina B – Placas nº 5 | 125 |
| Figura 70 – Placas com manchamentos de Rodamina B – Placas nº 6 | 126 |
| Figura 71 – Placas sem manchamentos – Placas nº 7..... | 127 |
| Figura 72 – Placas sem manchamentos – Placas nº 8..... | 128 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Características da argamassa de base | 47 |
| Tabela 2 – Características da argamassa de acabamento | 49 |
| Tabela 3 – Características do aditivo hidrofugante | 50 |
| Tabela 4 – Denominação das argamassas de acordo com o teor de TiO_2 e de hidrofugante ... | 52 |
| Tabela 5 – Consumo de materiais utilizados e relação água/cimento das argamassas..... | 56 |
| Tabela 6 – Índices de consistência médios para as diferentes argamassas de acabamento e de base no estado fresco | 69 |
| Tabela 7 – ANOVA para o índice de consistência..... | 69 |
| Tabela 8 –Densidades de massa aparente (kg/m^3) médias para as diferentes argamassas de acabamento e de base aos 28 dias de idade | 73 |
| Tabela 9 – ANOVA para a densidade de massa aparente | 73 |
| Tabela 10 – Resistências à tração na flexão e à compressão axial médias para as diferentes argamassas de acabamento e de base aos 28 dias de idade | 74 |
| Tabela 11 – ANOVA para a resistência à tração na flexão | 74 |
| Tabela 12 – ANOVA para a resistência à compressão axial..... | 74 |
| Tabela 13 –Módulos de elasticidade dinâmico médios para as diferentes argamassas de acabamento e de base aos 28 dias de idade | 76 |
| Tabela 14 – ANOVA para o módulo de elasticidade dinâmico | 77 |
| Tabela 15 – Absorção por capilaridade aos 10 e 90 minutos e o coeficiente de capilaridade médios para as diferentes argamassas de acabamento e de base aos 28 dias de idade..... | 79 |
| Tabela 16 – ANOVA para o coeficiente de capilaridade | 80 |
| Tabela 17 – Coeficientes de absorção de água por imersão parcial médios para as diferentes argamassas de acabamento e de base aos 28 dias de idade | 82 |
| Tabela 18 – ANOVA para o coeficiente de absorção de água por imersão parcial | 82 |
| Tabela 19 – Permeabilidade ao vapor, do fator de resistência e da espessura de ar equivalente médios para as diferentes argamassas de acabamento aos 28 dias de idade | 85 |
| Tabela 20 – ANOVA para a permeabilidade ao vapor de água das amostras compostas por base e acabamento | 86 |
| Tabela 21 – ANOVA para a permeabilidade ao vapor de água das amostras de acabamento . | 87 |
| Tabela 22 – ANOVA para o ensaio colorimétrico com relação aos valores de ΔE | 93 |
| Tabela 23 – ANOVA para o ensaio colorimétrico com relação aos valores médios de ΔL^* | 96 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 24 – ANOVA para o ensaio colorimétrico com relação aos valores de ΔE entre o dia 1 e 28 de exposição..... | 97 |
| Tabela 25 – ANOVA para o ensaio colorimétrico com relação aos valores de ΔE entre o dia 1 e o dia 5 de exposição..... | 98 |
| Tabela 26 – Índice de consistência (mm) | 112 |
| Tabela 27 – Massa específica (g/cm^3) | 112 |
| Tabela 28 – Densidade de massa no estado fresco (kg/m^3) e teor de ar incorporado (%)..... | 112 |
| Tabela 29 – Densidade de massa aparente (kg/m^3) | 114 |
| Tabela 30 – Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) | 114 |
| Tabela 31 – Resistência à tração na flexão (MPa)..... | 115 |
| Tabela 32 – Resistência à compressão na flexão (MPa) | 116 |
| Tabela 33 – Absorção de água por capilaridade (g/cm^2) e coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) | 117 |
| Tabela 34 – Coeficiente de absorção de água ISO 15148:2016 | 117 |
| Tabela 35 – Permeabilidade ao vapor de água | 118 |
| Tabela 36 – Dados colorimétricos médios obtidos por meio do espectrofotômetro | 130 |
| Tabela 37 – Dados meteorológicos do período de exposição | 134 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c – Relação água/cimento

ANOVA – Análise de variância

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

EE – Escola de Engenharia

ISO – *International Organization for Standardization*

LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

NBR – Norma Técnica Brasileira

NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Construção

SVVE – Sistema de Vedação Vertical Externa

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UV – Ultravioleta

VOCs – Compostos orgânicos voláteis

LISTA DE FÓRMULAS QUÍMICAS

CaCl_2 – Cloreto de cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de cálcio

$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ – Nitrato de magnésio

NO_x – Óxidos de nitrogênio

SO_x – Óxidos de enxofre

TiO_2 – Dióxido de titânio

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 19 |
| 2 | DIRETRIZES DO TRABALHO..... | 21 |
| 2.1 | JUSTIFICATIVA | 21 |
| 2.2 | OBJETIVOS DO TRABALHO..... | 22 |
| 2.2.1 | Objetivo Principal | 22 |
| 2.2.2 | Objetivos Específicos..... | 22 |
| 2.3 | LIMITAÇÕES E DELIMITAÇÕES | 23 |
| 2.4 | DELINEAMENTO | 23 |
| 3 | REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA EM FACHADAS | 25 |
| 3.1 | REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA | 26 |
| 3.2 | MANCHAMENTOS | 28 |
| 4 | DIÓXIDO DE TITÂNIO | 31 |
| 4.1 | CARACTERÍSTICAS DO TIO ₂ | 31 |
| 4.1.1 | Fotocatálise..... | 32 |
| 4.2 | APLICAÇÕES EM MATERIAIS CONSTRUTIVOS..... | 35 |
| 5 | ESTANQUEIDADE À ÁGUA..... | 39 |
| 5.1 | ADITIVO HIDROFUGANTE | 41 |
| 6 | PROGRAMA EXPERIMENTAL | 44 |
| 6.1 | METODOLOGIA | 44 |
| 6.2 | MATERIAIS UTILIZADOS | 46 |
| 6.2.1 | Argamassas | 46 |
| 6.2.1.1 | Argamassa de Base..... | 46 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 6.2.1.2 | Argamassa de Acabamento | 47 |
| 6.2.2 | Aditivo hidrofugante | 49 |
| 6.2.3 | Dióxido de Titânio | 50 |
| 6.2.4 | Água | 51 |
| 6.3 | PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS | 51 |
| 6.3.1 | Métodos de manchamentos e exposição..... | 56 |
| 6.4 | ENSAIOS REALIZADOS | 59 |
| 6.4.1 | Ensaio de absorção de água por capilaridade (NBR 15259:2005) | 60 |
| 6.4.2 | Determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial (EN ISO 15148:2016)..... | 61 |
| 6.4.3 | Ensaio de permeabilidade ao vapor de água..... | 62 |
| 6.4.4 | Ensaio de análise colorimétrica | 65 |
| 7 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 68 |
| 7.1 | CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO | 68 |
| 7.1.1 | Índice de consistência | 68 |
| 7.1.2 | Densidade de massa e teor de ar incorporado | 71 |
| 7.2 | CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO | 72 |
| 7.2.1 | Densidade de massa aparente..... | 73 |
| 7.2.2 | Resistência à tração na flexão e à compressão | 73 |
| 7.2.3 | Módulo de elasticidade dinâmico | 75 |
| 7.2.4 | Absorção de água por capilaridade | 78 |
| 7.2.5 | Determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial..... | 81 |
| 7.2.6 | Permeabilidade ao vapor | 85 |
| 7.3 | REGISTRO FOTOGRÁFICO | 88 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.3.1 | Amostras sem manchamentos | 88 |
| 7.3.2 | Amostras com manchamento de Fuligem | 89 |
| 7.3.3 | Amostras com manchamento de Rodamina B | 90 |
| 7.4 | ENSAIO COLORIMÉTRICO | 92 |
| 7.4.1 | Análise geral da variação de cor ao longo do tempo (ΔE) | 93 |
| 7.4.2 | Análise geral da variação da coordenada L^* (ΔL^*) | 95 |
| 7.4.3 | Análise das amostras com manchamento de Rodamina B | 97 |
| 8 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 102 |
| 8.1 | Conclusões | 102 |
| | REFERÊNCIAS | 105 |
| | APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO FRESCO | 111 |
| | APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO | 113 |
| | APÊNDICE C – REGISTRO FOTOGRÁFICO DOS CORPOS DE PROVA EXPOSTOS AO AMBIENTE NATURAL | 120 |
| | APÊNDICE D – DADOS DA ANÁLISE COLORIMÉTRICA OBTIDOS POR MEIO DO ESPECTROFOTÔMETRO | 129 |
| | ANEXO A – DADOS METEOROLÓGICOS DO PERÍODO DE EXPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA AO AMBIENTE NATURAL | 133 |

1 INTRODUÇÃO

As fachadas das edificações apresentam a função de proteção da estrutura e dos elementos de vedação contra os agentes de degradação, devendo apresentar um adequado comportamento durante a sua vida útil. De acordo com a NBR 15575-4 (ABNT, 2021), alguns requisitos necessários para os sistemas de revestimento externo são: estanqueidade, desempenho térmico, acústico e lumínico, além das exigências de durabilidade e manutenibilidade. Ainda, segundo Madureira *et al.* (2017), as fachadas são determinantes do desempenho da edificação como um todo, além de definirem a aparência das construções e influenciarem nas condições de conforto interno.

Uma das principais manifestações patológicas observadas nos revestimentos das construções são os manchamentos, provenientes da ação da umidade em excesso nos materiais, mas também devido ao depósito de sujidades (CASARIN, 2019). As partículas de sujeira são oriundas da poluição ambiental presente na atmosfera, principalmente devido à combustão incompleta de combustíveis, formando fuligem.

Com o intuito de reduzir os manchamentos e possíveis manifestações patológicas, aumentando a durabilidade dos revestimentos e tornando as manutenções menos recorrentes e com menores custos, têm-se estudado a aplicação de diferentes métodos em argamassas, sendo dois deles: a utilização de materiais hidrofugantes com vista a reduzir a absorção de água, evitando o surgimento de manifestações patológicas, e o emprego de materiais fotocatalíticos com o propósito de criar argamassas autolimpantes.

Os aditivos hidrofugantes são materiais que podem ser adicionados na mistura das argamassas e agem sobre a estrutura dos poros do material, minimizando a absorção por capilaridade, mas permitindo a passagem de vapor de água (BIEHL *et al.*, 2018). Segundo Falchi *et al.* (2015) uma das principais vantagens de utilizar um hidrofugante em adição à mistura é que a sua proteção contra a água se manteria mesmo na presença de fissuras ou desgaste da superfície.

Já os materiais fotocatalíticos, como o dióxido de titânio (TiO_2), apresentam a capacidade de serem ativados pela radiação solar, realizando, então, reações de oxirredução que levam à autolimpeza da superfície por meio da degradação das partículas adsorvidas e, por apresentar característica hidrofílica na presença da radiação ultravioleta, o TiO_2 proporciona uma molhagem completa da superfície em períodos de chuva, resultando na remoção das impurezas (CASARIN, 2019). Desta forma, a sua aplicação permite a degradação de compostos orgânicos e inorgânicos adsorvidos ao material, que são prejudiciais aos materiais cimentícios, além de

apresentar a capacidade de purificação do ar de poluentes como os óxidos de nitrogênio (NO_x), provenientes da exaustão de automóveis e, ainda, degradar corantes orgânicos e algas (SMITS *et al.*, 2013; GUO *et al.* 2018). Além disso, há ainda, propriedades antiembaçamento e antimicrobiana (GUO *et al.*, 2015; GUERRA, 2018)

Com base nas vantagens e nas características de aplicação de hidrofugantes e do TiO_2 em argamassas, percebe-se a sua relevância para a durabilidade dos revestimentos. Assim, este estudo tem a finalidade de analisar a influência da adição de diferentes teores de um tipo de hidrofugante e de TiO_2 em uma argamassa industrializada comercializada em pó, avaliando as suas características de desempenho, permeabilidade e a sua eficiência autolimpante. Portanto, busca-se analisar o desempenho das argamassas quanto à absorção de água e à permeabilidade ao vapor (características importantes para a compreensão da ação do hidrofugante) e avaliar a capacidade autolimpante do material cimentício frente a dois tipos de manchamentos quando exposto ao ambiente urbano da cidade de Porto Alegre/RS. Para isso, foram confeccionadas argamassas com materiais disponíveis no mercado de modo a compreender o seu real comportamento.

2 DIRETRIZES DO TRABALHO

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho estão descritas a seguir.

2.1 JUSTIFICATIVA

A escolha deste tema de pesquisa originou-se a partir da demanda de uma empresa da cidade de Porto Alegre/RS que desejava construir uma fachada com acabamento final de argamassa branca que apresentasse maior vida útil e que requeresse menores manutenções. Além disso, também desejava-se eliminar o uso de tinta, o que reduziria custos e manutenções, além de eliminar uma etapa construtiva e contribuir para a sustentabilidade, já que os produtos utilizados na pintura das edificações contribuem para a poluição atmosférica, pois emitem compostos orgânicos voláteis (VOCs) (UEMOTO *et al.*, 2006).

Segundo Oliveira, C. (2013), a partir da inspeção de fachadas de 135 edificações do centro de Porto Alegre, constatou-se que 66% delas possuíam revestimento de argamassa e que a manifestação patológica mais comumente encontrada foram os manchamentos devido à percolação da água e à umidade. Devido a isso, o emprego de materiais hidrofugantes pode se tornar muito importante e pode proporcionar uma propriedade necessária para os revestimentos externos conforme a NBR 13749 (ABNT, 2013), auxiliando na diminuição da ação degradante da água nos revestimentos de fachadas e reduzindo as manifestações patológicas.

Ainda, pesquisas anteriores realizadas no grupo de pesquisa vinculado ao NORIE/UFRGS já demonstraram resultados interessantes do uso do dióxido de titânio (TiO_2) com vista a obter uma superfície autolimpante, de forma que sua aplicação real se torna muito atraente. Austria (2015) analisou os efeitos do TiO_2 em argamassas de cimento branco, concluindo que, quanto maior a porcentagem de adição do dióxido de titânio, mais claras ficaram as argamassas, desde que o manchamento não fosse excessivo, barrando a exposição à radiação UV. Treviso (2016) avaliou a eficiência autolimpante de argamassas em diferentes posicionamentos, verificando a degradação de manchamentos inorgânicos principalmente nas orientações com maior incidência da radiação solar. Já Casarin (2019) analisou a ação autolimpante em diferentes tipos de acabamentos superficiais e demonstrou que o acabamento friccionado apresentou maior eficiência de autolimpeza quando comparado com acabamento rugoso ou rústico.

Sabe-se que a estética das fachadas representa um impacto no valor de uma edificação e que sujidades, manchamentos ou demais manifestações patológicas reduzem o desempenho do

revestimento, sendo de extrema importância a realização de manutenções para manter a sua durabilidade. Desta forma, o estudo de materiais que promovam o aumento da durabilidade das fachadas é de extrema importância, inclusive trazendo impactos positivos sobre o meio ambiente na questão da sustentabilidade e, ainda, com capacidade de purificação do ar, além de reduzir custos de manutenção, tornando-as mais espaçadas. Assim, verifica-se a relevância desta pesquisa para o conhecimento de alguns dos materiais disponíveis no mercado e dos seus comportamentos para futuras aplicações reais.

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos deste trabalho estão apresentados nos itens seguintes, sendo classificados em objetivo principal e objetivos específicos.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a eficiência da autolimpeza e os impactos na permeabilidade à água de uma argamassa industrializada de acabamento externo de cor branca com a adição de dióxido de titânio (TiO_2) e com a adição de um aditivo hidrofugante comercial.

2.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) analisar a influência do aditivo hidrofugante e do TiO_2 na permeabilidade ao vapor das argamassas;
- b) analisar a influência do aditivo hidrofugante e do TiO_2 na absorção de água por capilaridade das argamassas;
- c) analisar a influência do aditivo hidrofugante e do TiO_2 no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas;
- d) analisar a influência do aditivo hidrofugante e do TiO_2 na resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas;
- e) verificar a capacidade autolimpante de argamassas com dois tipos de manchamentos superficiais (fuligem e Rodamina B), expostas ao intemperismo natural.

2.3 LIMITAÇÕES E DELIMITAÇÕES

As limitações desta pesquisa estão descritas a seguir:

- a) utilização de uma argamassa industrializada ensacada em pó, de acabamento externo com cimento de cor branca;
- b) utilização de um aditivo hidrofugante comercial;
- c) utilização de um teor de dióxido de titânio (10% sob a massa de cimento) de estrutura cristalina anatase.

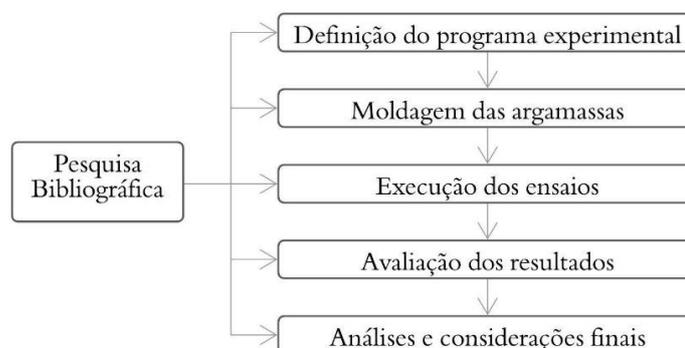
São delimitações do trabalho:

- a) utilização do TiO_2 como adição à argamassa;
- b) avaliação de dois tipos de manchamentos: a fuligem proveniente do cano de descarga de veículos à diesel e o corante orgânico Rodamina B;
- c) exposição dos corpos de prova ao ambiente urbano da cidade de Porto Alegre/RS – Brasil;
- d) exposição das amostras na orientação solar norte, pois possui maior incidência de radiação solar;
- e) exposição das amostras a uma inclinação de 45° .

2.4 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado conforme as etapas representadas na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



Fonte: própria da autora.

A pesquisa bibliográfica foi parte fundamental de todas as etapas de desenvolvimento do trabalho. Foi por meio dela que se obteve conhecimento sobre conceitos e definições sobre o tema e sobre a execução dos ensaios e os métodos de avaliação. A partir da leitura de dissertações, artigos, normas e arquivos técnicos foi possível adquirir o embasamento teórico necessário para a execução do trabalho. Foram pesquisadas e estudadas bibliografias sobre temas como revestimentos de argamassa, patologia das fachadas, comportamento das argamassas com relação à água e a utilização de dióxido de titânio e de aditivos hidrofugantes em argamassas.

O programa experimental foi definido com o propósito de determinar as variáveis a serem estudadas, os materiais utilizados e os métodos de ensaio mais adequados para a avaliação dos objetivos da pesquisa. Dessa forma, o trabalho é desenvolvido de forma planejada e cuidadosa, seguindo as normas e metodologias mais adequadas.

A etapa seguinte foi a moldagem das diferentes amostras de cada traço ensaiado. Iniciou-se com a moldagem da argamassa de base e, após a cura de 28 dias, foram executadas as moldagens das combinações da argamassa de acabamento branca. A produção das argamassas foi realizada em conjunto com os ensaios no estado fresco e, após os 28 dias de cura, foram executados os ensaios no estado endurecido, conforme as normas vigentes.

Após a produção e a caracterização dos materiais por meio dos ensaios, foi feita a avaliação dos resultados. Esta é a parte essencial do trabalho, pois através das análises dos dados obtidos, pode-se obter respostas sobre o comportamento das argamassas estudadas e a influência do dióxido de titânio e do aditivo hidrofugante.

Na última etapa do trabalho, de análise e considerações finais, são apresentadas as conclusões da pesquisa, buscando responder os objetivos definidos e apresentar informações sobre qual argamassa demonstra melhor desempenho dentro das condições estudadas.

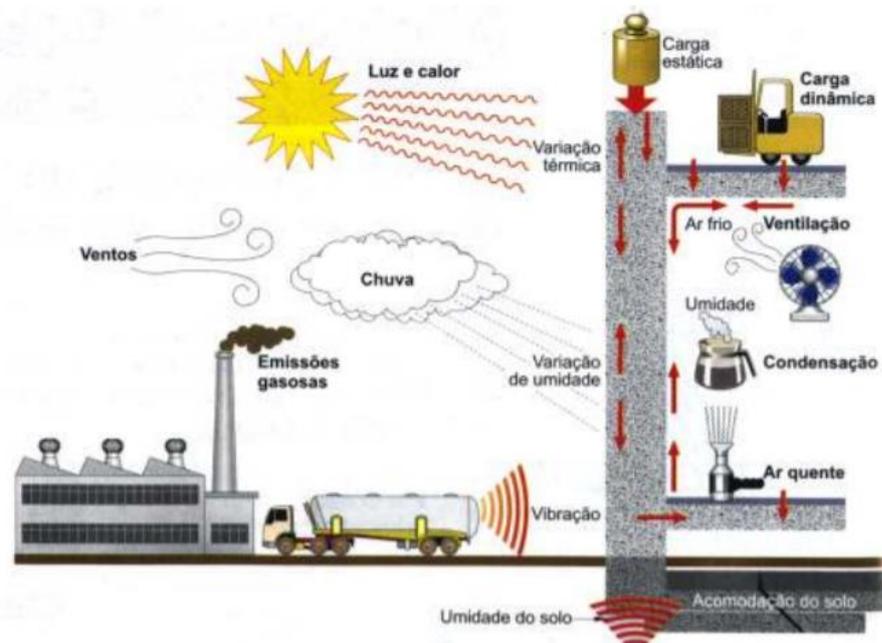
3 REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA EM FACHADAS

As fachadas fazem parte da envoltória de uma edificação e funcionam como a principal barreira de proteção do edifício contra os agentes de degradação (SILVA, 2014; MADUREIRA *et al.*, 2017; PIAZZAROLLO, 2019). Além de servir como elemento de proteção, as fachadas também apresentam grande importância quanto à aparência da edificação e quanto ao seu nível de conforto interno, sendo um elemento construtivo fundamental para o desempenho do edifício (MADUREIRA *et al.*, 2017).

Segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), o conceito de desempenho corresponde ao adequado comportamento em uso da edificação como um todo e de suas partes ao longo da sua vida útil, que equivale ao tempo em que o edifício e seus sistemas funcionam de acordo com os níveis de desempenho projetados e construídos, com a correta execução das manutenções previstas. Assim, a norma NBR 15575-4 (ABNT, 2021) estabelece os requisitos para os sistemas de vedações verticais externas (SVVE), as fachadas, no que se refere ao desempenho estrutural, térmico, acústico e lumínico, na segurança contra incêndio e no uso e na operação, na saúde, na estanqueidade, na durabilidade e manutenibilidade, no conforto antropodinâmico e na adequação ambiental. Desta forma, os revestimentos externos devem conseguir manter suas características e seu nível mínimo de desempenho frente aos agentes de degradação do meio em que estão inseridos durante o período de vida útil.

Por estarem diretamente expostas ao ambiente urbano, as fachadas se deterioram devido ao envelhecimento natural dos materiais e, também, devido à presença de diversos agentes de degradação. Os danos são intensificados de acordo com a localização do edifício, a orientação solar, as condições climáticas e do meio em que estão inseridas, além do método construtivo utilizado, a qualidade da sua execução e dos materiais, técnicas e equipamentos empregados (AUSTRIA, 2015; CASARIN, 2019). Estes agentes agressivos podem ser de diferentes naturezas, conforme apresentado na Figura 2, e afetam negativamente os materiais, resultando em alterações nas suas características e provocando perda do seu desempenho (SILVA, 2014).

Figura 2 – Agentes de degradação das fachadas.



Fonte: BONIN *et al.*, 1999 *apud* SEGAT, 2005.

3.1 REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA

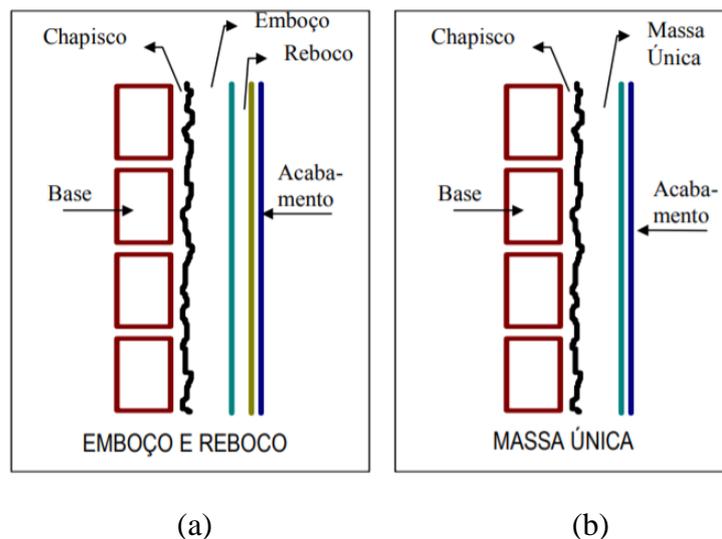
Os revestimentos de argamassa são muito utilizados na construção civil do Brasil (FERREIRA, 2010; OLIVEIRA, C. 2013). O motivo pode ser devido a vários fatores como: simplicidade de produção e execução, baixo custo, disponibilidade dos materiais componentes, moldabilidade, possibilidade de executar detalhes e texturas diferentes, além da aceitabilidade dessa solução pelos usuários e o conhecimento de execução pela mão de obra (RUDUIT, 2009).

Essa solução pode ser executada na forma tradicional, que está praticamente em desuso, com 2 camadas de argamassa (emboço e reboco como na Figura 3 - a), ou como camada única (Figura 3 – b). Primeiramente tem-se a base de revestimento que é composta pelo sistema de vedação vertical como alvenaria ou concreto, servindo como suporte. Após, é executado o chapisco, que possui a função de preparo da base, permitindo maior aderência do revestimento à base e sendo de características homogêneas de baixa absorção. Esta, é seguida da camada de regularização, conhecida como emboço, que regulariza as imperfeições da primeira camada e, ainda, assegura a impermeabilização. Por fim, o revestimento de argamassa é finalizado com a execução do reboco (segunda camada) que dá o acabamento estético final e protege a edificação (SEGAT, 2005; OLIVEIRA, C. 2013; NBR 13755:2017).

Ainda é possível realizar o revestimento de argamassa em camada única, que é constituída, apenas de chapisco e emboço. Dessa forma, o emboço tem a função de regularizar

a base e pode ser executado de diferentes formas (sarrafeado, desempenado, camurçado, chapiscado) de acordo com o acabamento superficial final desejado (OLIVEIRA, C. 2013; CASARIN, 2019). Posteriormente, em ambos os casos, é executada a pintura que é a camada de acabamento. Ainda, pode-se ter a tinta incorporada ao revestimento, sendo aplicado em uma só camada, resultando no sistema de revestimento conhecido por monocamada.

Figura 3 – Elementos constituintes dos revestimentos de argamassa: (a) Emboço e reboco e (b) Massa única



Fonte: MACIEL *et al.*, 1998.

Conforme mencionado anteriormente, o revestimento de fachadas em argamassa também possui as funções de: proteger o edifício (a alvenaria e a estrutura) da ação dos agentes agressivos, auxiliar no desempenho da edificação (como no isolamento termoacústico, na estanqueidade à água, na segurança ao fogo e na resistência ao desgaste) e contribuir para a estética final, tendo um papel importante na configuração das paisagens urbanas (PETRUCCI, 2000; CARASEK¹, 2007 *apud* SILVA, 2021). Inclusive, os materiais utilizados nas fachadas causam um impacto significativo no balanço térmico urbano, pois absorvem e dissipam a radiação solar e podem aumentar a temperatura ambiente, tanto nas áreas internas de um edifício, quanto nos espaços abertos (SANTAMOURIS *et al.*, 2011).

Para que o revestimento consiga cumprir as suas funções de forma satisfatória é necessário que os materiais sejam escolhidos de forma adequada para cada situação de aplicação e, também, que a técnica de execução e os equipamentos utilizados sejam apropriados para garantir a qualidade final do revestimento (CASARIN, 2019). A norma NBR 13749

¹ CARASEK, H. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. IBRACON. São Paulo, 2007.

(ABNT, 2013) determina algumas especificações para os revestimentos de argamassas, mas não apresenta recomendações para as condições de exposição ou aplicação. Algumas condições detalhadas na norma (NBR 13749:2013) e que devem ser satisfeitas são:

- a) os materiais e a sua dosagem devem ser compatíveis com o acabamento e o ambiente de exposição;
- b) se o revestimento for colorido, os pigmentos devem resistir à ação da radiação UV e à alcalinidade das argamassas;
- c) o revestimento deve ter resistência mecânica decrescente ou uniforme, a partir da camada em contato com a base até o acabamento final;
- d) em caso de revestimento de argamassa externo aparente e sem pintura, este deve ter propriedade hidrofugante;
- e) em aplicações externas, o revestimento deve resistir às variações de temperatura e umidade do meio;
- f) o revestimento deve ter textura uniforme e sem imperfeições como cavidades, fissuras, manchas e eflorescências;
- g) espessura admissível para o revestimento de paredes externas entre 20 e 30 mm;

De forma a obter o adequado comportamento do revestimento de argamassa, algumas propriedades são importantes, como: aderência, capacidade de absorver deformações, resistência mecânica e ao desgaste, permeabilidade à água e durabilidade (CARASEK, 2007 *apud* SILVA, 2021; GROFF, 2011). Segundo CASARIN (2019), a porosidade e a absorção de água são fatores que impactam a durabilidade dos revestimentos, pois a porosidade afeta tanto a absorção, que deve ser relativamente lenta, quanto a secagem da superfície. Assim, a durabilidade é uma das principais características para que o revestimento consiga cumprir as suas funções durante todo o período de vida útil, garantindo adequado desempenho e segurança.

3.2 MANCHAMENTOS

Como apresentado anteriormente na Figura 2, os agentes de degradação que atuam nas edificações podem ser tanto de origem externa quanto interna. Além disso, segundo a NBR 13749 (ABNT, 2013), as manifestações patológicas observadas no acabamento decorativo de revestimentos podem ser provenientes do próprio revestimento de argamassa, sendo recomendado, então, a realização de inspeções para o controle da qualidade.

Dentre os fatores de degradação externos das fachadas, os principais são os agentes climáticos, como chuva, radiação solar e vento (GASPAR e BRITO, 2008; PIAZZAROLLO, 2019). A variação de intensidade e tempo de exposição das fachadas à radiação solar e à variação térmica decorrente disso pode resultar em estresse termomecânico. Este efeito é diretamente dependente das condições climáticas do meio e da orientação das fachadas das edificações. Já as chuvas podem causar molhamento e variações mecânicas dos revestimentos, causando fissuras, infiltrações e choques térmicos (PIAZZAROLLO, 2019). Também são responsáveis por molhar a superfície da fachada e com o escoamento vertical das gotas de água, pode-se lavar ou depositar a sujeira na superfície (GASPAR e BRITO, 2008). Além disso, a degradação de fachadas também ocorre devido à combinação dos agentes climáticos com os agentes biológicos e os poluentes atmosféricos

Assim, uma das principais manifestações patológicas verificadas nos revestimentos das edificações são as manchas ou manchamentos, tendo origem tanto na umidade em excesso quanto no depósito superficial de sujidades (SOUSA *et al.*, 2005). A ação da água pode causar manchas por aumentar a adesão de partículas sobre o material úmido, criando, inclusive, manchas nos locais de caminho preferencial da água nas fachadas (GROFF, 2011), além de ser um fator de alteração química e mecânica dos revestimentos devido à dissolução e transporte de poluentes e sais solúveis (cloretos, sulfatos, nitratos) através da porosidade dos materiais. Estes sais são cristalizados e depositados nos materiais e, quando sofrem expansão, podem gerar fissuras e até descolamento dos revestimentos (SOUSA *et al.*, 2005).

As sujidades são oriundas da poluição atmosférica, com poluentes de origem industrial (devido à combustão incompleta de combustíveis em indústrias, de ordem doméstica ou, ainda, no transporte através dos motores de veículos a diesel e em sistemas de aquecimento) ou de ordem natural, com compostos de origem biológica (bactérias, fungos, algas, etc) e minerais (GROFF, 2011; DIAMANTI *et al.*, 2013; DE LA ROSA, *et al.*, 2017; CASARIN, 2019). Partículas de carbono e de poluentes orgânicos como PAHs (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) oriundos da combustão incompleta compõem a fuligem que fica dispersa na atmosfera e se deposita em superfícies. Diamanti *et al.* (2015) afirmam, que a maior causa de manchas e da variação de cor das fachadas é devido à acumulação de fuligem proveniente de poluentes atmosféricos, pois esta pode se dissolver em água e penetrar nos poros dos materiais, alterando a aparência da fachada, degradando-a e reduzindo a refletância solar.

Para reduzir a possibilidade de ocorrência de manchas e aumentar a durabilidade dos revestimentos das fachadas, a norma NBR 15575 (ABNT, 2021) indica a extrema importância

da realização das manutenções preventivas para conservar as características dos revestimentos. Desta forma, faz-se a conservação do seu desempenho, já que o processo de degradação das argamassas ocorre de forma natural, devido ao seu envelhecimento, podendo ser acelerado devido à intensidade da ação dos diferentes agentes agressivos (AUSTRIA, 2015; SOUZA, 2016).

Treviso (2016) pontua que, por se tratar do componente da envoltória da edificação com uma grande área de extensão, um sistema de revestimento com defeitos implicaria em um elevado custo de manutenção e que, segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), o custo de reposição seria superior ao custo inicial, sendo que perdas no seu desempenho podem afetar outras partes do edifício. Assim, há a necessidade de buscar fachadas que se mantenham duráveis por mais tempo, com o menor esforço de manutenção e limpeza possível. Diante disso, existem diferentes métodos para minimizar o efeito dos manchamentos das fachadas, sendo abordado neste trabalho, dois de maior destaque para argamassas: a utilização de materiais fotocatalíticos e de materiais hidrofugantes.

4 DIÓXIDO DE TITÂNIO

O uso do dióxido de titânio (TiO_2) em materiais construtivos tem sido alvo de muitas pesquisas e sua aplicação tem se expandido cada vez mais devido às suas propriedades de autolimpeza, de purificação do ar de poluentes atmosféricos que ficam adsorvidos nas superfícies dos materiais como óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e compostos orgânicos voláteis (VOCs) e, também, devido às propriedades antiembaçante, antimicrobiana e anti-bioincrustante de superfícies (FUJISHIMA *et al.*, 2008; SMITS *et al.*, 2013; DIAMANTI *et al.*, 2015; GUO *et al.*, 2015; GUERRA, 2018).

Por ser um material fotocatalítico, o TiO_2 é ativado apenas pela radiação UV o que o torna um material com grande potencial de uso nos revestimentos externos das edificações, pois as fachadas possuem uma grande área superficial e estão em contato direto com a radiação solar, sendo uma ótima maneira de utilizar a energia solar abundante e as características do TiO_2 para melhorar as condições ambientais (DIAMANTI *et al.*, 2008; DIAMANTI *et al.*, 2021). Além disso, é um material que apresenta boa disponibilidade, sendo o quarto metal mais abundante do mundo, atrás, apenas, do alumínio, ferro e magnésio e, com as maiores reservas do minério presentes na China, África do Sul, Índia e Austrália (DOS SANTOS, 2010 *apud* AUSTRIA, 2015). Apresenta um custo de processamento relativamente baixo (FUJISHIMA *et al.*, 2000), mas, segundo Austria (2015), ainda resulta em um custo final mais elevado quando incorporado às argamassas.

O acúmulo de fuligem nas edificações é um importante fator para a degradação das fachadas e para a redução da sua durabilidade, pois prejudica tanto a estética da edificação quanto a sua refletância solar. Assim, materiais construtivos com TiO_2 podem auxiliar não só na despoluição do ar, mas também a manter os edifícios mais limpos, com alta refletância solar, o que reduziria a necessidade energética das edificações e melhoraria as condições de conforto internas, podendo, inclusive, mitigar os microclimas urbanos e as ilhas de calor (DIAMANTI *et al.*, 2015). Dessa forma, seria possível prolongar a durabilidade das construções e reduzir a quantidade de manutenções necessárias.

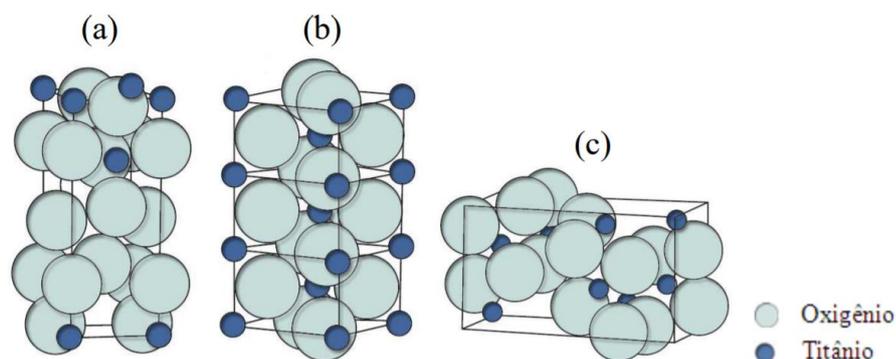
4.1 CARACTERÍSTICAS DO TiO_2

O TiO_2 é um pó branco com partículas de tamanho nanométrico com diâmetros de 10 a 100 nm. Segundo Allen *et al.* (2008), quanto menor for o tamanho das partículas maior será a

sua atividade fotocatalítica, sendo que apenas as partículas da superfície do material em contato com a radiação UV são ativadas.

É um material que apresenta três estruturas cristalinas (Figura 4): rutilo (tetragonal), anatase (tetragonal) e bruquita (ortorrômbica) (PEREIRA *et al.*, 2009). Na forma anatase, o dióxido de titânio é quimicamente estável à temperatura ambiente, não é tóxico e possui um preço razoável (DIAMANTI *et al.*, 2008), possui grandes reservas no mundo, relativo baixo custo de obtenção e processamento, além de ser útil para a fotocatalise devido ao seu poder oxidante quando exposto à radiação UV (MARANHÃO, 2009; PEREIRA *et al.*, 2009). A estrutura cristalina rutilo é muito utilizada em tintas como pigmento, pois é amplamente disponível e possui elevado índice de refração, o que promove cor branca. Já a bruquita não possui atividade fotocatalítica, não havendo interesse comercial (PEREIRA *et al.*, 2009).

Figura 4 – Estruturas cristalinas do TiO₂: (a) rutilo, (b) anatase e (c) bruquita.



Fonte: MELO, 2011 *apud* CASARIN, 2019.

4.1.1 Fotocatálise

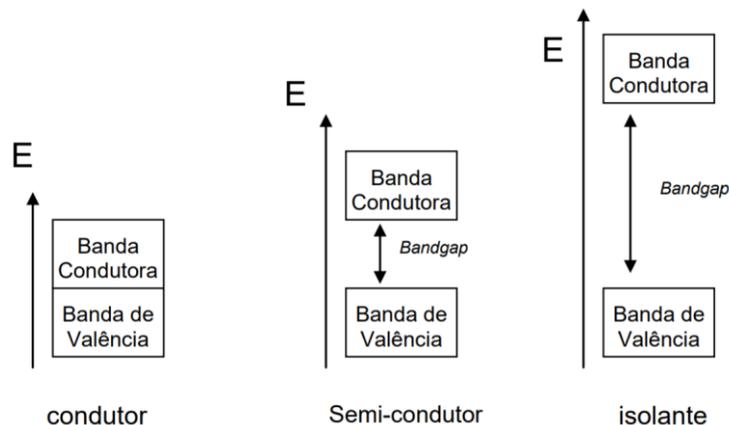
A fotocatalise é um processo eletroquímico em que, apenas pela incidência da radiação ultravioleta, ocorre a aceleração das reações de oxirredução de substâncias. Essa reação é caracterizada pela transferência de elétrons da camada de valência de um material para a camada condutora deste mesmo material, sendo que um deles sofrerá redução, ao receber os elétrons, enquanto que o outro, que perde elétrons, sofrerá oxidação (MARANHÃO, 2009).

Tal fenômeno foi descoberto na década de 1970 por um grupo de pesquisa da Universidade de Tóquio coordenado por Akira Fujishima. Pela primeira vez foi demonstrado que quando um eletrodo de TiO₂ era conectado a um eletrodo de platina e a sua superfície era exposta à luz UV, criava-se uma fotocorrente do eletrodo de platina (redução) ao eletrodo de

dióxido de titânio (oxidação), o que demonstrou que era possível decompor a molécula de água em hidrogênio e oxigênio por meio da radiação ultravioleta (FUJISHIMA *et al.*, 2000).

A condutividade elétrica dos materiais é caracterizada de acordo com a facilidade com que os elétrons da camada de valência têm de se deslocar para a camada de condução. Assim, os materiais podem ser classificados quanto a sua condutividade elétrica em três formas: isolante, semicondutor e condutor. Enquanto que um material isolante é formado por um grande *bandgap* (energia necessária para um elétron absorver e conseguir pular de camada – Figura 5) que impede a troca de elétrons, os condutores não possuem *bandgap*, havendo fácil deslocamento de elétrons. Já um material semicondutor, como o dióxido de titânio, está em uma posição intermediária, apresentando um *bandgap* de energia compatível com a energia da radiação solar ultravioleta, além de apresentar uma camada de valência incompleta (cedendo elétrons mais facilmente) (MARANHÃO, 2009).

Figura 5 – Ilustração dos orbitais moleculares dos materiais.



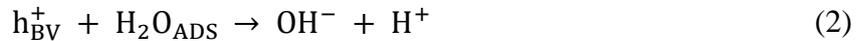
Fonte: MARANHÃO, 2009.

Dessa forma, é apresentada a seguir a sequência de reações fotocatalíticas segundo Maranhão (2009), e, na Figura 6, é apresentado um esquema da reação de oxirredução de um semicondutor.

- a) inicia-se o processo quando a superfície de um material com adição de TiO_2 recebe a incidência da radiação solar durante o dia com energia ($h\nu$) superior à energia do *bandgap* e com a consequente excitação dos elétrons que saltam de camada (da banda de valência – BV para a banda de condução – BC);



- b) dessa forma, gera-se uma lacuna na banda de valência (h^+) que possui forte poder oxidante que, em contato com a água adsorvida na superfície, consegue decompor a água em OH^- e H^+ ;



- c) essa lacuna na banda de valência (h^+) age, novamente, com o OH^- anterior para formar o radical hidroxila, que é altamente reativo;



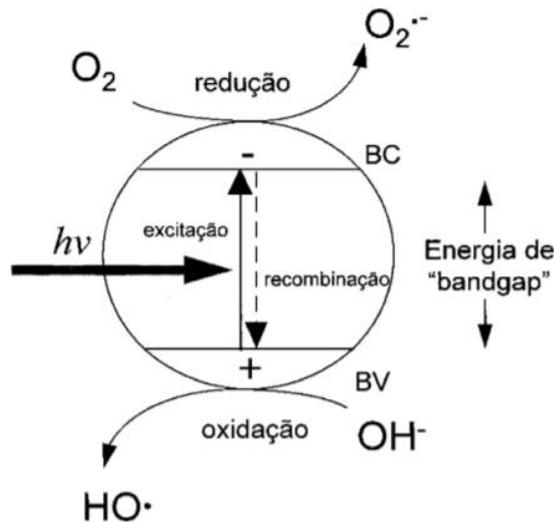
- d) concomitantemente, o elétron em excesso na banda condutora tem poder de reduzir o oxigênio e formar o ânion superóxido;



- e) este ânion superóxido reage com o H^+ da água (formado no passo b) e produz os radicais hidroperóxidos.



Figura 6 – Esquema da reação de oxirredução de semicondutores.

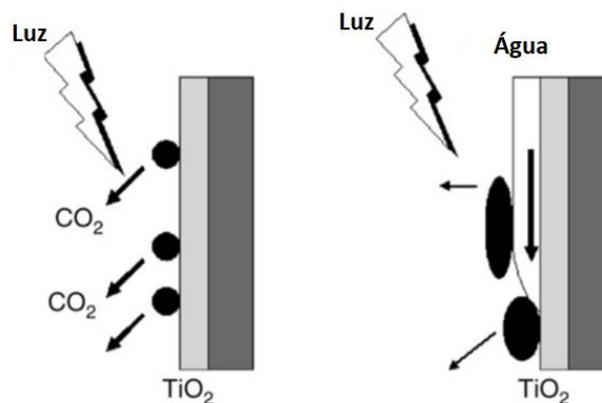


Fonte: MARANHÃO, 2009.

Assim, materiais de revestimento com a adição de dióxido de titânio possuem, de forma paralela, uma ação autolimpante e despoluente, pois os radicais formados nas reações de oxirredução são altamente reativos e permitem a degradação de compostos. Simultaneamente às reações fotocatalíticas, ocorre o aumento da hidrofiliabilidade do material na presença da radiação UV, reduzindo o ângulo de contato de um líquido na superfície, permitindo uma molhagem completa. Dessa forma, as gotas de chuva atingiriam o material e escorreriam na forma de lâmina de água, retirando as impurezas adsorvidas e, também, mantendo a efetividade

do dióxido de titânio por manter a superfície limpa e sem incrustações excessivas, que poderiam agir como barreira à absorção dos raios solares (FUJISHIMA *et al.*, 2008; MARANHÃO, 2009). A Figura 7 ilustra de forma esquemática o fenômeno de degradação de poluentes e a hidrofobicidade do material, com a formação de uma lâmina d'água.

Figura 7 – Esquema dos mecanismos de despoluição do ar e de autolimpeza de superfícies com TiO_2 devido à fotocatalise e à hidrofobicidade do material.



Fonte: adaptado de FUJISHIMA *et al.*, 2008.

4.2 APLICAÇÕES EM MATERIAIS CONSTRUTIVOS

A crescente poluição urbana, principalmente no que se refere à qualidade do ar e ao crescimento de colônias biológicas, tem acelerado a deterioração dos materiais das edificações, resultando em alterações estéticas e nas suas propriedades físico-químicas. Assim, produtos químicos para impermeabilização ou para a limpeza de materiais têm sido frequentemente aplicados nas edificações para prevenir o depósito de sujidades ou a biodeterioração. Entretanto, o envelhecimento desses produtos ou, ainda, a necessidade de reaplicá-los também pode resultar em alterações nos materiais, além de impactar o meio ambiente (POZO-ANTONIO *et al.*, 2017). Assim, com o objetivo de se desenvolver materiais mais sustentáveis e reduzir as necessidades de manutenções e possíveis impactos ambientais, materiais com novas tecnologias têm sido estudados, como a utilização do dióxido de titânio.

A capacidade autolimpante e de purificação do ar de materiais cimentícios com a adição de TiO_2 já foi testada e confirmada em diversos estudos. Quanto às aplicações reais, alguns materiais que foram desenvolvidos com TiO_2 são: blocos de pavimentação, telhas, paredes à prova de som, paredes de túneis e revestimentos (GUO *et al.*, 2018). Uma marcante utilização em grande escala do dióxido de titânio é na Catedral *Dives in Misericordia*, na cidade de Roma, na Itália, construída no ano de 2003 (Figura 8). Esta obra foi realizada com a adição do TiO_2

em concreto branco aparente e foi monitorada por vários anos, sendo que, em 2014, foi possível notar a eficiência da autolimpeza, com sujidades apenas nas juntas (AUSTRIA, 2015).

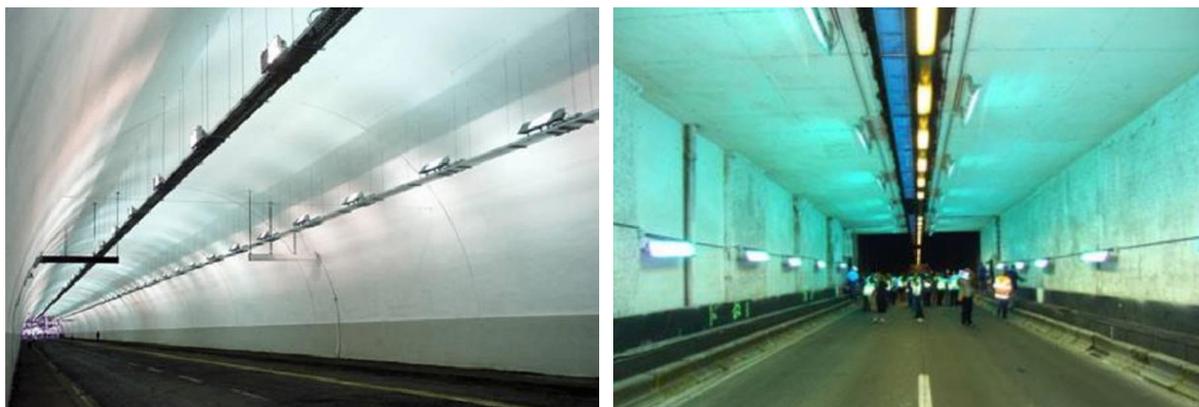
Figura 8 – Catedral *Dives in Misericordia*, em Roma: (a) em 2003 e (b) em 2014.



Fonte: (a) <http://www.arcvision.org/wp-content/uploads/2003/10/chiesa-dives-in-misericordia-2.jpg>; (b) google street view.

Outra aplicação é a reforma do Túnel “Umberto I” (Figura 9 – a), também na cidade de Roma, que ocorreu em 2007. As paredes do túnel foram cobertas com uma tinta à base de cimento com TiO_2 . O funcionamento da fotocatalise em um túnel é devido à utilização de lâmpadas fluorescentes que emitem radiação UV artificialmente, como também utilizado no túnel “Leopold II” (Figura 9 – b) em Bruxelas na Bélgica em 2011 (TREVISIO, 2016).

Figura 9 – Aplicação de TiO_2 em túneis: (a) Túnel Umberto I em Roma e (b) Túnel Leopold II em Bruxelas.



Fonte: (a) GUERRINI², 2012 e (b) BOONEN; BEELDENS, 2013 *apud* TREVISIO, 2016.

² GUERRINI, G. L.; Photocatalytic performances in a city tunnel in Rome: NO_x monitoring results. **Construction and Building Materials**, v.27, p. 165-175, 2012.

Também foi utilizado o TiO_2 na reforma da fachada do edifício Guaspari em Porto Alegre, por estar localizado no centro da cidade em um ambiente com muita poluição (PEDROLLO, 2018), apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Edifício Guaspari em 2018.



Fonte: PEDROLLO, 2018.

A partir destas aplicações pode-se verificar a ampla utilização do dióxido de titânio em materiais construtivos cimentícios de cor branca, sendo o cimento branco um material muito utilizado para fins arquitetônicos e decorativos, permitindo, também, uma infinidade de cores (CASSAR *et al.*, 2003). Sendo assim, as obras com a utilização de concreto ou argamassas de cor branca possuem um forte apelo estético, necessitando um forte controle de execução para garantir a qualidade da cor.

A produção de um acabamento aparente colorido pode ocorrer de três formas: pintando a superfície endurecida com alguma tinta, adicionando pigmentos à mistura ou pela utilização de agregados com cores especiais. Sendo que, normalmente, é realizada a pintura das superfícies com tintas. Entretanto, dependendo do local e da finalidade, esta pode não ser uma opção atraente, pois modifica-se a textura e a aparência do substrato, além de possuir uma baixa vida útil, necessitando mais manutenções durante a vida útil da edificação (PASSUELO, 2003). Assim, a utilização do cimento branco se torna uma boa opção, pois além de excluir manutenções e custos com pintura, a sua coloração já é esteticamente agradável e elimina a necessidade de outro revestimento.

Contudo, para manter as condições iniciais de cor, requer manutenções rotineiras para eliminar as sujidades que acabam aderindo na superfície. Abaixo é apresentado, na Figura 11 –

a, o Museu Iberê Camargo em Porto Alegre, construído em concreto branco. Já na Figura 11 – b, pode-se ver a degradação estética da fachada devido ao acúmulo de sujidades. Por isso, a utilização de materiais cimentícios com a adição do dióxido de titânio se torna tão atraente, pois pode tornar o material mais sustentável e com capacidade autolimpante, com a possibilidade de redução de custos e das quantidades de manutenções necessárias.

Figura 11 – Museu Iberê Camargo em Porto Alegre: (a) fachada em condições originais e (b) sujidades presentes na fachada.



Fonte: archdaily.com.br.

5 ESTANQUEIDADE À ÁGUA

De acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), um dos requisitos de desempenho das edificações é relativo à estanqueidade a fontes de umidade, tanto internas quanto externas à edificação. Por isso, os projetos devem considerar as condições de exposição dos materiais, pois a umidade proveniente das chuvas, do solo e do uso da edificação pode acelerar os mecanismos de deterioração e, inclusive, reduzir as condições de habitabilidade e de higiene.

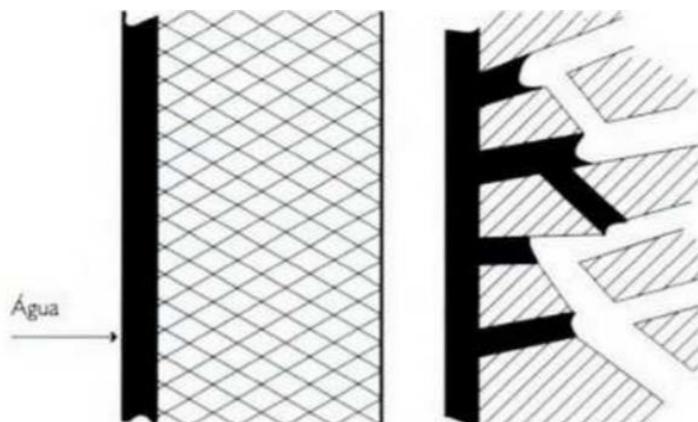
Conforme as informações apresentadas no Capítulo 3, a água é um importante agente de degradação dos revestimentos de fachadas. Tais elementos estão em contato constante com as mudanças climáticas e são submetidos a diferentes períodos de molhagem e secagem, sendo importante verificar o transporte de vapor e de água líquida nos materiais para compreender o seu comportamento e a sua deterioração (BALL; ALLEN, 2010). O transporte de vapor e de água nos elementos construtivos é composto por mecanismos complexos, pois depende tanto da porosidade interna do material (distribuição, tamanho e conectividade dos poros com o exterior), quanto das condições de exposição às variações de temperatura, à radiação solar, às chuvas, à umidade relativa e à pressão do vento (HERRMANN *et al.*, 2019).

A água é parte fundamental para a produção das argamassas, pois ela é responsável pelo processo de hidratação do cimento. Parte dos vazios entre partículas é preenchido pelos produtos de hidratação do cimento, como C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), devido à água de hidratação. Outra parcela da água fica adsorvida às lamelas de C-S-H, sendo responsável pela formação do gel. Já a água em excesso presente na mistura, conhecida como água livre, pode evaporar e é responsável pela porosidade capilar, que é uma rede de poros internos do material que permite a percolação de água no seu interior (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O transporte de água nos poros dos materiais ocorre através da permeabilidade, que é uma propriedade que indica a facilidade com que um fluido sob pressão consegue se deslocar através de um material sólido (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Assim, a água no seu estado líquido é transportada no interior dos poros pelo fenômeno de capilaridade (Figura 12), que consiste no fluxo de água devido às tensões superficiais, pois as forças de coesão entre o material das paredes dos poros e a água são maiores que as forças de coesão do líquido, resultando em uma força de sucção (OLIVEIRA, J. 2013). Ainda, segundo Herrmann (2017), a água também pode penetrar nos poros do material na sua forma líquida pela ação de forças externas de inércia, gravidade e pressão do vento, pois, por exemplo, quando as gotas da chuva descem pela

fachada, a ação do vento consegue pressioná-las próximo da parede, possibilitando a sua penetração nos materiais porosos.

Figura 12 – Fenômeno do transporte de água por capilaridade



Fonte: FREITAS *et al.*, 2008 *apud* HERRMANN, 2017

Já a água na forma de vapor é transportada por difusão (Figura 13). Este movimento ocorre devido à diferença de pressão entre duas regiões, sendo que o vapor se desloca da região com maior pressão para a de menor pressão (HERRMANN, 2017). Além disso, a umidade também pode se fixar nos poros dos materiais. Pode ocorrer por condensação, que é o processo de transformação da água em vapor para a sua forma líquida, e por adsorção física, que ocorre quando a água fica presa na superfície dos poros devido às forças intermoleculares e não por interação química (HERRMANN *et al.*, 2019).

Figura 13 – Fenômeno do transporte de água por difusão



Fonte: HERRMANN, 2017

Os fenômenos de capilaridade e difusão ocorrem de forma simultânea, mas apresentam algumas diferenças com relação ao tempo e à quantidade de água. A capilaridade consegue saturar o material poroso de forma mais rápida. Já a condensação de água nos poros pela difusão do vapor só ocorre em poros de pequenas dimensões, portanto, mesmo em altas umidades relativas, parte do material ainda se encontra não saturado, o que demoraria meses ou anos até o equilíbrio (MARANHÃO, 2009).

Assim, a compreensão de como a água se locomove pelas estruturas internas de um material poroso é importante, pois pode transportar substâncias nocivas ou, ainda, ficar aprisionada no seu interior. É importante que as fachadas possam realizar as trocas de vapor de água entre a parte interna e externa da edificação, evitando o surgimento de manifestações patológicas. Ou seja, deseja-se que os revestimentos sejam permeáveis ao vapor de água e menos permeáveis à água líquida (HERRMANN, 2017).

Dessa forma, a estanqueidade ou impermeabilidade à água do revestimento é de extrema importância para a sua durabilidade. Com menores relações água/cimento da mistura e maiores graus de hidratação, pode-se reduzir a porosidade interna de um material (MEHTA; MONTEIRO, 2014), o que, também, reduziria os caminhos de entrada da água e, conseqüentemente, reduziria os riscos de manifestações patológicas. Outra maneira de aumentar a durabilidade dos materiais de revestimentos é por meio da impermeabilização de argamassas com a inserção de aditivos de ação hidrofugante durante o seu preparo (GAVA *et al.*, 2016).

5.1 ADITIVO HIDROFUGANTE

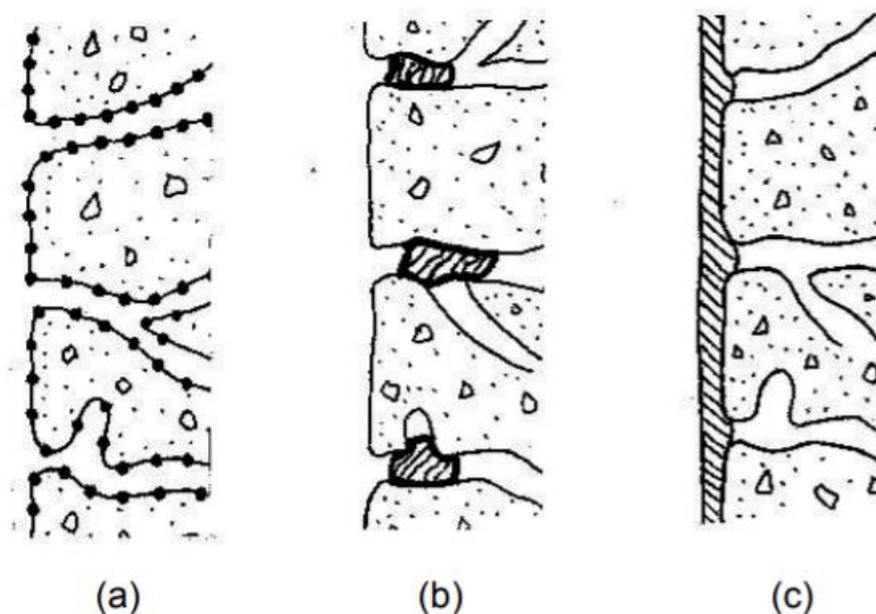
Os aditivos hidrofugantes atuam sobre a estrutura porosa do material, reduzindo a absorção de água por capilaridade (GAVA *et al.*, 2016; BIEHL *et al.*, 2018; SÁNCHEZ, 2020), mas não bloqueiam a penetração da água em forma de vapor (CASALI *et al.*, 2006; BIEHL *et al.*, 2018). Os hidrofugantes também tornam a argamassa hidrofóbica, sendo capaz de repelir a água que não está sob pressão hidrostática (ACI 212.3R-91). Pode-se classificar os tipos de hidrofugante quanto à ação dos seus produtos nos materiais porosos, evitando, portanto, a penetração da água, em três tipos, conforme pode ser visto na Figura 14 e descritos a seguir (MARANHÃO, 2009; AUSTRIA, 2015):

- a) Modificadores de tensão superficial: este tipo de hidrofugante penetra nos poros do material e torna a superfície deles repelente à água devido à mudança do ângulo de contato da parede do poro capilar e a superfície da água. Além disso, não ocorre um

bloqueio total dos poros, permitindo a passagem de vapor de água e de outros gases. Alguns exemplos são os silanos, siloxanos e compostos de silicone, sendo este o tipo de aditivo mais utilizado nos materiais de construção;

- b) Bloqueadores de poros: este hidrofugante obstrui os poros capilares, repelindo a água e outros agentes agressivos, inclusive, limitando a passagem de vapor. Como exemplo são os silicatos e silicofluorídricos;
- c) Formadores de película superficial: o aditivo formador de película é responsável por criar uma película contínua sobre a superfície, impedindo a entrada de água líquida e em forma de vapor. Esta película atua como um primer, podendo, inclusive, ser pigmentada. As tintas e vernizes são exemplos de produtos formadores de película.

Figura 14 – Tipos de hidrofugantes quanto ao seu funcionamento nos materiais porosos: (a) modificador de tensão superficial, (b) bloqueador de poros e (c) formador de película.



Fonte: KUS, 2002 *apud* AUSTRIA, 2015

Quanto à aplicação, existem dois tipos diferentes: hidrofugantes à base de água ou de solventes usados para tratamentos de impregnação superficial (pós-tratamento) e aplicados como pintura, spray, gel ou creme, e os aditivos hidrofugantes em pó ou líquidos que são acrescentados diretamente na mistura da argamassa (MARANHÃO, 2009; FALCHI *et al.*, 2015; MUHAMMAD *et al.*, 2015; AUSTRIA, 2015). De acordo com Muhammad *et al.* (2015), enquanto que o hidrofugante aplicado como tratamento superficial se degenera com o tempo e necessita de reaplicações, o aditivo incorporado na mistura permanece eficaz com uma abrasão

superficial de até 7 mm. Ainda, segundo Austria (2015), os aditivos utilizados como pós-tratamento apresentam custo baixo, compatibilidade com vários materiais e possuem um histórico de utilização, mas também apresentam as desvantagens de adicionar uma nova etapa nas atividades construtivas, podendo aumentar o cronograma da obra e, com o aparecimento de novas fissuras, o seu desempenho é reduzido. Além disso, seu desempenho é diretamente influenciado pela profundidade de penetração do hidrofugante.

Ao aplicar o hidrofugante diretamente na mistura, este se torna parte integrante do material, tendo um desempenho menos influenciado pelo surgimento de fissuras (MARANHÃO, 2009), porém, pode-se afetar as propriedades da argamassa no seu estado fresco e endurecido e a hidratação do cimento (FALCHI *et al.*, 2015). Um efeito secundário que o aditivo pode causar à argamassa no seu estado fresco é aumentar o ar incorporado, o que resultaria em uma melhor trabalhabilidade e menor densidade (ACI 212.3R-91; SÁNCHEZ, 2020).

Segundo Roos *et al.* (2008), alguns requisitos para os aditivos hidrofugantes são:

- a) reduzir a absorção de água líquida;
- b) evitar a absorção de água durante chuvas e ventos fortes;
- c) evitar a formação de eflorescências;
- d) reduzir sujidades e a formação de biofilmes;
- e) não influenciar na aparência do substrato.

Estes aditivos são compostos por diferentes componentes como sabões de cálcio ou estearato ou oleato de amônio, butil estearato e por alguns produtos derivados do petróleo (ACI 212.3R-91; CASALI *et al.*, 2006). Maranhão (2009) indica que os hidrofugantes à base de silicone são os mais utilizados na construção civil e demonstram efetividade na redução da água nos poros capilares, sendo que os principais são os metil-siliconatos, silanos e siloxanos, sendo que este último é o mais empregado em argamassas de revestimento. Apesar de reduzir os manchamentos causados por microorganismos, os produtos à base de silicone apresentam características lipofílicas que intensificam a deposição de sujidades como a fuligem.

Assim, com base no que foi exposto, buscou-se trabalhar com uma argamassa industrializada de cor branca com adição de TiO_2 e de um aditivo hidrofugante. Entende-se a necessidade de um revestimento externo que requeira a menor frequência de manutenções possíveis, mantendo o seu desempenho e sua estética por mais tempo, sendo o mais sustentável possível e contribuindo para adequadas condições externas e internas das edificações.

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

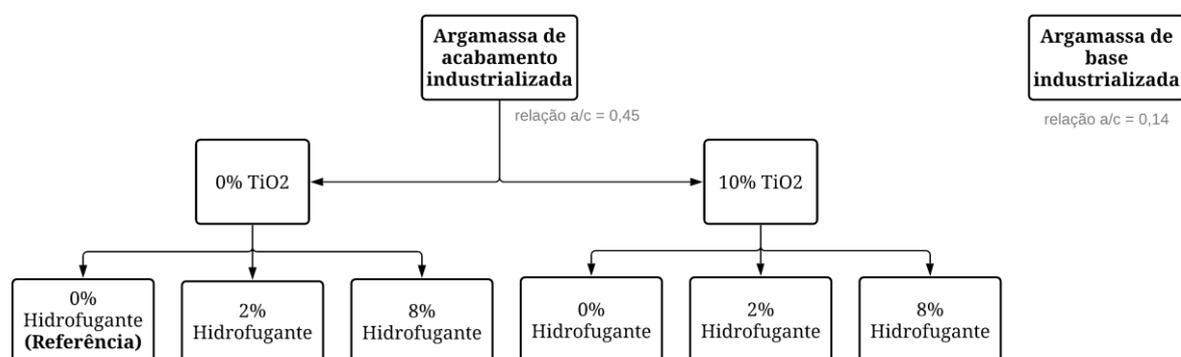
Neste capítulo estão apresentados: a metodologia do trabalho, os materiais utilizados na fabricação das argamassas e o seu procedimento de produção e a descrição dos ensaios realizados. As atividades de moldagem e os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) pertencente ao Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

6.1 METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho foi desenvolvida com a finalidade de avaliar o desempenho de uma argamassa com adição de dióxido de titânio e de um aditivo hidrofugante quanto a sua capacidade de autolimpeza e de permeabilidade à água líquida e ao vapor de água.

É apresentada, na Figura 15, uma representação esquemática dos traços realizados no trabalho. Foram avaliadas argamassas sem adição de TiO_2 e com 10% de TiO_2 . A utilização de uma adição de 10% de dióxido de titânio sobre a massa de cimento foi determinada com base no trabalho de Casarin (2019), que concluiu que esta porcentagem apresenta melhor eficácia na autolimpeza em comparação com argamassas sem adição ou com adição de 5% de TiO_2 . Com relação à quantidade de hidrofugante, foram testadas argamassas sem adição do produto e com 2% e 8% de adição sobre a quantidade de cimento utilizada, representando, respectivamente, o consumo mínimo e máximo de acordo com as recomendações do fabricante.

Figura 15 – Representação esquemática das combinações realizadas

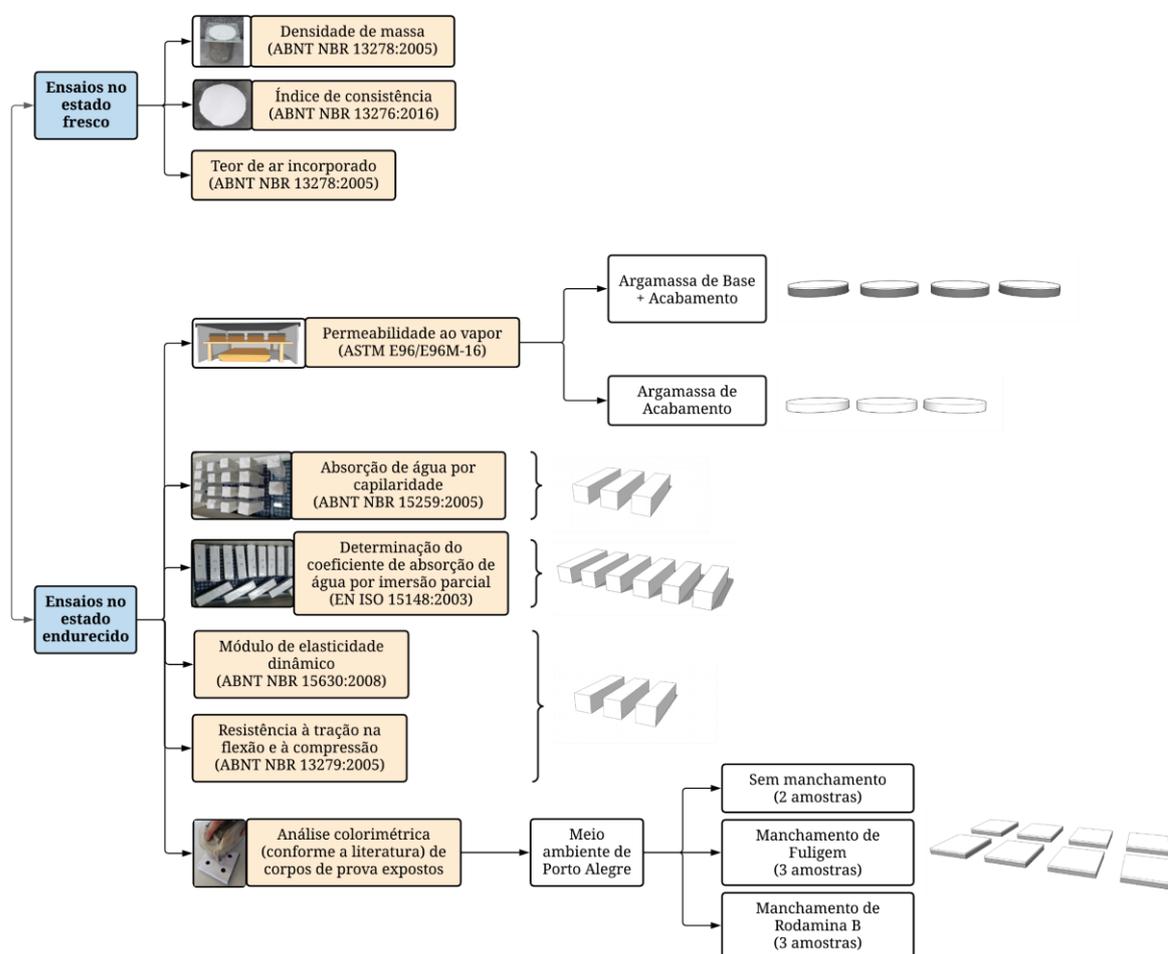


Fonte: própria da autora

De acordo com métodos existentes para a avaliação da autolimpeza de argamassas fotocatalíticas e com os métodos de análise do comportamento de argamassas frente à ação da

água, foi desenvolvido o programa experimental desta pesquisa. Os ensaios no estado fresco e no estado endurecido de cada uma das seis combinações da argamassa de acabamento, descritos anteriormente, assim como as suas respectivas normas e uma representação visual dos corpos de prova necessários, estão apresentadas na Figura 16. Para a caracterização dos materiais foram utilizados corpos de prova prismáticos, enquanto que para o ensaio de permeabilidade ao vapor as amostras são cilíndricas e para a exposição ao ambiente natural foram empregadas placas quadradas. A argamassa de base também foi testada pelos mesmos ensaios no estado fresco e, no estado endurecido, foram realizados apenas os ensaios de absorção de água por capilaridade, de módulo de elasticidade dinâmico e de resistência à tração na flexão e à compressão.

Figura 16 – Representação esquemática do programa experimental por combinação de acabamento



Fonte: própria da autora

6.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a execução deste trabalho foram empregadas duas argamassas industrializadas, uma para servir de base e outra como camada de revestimento, sendo que, nesta última, foram adicionados o aditivo hidrofugante e o dióxido de titânio. Os materiais utilizados, com exceção da argamassa de base, foram determinados de acordo com a demanda de uma empresa e o seu uso em uma obra real. A seguir estão apresentadas as suas características.

6.2.1 Argamassas

6.2.1.1 Argamassa de Base

As argamassas industrializadas, de base e de acabamento, são misturas prontas que necessitam, apenas, da adição de água conforme indicação do fabricante. A argamassa de base é recomendada para revestimento de paredes e tetos em áreas externas e internas, pequenos reparos e reformas e para assentamento de alvenarias de vedação. A mesma pode ser aplicada sobre bases de blocos de concreto, blocos cerâmicos, blocos sílico calcários, tijolos de barro maciços e superfícies de concreto, após a execução de chapisco. Sua composição é formada por cimento de cor cinza, agregados minerais e aditivos especiais e pode-se visualizar o aspecto da argamassa no seu estado seco e fresco a partir da Figura 17.

Figura 17 – Argamassa de base: (a) estado seco e (b) estado fresco



Fonte: própria da autora

As características do produto estão apresentadas na Tabela 1, conforme as informações técnicas do fabricante, e as condições de aplicação recomendadas são entre 5 °C e 40 °C para a temperatura do ar ambiente e entre 5 °C e 27 °C para a temperatura da superfície da base. Ainda, o material apresenta massa específica de 2,73 g/cm³, segundo o ensaio da norma NBR 16605:2017.

Tabela 1 – Características da argamassa de base

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Consumo para revestimento | 1,70 kg/m ² /mm |
| Quantidade de água | 2,8 litros (saco de 20 kg) |
| Espessura da camada | 10 a 50 mm |
| Densidade aparente | 1,50 g/cm ³ |
| Densidade fresca | 1,80 g/cm ³ |
| Tempo de utilização | até 3 horas |
| Validade | 240 dias |

Fonte: elaborada pela autora com base nas informações técnicas do fabricante

Esta argamassa possui classificação II – alta – b, de acordo com a NBR 13281:2000 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos) e fornecida pela fabricante. Tal classificação resulta em características como, respectivamente, resistência à compressão aos 28 dias entre 4 e 8 MPa, capacidade de retenção de água maior que 90% e teor de ar incorporado entre 8 e 18%.

6.2.1.2 Argamassa de Acabamento

A argamassa de acabamento é indicada pelo fabricante para revestimentos externos e internos de paredes e tetos. É uma massa de acabamento com granulometria fina que pode ser utilizada em substituição da massa acrílica, podendo ser aplicada sobre reboco de argamassa, paredes/elementos de concreto, blocos cerâmicos, placas cimentícias ou gesso (placa ou acartonado), sem a necessidade da camada de chapisco. Entretanto, em superfícies com fissuras, buracos ou algum defeito, é recomendada a realização de uma camada prévia de regularização.

Ainda, de acordo com o fabricante, apresenta elevada aderência e uma aplicação rápida e fácil, o que resulta em grande economia de tempo e aumento da produtividade, pois elimina a necessidade de lixamento. Além disso, também permite aplicação como textura, regularização do substrato com espessura de até 2 mm e pode ser aplicada onde há indícios de umidade.

Sua composição, segundo o fabricante, é formada por uma mistura de aglomerantes, mistura de agregados minerais calcários e quartzosos com granulometria controlada, fíler

mineral, aditivos químicos e polímeros especiais. A argamassa no seu estado seco e fresco pode ser visualizada na Figura 18. O produto tem prazo de utilização de até 72 horas após o preparo e possui características tixotrópicas, pois com a agitação com misturador mecânico as suas propriedades originais se reestabelecem.

Figura 18 – Argamassa de acabamento: (a) estado seco e (b) estado fresco



Fonte: própria da autora

Ainda de acordo com informações técnicas, o material deve ser misturado de forma mecânica e aplicado com um rolo de textura ou uma desempenadeira. Quando a argamassa não apresenta mais sensibilidade ao toque, deve-se repetir a aplicação da mesma, pressionando-a contra o substrato. As condições de aplicação são de 5 °C a 27 °C para a temperatura da superfície da base e 5 °C a 35 °C para a temperatura do ar ambiente. Também é indicado que caso a temperatura ambiente esteja acima dos 35 °C deve-se fazer a cura do revestimento, mantendo-o umedecido por um período de 24 horas.

Além disso, a massa específica do material resultou em 2,73 g/cm³, segundo o ensaio da norma NBR 16605:2017. Demais informações sobre o produto são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características da argamassa de acabamento

| | |
|---------------------|----------------------------------|
| Rendimento | 1,30 kg/m ² /mm |
| Quantidade de água | 6,8 a 7,2 litros (saco de 15 kg) |
| Densidade aparente | 0,95 kg/m ³ |
| Densidade fresca | 1,52 kg/m ³ |
| Tempo de utilização | até 72 horas |
| Validade | 12 meses |

Fonte: elaborada pela autora com base nas recomendações técnicas do fabricante

6.2.2 Aditivo hidrofugante

O aditivo hidrofugante utilizado na pesquisa é apresentado pelo fabricante como um aditivo impermeabilizante em pó para concreto, argamassa e rejunte cimentício, podendo ser utilizado em vigas, baldrame, lajes, rebocos, argamassas de revestimento de pisos e paredes, concretos usinados, protendidos e armados, para o assentamento de alvenaria, em estruturas enterradas entre outros.

Segundo o fabricante, o aditivo nanotecnológico reage com o cimento durante o processo de hidratação, o que resulta em substâncias minerais que bloqueiam a rede capilar e proporcionam a impermeabilização do material (concreto ou argamassa). Além disso, o hidrofugante melhora a trabalhabilidade do material, sem aumentar o consumo de água, e retarda os tempos de início e fim de pega de 30 a 60 minutos.

É um material composto por pozolanas, sais solúveis e fórmula HDF SCI mantida sob segredo industrial (Figura 19) e torna-se parte integrante do substrato ao qual é adicionado (concreto ou argamassa). De acordo com o fabricante, o aditivo é resistente a substâncias agressivas (pH 4 a 10 em contato permanente e pH 3 a 11 em contato temporário) e é resistente a pressão hidrostática positiva e negativa. Além disso, permite a secagem do vapor de água presente no material, produz impermeabilização permanente e bloqueia a passagem da água em fissuras estáticas livres de pressão menores que 0,3 mm.

Figura 19 – Aditivo hidrofugante



Fonte: própria da autora

Segundo o fabricante, o aditivo possui um consumo mínimo de 2% sobre a quantidade de cimento utilizada, enquanto que o consumo máximo é de 8%. Um exemplo de utilização da quantidade mínima recomendada é no reboco de áreas secas, enquanto que o consumo máximo é sugerido para áreas molhadas como banheiros, piscinas, tanques, muros de arrimo, sapatas, entre outros.

O material deve ser misturado nos traços de concreto ou argamassa por fricção mecânica com o auxílio de uma betoneira ou misturador elétrico e a sua aplicação é recomendada em temperaturas entre 5 °C e 25 °C, não utilizando sobre suportes encharcados. Demais características do produto estão apresentadas na Tabela 3. O ensaio de massa específica pela NBR 16605:2017 resultou em um valor de 2,53 g/cm³.

Tabela 3 – Características do aditivo hidrofugante

| Aspecto | Sólido (pó) branco acinzentado |
|---------------------------|--------------------------------|
| Odor | Inodoro |
| pH | 9 |
| Densidade relativa | 1,9 – 2,1 g/cm ³ |
| Massa específica absoluta | 2,2 – 2,7 g/cm ³ |
| Inflamabilidade | Sólido não inflamável |
| Solubilidade | Insolúvel |
| Toxicidade | Não tóxico |

Fonte: elaborada pela autora com base na ficha técnica do fabricante

6.2.3 Dióxido de Titânio

O dióxido de titânio tem sido objeto de vários estudos sobre o seu uso para a redução de óxidos de nitrogênio (NOx) nos gases de exaustão e na produção de superfícies antibacterianas,

autolimpantes e anti-embaçamento. É um pó branco fino (Figura 20), com partículas de dimensão nanométrica e estrutura cristalina anatase, sendo proveniente da China. Apresenta massa específica de $3,91 \text{ g/cm}^3$ de acordo com a NBR 16605:2017.

Figura 20 – Dióxido de Titânio



Fonte: própria da autora

6.2.4 Água

A água utilizada para o preparo das argamassas é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Porto Alegre/RS. Além disso, nas combinações com adição de TiO_2 , foi utilizada água deionizada, obtida através de coluna deionizadora, para a dispersão do dióxido de titânio antes de ser misturado na argamassa. Também foi utilizada a água deionizada para a realização dos manchamentos, conforme as informações citadas no ítem 6.3.1.

6.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

Inicialmente houve a moldagem da argamassa de base, que não recebeu a adição do dióxido de titânio nem do aditivo, servindo, apenas, como substrato para a argamassa de acabamento. O total de amostras moldadas e as suas características estão apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – Características dos corpos de prova da argamassa de base



Fonte: própria da autora

A argamassa de base foi produzida em uma argamassadeira da marca Betomac, modelo MT-40, com capacidade útil de 35 litros e com rotação de 50 RPM, disponível no LAMTAC - NORIE - UFRGS. Inicialmente adicionou-se a argamassa seca, o equipamento foi ligado e, então, foi adicionada a água conforme a quantidade necessária recomendada pelo fabricante. O processo de mistura foi realizado em um tempo total de 4 minutos e meio, havendo uma pausa no meio deste intervalo para assegurar, de forma manual, que todo o material seco estava misturado. Devido à capacidade da argamassadeira, foi necessária a realização de duas moldagens.

Após este processo, determinou-se o índice de consistência segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016) e a densidade de massa de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005). Em seguida os corpos de prova foram moldados em 2 camadas, onde cada uma foi adensada por 15 segundos em mesa vibratória e executou-se o rasamento com régua metálica. As amostras foram mantidas em temperatura ambiente e desmoldadas depois de, aproximadamente, 48 h e dispostas em câmara climatizada (temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 60 ± 5 %) para cura de 28 dias.

Após a cura da base, foram realizadas as moldagens das seis combinações da argamassa de acabamento utilizando a mesma argamassadeira descrita anteriormente. A denominação de cada uma das combinações está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Denominação das argamassas de acordo com o teor de TiO₂ e de hidrofugante

| | 0% TiO₂ | 10% TiO₂ |
|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 0% Hidrofugante | 0T0H | 10T0H |
| 2% Hidrofugante | 0T2H | 10T2H |
| 8% Hidrofugante | 0T8H | 10T8H |

Fonte: própria da autora

Iniciou-se a produção das argamassas de acabamento adicionando-se o material seco na argamassadeira. Em seguida, ligou-se o equipamento e adicionou-se o aditivo hidrofugante (Figura 22), nas combinações e quantidades necessários. Nas argamassas com adição de TiO₂, foi, primeiramente, realizada a dispersão do TiO₂ em água deionizada com um misturador manual (Figura 23 - a) de acordo com o procedimento realizado por Bersch (2021, no prelo) na concentração de 8% (massa do dióxido de titânio sobre a massa de água deionizada) por 3 minutos e, imediatamente, foi adicionado aos materiais secos (Figura 23 - b). A dispersão do dióxido de titânio é muito importante, pois as partículas são de tamanho nanométrico e, devido à sua finura, aglomeram-se em condições naturais (CASARIN, 2019).

Figura 22 – Adição do aditivo hidrofugante na mistura na betoneira



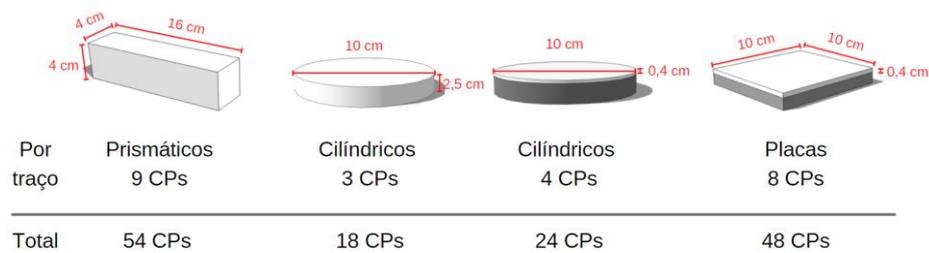
Fonte: própria da autora

Figura 23 – Adição do TiO_2 na mistura: (a) Dispersão do TiO_2 em água deionizada e (b) imediata adição na mistura na betoneira

Fonte: própria da autora

Por fim, adicionou-se o restante da água necessária para atender a quantidade mínima indicada pelo fabricante. Este processo foi realizado durante 8 minutos. Então, o equipamento foi desligado e o material foi raspado para assegurar que todo o material seco estava misturado. O equipamento foi acionado novamente até se obter uma mistura homogênea, o que durava, aproximadamente, 10 minutos. Prosseguiu-se com a execução dos ensaios de índice de consistência e densidade de massa e as amostras eram moldadas. O total de amostras moldadas e as suas características estão apresentadas na Figura 24.

Figura 24 – Características dos corpos de prova de acabamento



Fonte: própria da autora

Os dois tipos de amostras cilíndricas (um tipo contendo argamassa de base e de acabamento e o segundo tipo contendo apenas a argamassa de acabamento) foram moldados com o intuito de verificar a permeabilidade ao vapor de água somente das argamassas de acabamento e do conjunto base e acabamento, sendo este último analisado com o fluxo de vapor atravessando os materiais nos dois sentidos (direção do acabamento para a base como na direção da base para o acabamento), o que representa o transporte de vapor de água pelos revestimentos das edificações, com origem externa e interna (mais informações no item 6.4.3).

Para a execução dos acabamentos sobre a base, as placas e as 4 amostras cilíndricas de base foram dispostas sobre um suporte de madeira com uma moldura que determinava a espessura do acabamento de, no máximo, 4 mm, facilitando a sua execução, podendo ser visto na Figura 25. Os corpos de prova da argamassa de base foram levemente umedecidos com um rolo e, então, foi realizado um acabamento liso com a utilização de uma desempenadeira.

Figura 25 – Execução do acabamento sobre a base: (a) suporte para execução dos acabamentos e (b) acabamento executado



Fonte: própria da autora

Os demais corpos de prova prismáticos e as 3 amostras cilíndricas de acabamento foram adensados por 15 segundos em mesa vibratória e rasados com régua metálica. As amostras de base que receberam acabamento foram desmoldadas após 48h em temperatura ambiente e as demais após 14 dias sendo, em seguida, colocados em câmara climatizada (temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 60 ± 5 %) até completarem o período de cura de 28 dias. Devido às características dos materiais da argamassa de acabamento e por apresentar um tempo de utilização de até 72 horas, seu endurecimento ocorreu de forma mais lenta, o que não permitiu a desmoldagem dentro do prazo recomendado pela norma NBR 13279:2005 de 48 ± 24 h de permanência nos moldes. Filho (2016) estudou uma argamassa polimérica e também reportou o longo tempo de endurecimento das mesmas de acordo com a espessura das amostras.

A Tabela 5 apresenta o consumo dos materiais utilizados para as moldagens das diferentes argamassas e as suas relações água/cimento, conforme indicação dos fabricantes. Com relação às adições do hidrofugante e do TiO_2 , estes foram aplicados sobre a massa de cimento presente na argamassa, tendo sido considerada a quantidade de 10% de cimento.

Tabela 5 – Consumo de materiais utilizados e relação água/cimento das argamassas

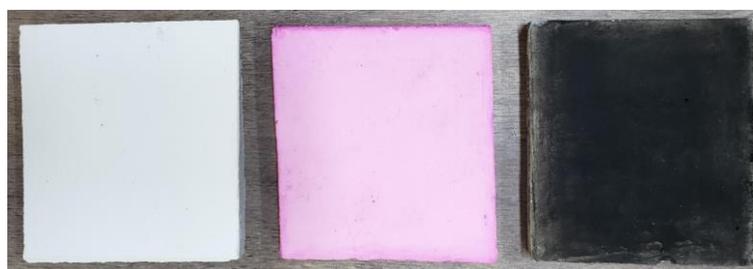
| Denominação | Consumo (kg) | | | | | Relação a/c |
|-------------|--------------|------|--|------------------|--------------|-------------|
| | Argamassa | Água | Água deionizada (dispersão do TiO ₂) | TiO ₂ | Hidrofugante | |
| Base | 36,00 | 5,04 | - | - | - | 0,14 |
| 0T0H | 8,47 | 3,84 | - | 0 | 0 | 0,45 |
| 0T2H | 8,47 | 3,84 | - | 0 | 0,017 | 0,45 |
| 0T8H | 8,47 | 3,84 | - | 0 | 0,068 | 0,45 |
| 10T0H | 8,47 | 2,78 | 1,06 | 0,085 | 0 | 0,45 |
| 10T2H | 8,47 | 2,78 | 1,06 | 0,085 | 0,017 | 0,45 |
| 10T8H | 8,47 | 2,78 | 1,06 | 0,085 | 0,068 | 0,45 |

Fonte: própria da autora

6.3.1 Métodos de manchamentos e exposição

As placas de argamassa foram submetidas a dois tipos de manchamentos: a fuligem proveniente do cano de descarga de veículos a diesel e o corante orgânico Rodamina B. Adotou-se o manchamento com fuligem por este ser uma das principais fontes de sujeira e de degradação das fachadas, podendo alterar a cor e a estética dos edifícios e, ainda, causar manchas (SMITS *et al.*, 2013; DIAMANTI *et al.*, 2015; DE LA ROSA *et al.*, 2017; POZO-ANTONIO e DIONÍSIO, 2017; CASARIN, 2019). Já o manchamento com Rodamina B (RhB) foi escolhido devido à sua ampla utilização na literatura como uma substância para a avaliação da autolimpeza de materiais, inclusive presente na norma italiana UNI 11259:2016³ (MENDOZA *et al.*, 2015; TREVISO, 2016; CASARIN, 2019; CONSTANTINO *et al.*, 2020; DIAMANTI *et al.*, 2021). Pela Figura 26 pode-se comparar o resultado final dos manchamentos com uma amostra sem manchamento com a sua cor original.

Figura 26 – Plaquinha sem manchamento, com manchamentos de Rodamina B e com manchamentos de fuligem



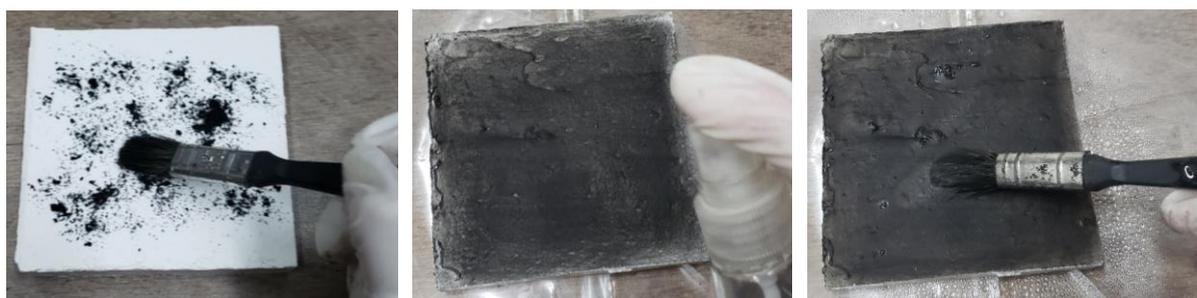
Fonte: própria da autora

³ UNI 11259:2016 - Fotocatálise – Determinação da atividade fotocatalítica de ligantes hidráulicos – Teste pelo método da Rodamina B.

O procedimento para o manchamento com fuligem foi baseado nos trabalhos de De La Rosa *et al.* (2017) e de Casarin (2019). Enquanto que De La Rosa *et al.* (2017) utilizou uma quantidade de fuligem de 8 mg/cm², Casarin (2019) adotou uma quantidade de 0,75 mg/cm², pois, utilizando a quantidade do outro autor, as amostras ficariam inteiramente cobertas pela fuligem. Para definir a quantidade de fuligem empregada neste trabalho foi realizado um teste em outras amostras de acabamento extras. Assim, a quantidade adotada foi de 0,4 mg/cm², pois resultou em um manchamento mais homogêneo visualmente, representando metade da quantidade utilizada por Casarin (2019) que, por ter sido utilizada para diferentes tipos de acabamentos superficiais, resultou em um manchamento excessivo para as amostras de acabamento liso deste trabalho, além de ter sido a mesma quantidade utilizada por Bersch (2021, no prelo).

Inicialmente foi realizada a medição com espectrofotômetro da cor inicial das plaquinhas (branca), conforme pode ser visto na Figura 26. Em seguida, a fuligem seca foi espalhada na superfície do material com um pincel (Figura 27 - a) e, então, as amostras foram mantidas por 24 h em temperatura ambiente e em local escuro. Após este tempo, foi aspergida uma quantidade de, aproximadamente, 5 ml de água deionizada sobre cada plaquinha com o auxílio de um dispersor em spray (Figura 27 - b) sendo que o material aquoso era, novamente, espalhado com o auxílio de um pincel (Figura 27 - c).

Figura 27 – Manchamento com fuligem: (a) aplicação da fuligem, (b) aspersão de água deionizada após 24 horas e (c) espalhamento final com pincel sobre superfície úmida

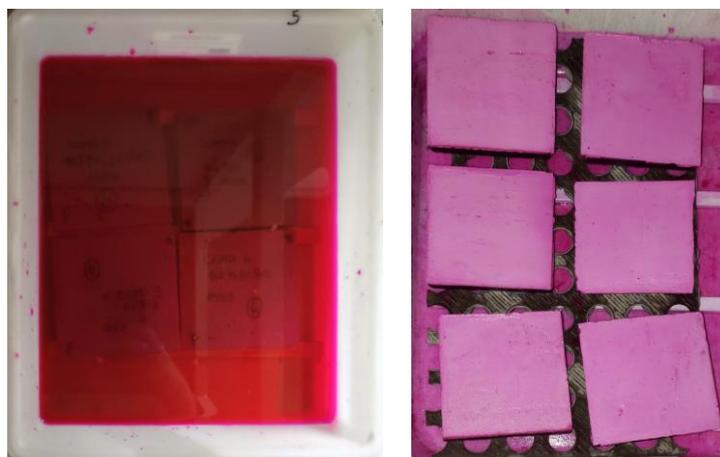


Fonte: própria da autora

Assim como para a fuligem, o procedimento de manchamento com o corante Rodamina B foi realizado após a medição da cor inicial das amostras e executado de acordo com o trabalho de Casarin (2019). Preparou-se uma solução aquosa de Rodamina B com água deionizada, na concentração de 0,5 g/L, onde as plaquinhas foram imersas por 24 h e posicionadas com a face de acabamento para baixo e sobre um suporte de PVC, deixando grande parte da sua área livre

e em contato com a solução (Figura 28 - a). Após este período, as amostras foram retiradas e dispostas sobre um suporte para ocorrer a sua secagem (Figura 28 - b).

Figura 28 – Manchamento de Rodamina B: (a) amostras imersas em solução aquosa de Rodamina B e (b) secagem das amostras à temperatura ambiente



Fonte: própria da autora

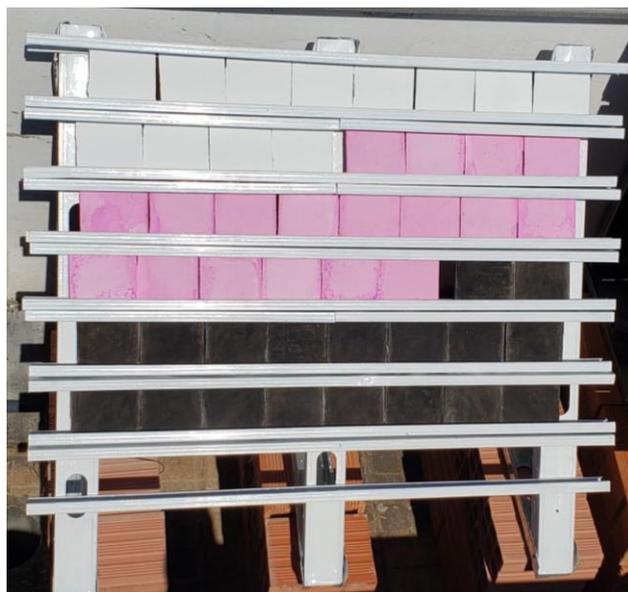
Tanto as amostras com fuligem quanto as amostras com o corante Rodamina B foram mantidas por 48 h em temperatura ambiente e em local escuro para a sua secagem completa e posterior medição com espectrofotômetro e exposição ao ambiente urbano. Assim, foram expostas 8 placas para cada combinação, sendo 3 placas com manchamento de fuligem, 3 com manchamento de Rodamina B e 2 sem manchamento.

Para a exposição das amostras ao ambiente urbano de Porto Alegre/RS foi confeccionado um suporte com estruturas metálicas de aço galvanizado pintado com tinta esmalte sintética branca para evitar qualquer oxidação do material e manchamento indesejado das amostras. A área de exposição das plaquinhas possui uma inclinação de 45° (Figura 29), conforme já realizado por Treviso (2016), Diamanti *et al.* (2015) e Casarin (2019). Essa escolha se deu porque Casarin (2019) concluiu, que apesar da inclinação de 90° (característica das paredes externas das edificações) também ser eficiente na autolimpeza das argamassas, a inclinação de 45° se apresentou mais eficiente devido à incidência direta da radiação UV e da facilidade de escorregamento da água da chuva. Ainda, Treviso (2016) concluiu que as amostras a uma inclinação de 90° precisam de um tempo maior para alcançar o valor de variação de cor da inclinação de 45°.

O suporte e as amostras foram posicionados no terraço do “Prédio branco - Salas de Aula - 11209” do campus centro da UFRGS, com coordenadas geográficas 30°01’58’’S e 51°13’18’’W, voltados para a orientação solar norte, pois possui maior incidência de radiação

solar anual. Devido à sua localização e por estar próximo de caixas d'água, as amostras eram submetidas a um período de sombreamento durante as manhãs. A exposição teve início no dia 14/10/2021 e seu tempo de exposição foi de 28 dias, permanecendo durante a estação da primavera. Os dados meteorológicos do tempo de exposição das amostras são apresentados no Anexo A.

Figura 29 – Amostras expostas ao ambiente urbano de Porto Alegre/RS



Fonte: própria da autora

6.4 ENSAIOS REALIZADOS

Neste trabalho foram realizados ensaios de caracterização das argamassas de base e de acabamento tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, após 28 dias de cura. Os principais ensaios executados serão abordados e descritos de forma detalhada nos capítulos seguintes.

Logo após a produção das argamassas e da obtenção de uma mistura homogênea foram realizados os ensaios no estado fresco, cujas normas de execução foram:

- a) NBR 13276:2016 – Determinação do índice de consistência;
- b) NBR 13278:2005 – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

Já os ensaios no estado endurecido foram realizados conforme as normas a seguir:

- a) NBR 13279:2005 – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão;

- b) NBR 15630:2008 – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica;

Os principais ensaios no estado endurecido são:

- a) NBR 15259:2005 – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade;
- b) EN ISO 15148:2016 – Determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial;
- c) ASTM E96/E96M-16 – Determinação da permeabilidade ao vapor.

Os ensaios principais no estado endurecido estão detalhados nos itens 6.4.1, 6.4.2 e 6.4.3. Para verificar a capacidade de autolimpeza das argamassas de acabamento foram realizadas duas análises de acordo com a bibliografia disponível, conforme descrito em 6.4.4: análise visual por meio de fotografias e o ensaio de análise colorimétrica ou de resistência ao manchamento.

6.4.1 Ensaio de absorção de água por capilaridade (NBR 15259:2005)

Com o intuito de mensurar a absorção de água por capilaridade das amostras, foi realizado o ensaio conforme as recomendações da norma NBR 15259:2005. A norma indica a utilização de 3 corpos de prova para a execução do ensaio aos 28 dias de idade, mantidos a uma temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 60 ± 5 % durante este período. Entretanto, como foram moldados 3 corpos de prova extras por traço, tanto de acabamento quanto de base, o ensaio foi realizado para 6 corpos de prova.

O procedimento do ensaio iniciou com a preparação das amostras. A superfície quadrada das amostras (4x4 cm) foi lixada e limpa com um pincel. Em seguida, as demais faces foram preparadas com plástico filme para impedir qualquer troca de umidade com o meio, evitando-se o contato do plástico com a altura em contato com a água. Após a verificação do nível de água em 5 ± 1 mm acima da face em contato com a água, os corpos de prova foram pesados para a determinação de sua massa inicial e posicionados sobre os suportes dentro do recipiente (Figura 30). Foram realizadas medições da massa de cada amostra aos 10 e aos 90 minutos do ensaio, sendo que os corpos de prova eram retirados dos suportes, enxugados com um pano, pesados e imediatamente retornavam ao recipiente.

Figura 30 – Ensaio de absorção por capilaridade para 6 amostras de 3 combinações de acabamento



Fonte: própria da autora

6.4.2 Determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial (EN ISO 15148:2016)

Também se realizou a determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial, por meio da norma EN ISO 15148:2016, pois a partir dela é possível plotar um gráfico que indica a absorção por capilaridade ao longo do tempo, ou seja, a variação de massa durante um período de, pelo menos, 24 h.

De acordo com a norma, pelo menos 3 corpos de prova devem ser ensaiados. Se a área de contato com a água de cada amostra for menor que 100 cm^2 , então, pelo menos 6 corpos de prova devem ser testados, representando uma área total de, pelo menos, 300 cm^2 . Para isso, foram utilizados os mesmos 6 corpos de prova utilizados para o ensaio pela norma NBR 15259:2005. Enquanto que, pela norma brasileira vigente, a área de contato com a água é de, aproximadamente, 16 cm^2 para cada corpo de prova na posição vertical, decidiu-se utilizar as amostras na posição horizontal, com uma área individual de 64 cm^2 , havendo, portanto, a necessidade de ensaiar 6 corpos de prova e com uma área total de 384 cm^2 , estando de acordo com as recomendações da ISO 15148:2016.

A norma ISO 15148:2016 ainda indica que a espessura, sempre que possível, deve ser a espessura total do produto, sendo representativa do material e suficientemente espessa para permitir o manuseio sem resultar em danos à amostra. Como mencionado anteriormente, ao executar o acabamento sobre a base buscou-se uma espessura máxima de 4 mm o que, ao

realizar o ensaio só desta camada poderia resultar em danos e até quebrar a amostra. Assim, decidiu-se empregar as amostras já moldadas e utilizadas no ensaio descrito no item 6.4.1 para a execução deste ensaio, com espessura de 4 cm.

As amostras de acabamento foram preparadas com plástico filme nas suas faces, sendo secas em estufa a 50 °C e resfriadas em um dessecador até constância de massa, atingindo as condições de teste de 23 ± 5 °C e umidade relativa de 50 ± 5 %.

O recipiente foi preparado com um nível de água de 5 ± 2 mm acima da face em contato com a água e com suportes para o posicionamento das amostras (Figura 31). Em seguida, foi realizada a medição da massa inicial das amostras e estas foram colocadas sobre os suportes. Prosseguiu-se o ensaio com a verificação da massa dos corpos de prova nos tempos sugeridos pela norma de 5 min, 20 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e, então, de pelo menos mais dois tempos, incluindo 24 h. As amostras eram retiradas, enxugadas, pesadas e imediatamente recolocadas sobre os suportes.

Figura 31 – Ensaio para determinação do coeficiente de absorção por imersão parcial



Fonte: própria da autora

6.4.3 Ensaio de permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água em argamassas no seu estado endurecido consiste na medição do fluxo de vapor que atravessa o material quando mantido em condições de temperatura e umidade relativa constantes.

A avaliação da permeabilidade ao vapor de água para revestimentos de argamassa ainda não é normatizada no Brasil. Por isso, pode-se realizar este ensaio conforme normas internacionais como a E 96 (ASTM, 2016) – Transmissão de vapor de água de materiais, a EN 1015-19 (CEN, 2004) – Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de

reboco endurecidas e a ISO 12572 (ISO, 2016) – Desempenho higrotérmico de materiais e produtos de construção – Determinação das propriedades de transmissão do vapor de água – Método do copo. Este trabalho baseou-se na norma americana E 96 (ASTM, 2016) e em demais pesquisas realizadas por Salomão (2016) e Herrmann (2017).

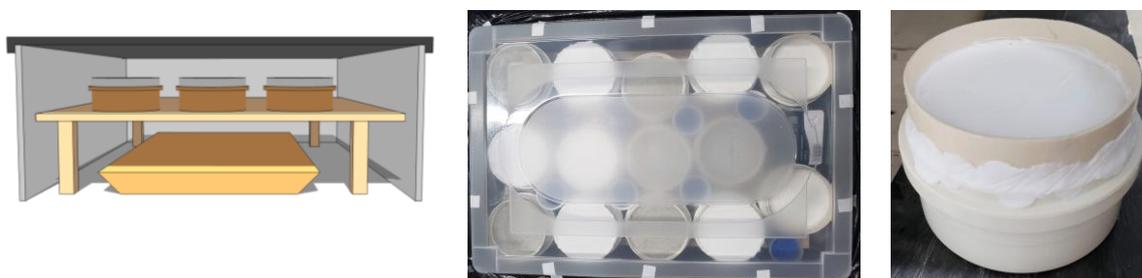
A norma E 96 (ASTM, 2016) pode ser utilizada para a determinação da transmissão de vapor de água em materiais como papéis, filmes plásticos, reboco, gesso e produtos de madeira e plásticos, sendo limitada a uma amostra de espessura máxima de 32 milímetros. Nela estão descritos dois métodos de medição: método dessecante e o método da água. Enquanto que o método dessecante é caracterizado pela transmissão de vapor devido à diferença de umidade entre as faces do material, o método da água é descrito como a transmissão do vapor de água pelo material da face em contato com água destilada para a face em contato com atmosfera controlada. A escolha do método utilizado deve ser o mais próximo das condições de uso do material, assim, a permeabilidade ao vapor de água foi ensaiada pelo método dessecante.

Neste método a amostra é selada em um copo teste contendo um dessecante no seu interior e é posicionada em uma atmosfera controlada (Figura 32-a), havendo pesagens frequentes para a determinação da taxa de fluxo de vapor através do material, no sentido do ambiente para o dessecante. Os seguintes equipamentos e materiais são necessários para a realização do ensaio:

- a) Copo teste: deve ser de um material leve, não corrosivo e impermeável à água e ao vapor de água. A área deve ser de, pelo menos, 3000 mm², tanto para a área do dessecante, quanto para a área de abertura do copo. Os copos testes são formados por um CAP de PVC de DN 100 mm com um cano de mesmo diâmetro e material na sua parte interna (Figura 32-c);
- b) Câmara com umidade e temperatura controlada (Figura 32-b): a umidade relativa deve permanecer em 50 ± 2 % e a temperatura deve ser determinada de acordo com a aplicação do material e conforme as condições padrões apresentadas na norma. A temperatura seguiu o procedimento A da norma com valor de 23 °C. Para manter a umidade em 50% foi utilizada uma solução salina saturada de nitrato de magnésio (Mg(NO₃)₂) disposta em uma bandeja abaixo da mesa de suporte das amostras e, também, utilizou-se sílica gel (em potes sobre a mesa de suporte) para reduzir as variações de umidade decorrentes da abertura da câmara. A umidade e a temperatura foram medidas frequentemente e registradas, pelo menos, toda vez que as amostras foram pesadas, com o auxílio de um termo-higrômetro;

- c) Dessecante: o dessecante utilizado foi o cloreto de cálcio (CaCl_2) anidro em pequenos pedaços que passam em uma peneira de abertura de 2,36 mm. Este sal induz uma umidade relativa de, aproximadamente, 0%;
- d) Selante: deve ser altamente resistente a passagem de vapor e não deve perder ou ganhar peso durante o ensaio. A lateral das amostras foi impermeabilizada com o selante batida de pedra, que é muito utilizada no chassi de veículos, enquanto que para selar as bordas do material no copo teste foi utilizado silicone.

Figura 32 – Câmara de Permeabilidade ao Vapor: (a) representação esquemática da câmara do ensaio, (b) vista superior da câmara e (c) copo teste com a amostra



Fonte: própria da autora

As amostras devem ser representativas do material testado. Se o material é utilizado em apenas uma posição ou quando as suas faces são indistinguíveis, 3 amostras são testadas. Já se o material possuir faces diferentes, sendo que ambos os lados podem estar em contato com um fluxo de vapor, 4 amostras devem ser testadas, onde 2 delas são ensaiadas para uma direção de fluxo e as outras 2 com o fluxo no sentido contrário. Por isso, foram ensaiados 3 corpos de prova de cada combinação da argamassa de acabamento (totalizando 18 corpos de prova) e 4 amostras para a combinação de argamassa de base e cada um dos seis tipos de acabamento (representando um total de 24 amostras).

Após os 28 dias de cura dos corpos de prova, eles foram mantidos dentro da câmara climatizada nas condições de temperatura e umidade do ensaio até a data de iniciá-lo. As amostras foram preparadas, com as medições das espessuras e dos diâmetros e suas laterais foram seladas. Também foi aplicada fita crepe nas faces das amostras para tentar igualar os diâmetros das duas faces das amostras para compensar o diâmetro perdido devido à aplicação do silicone para selar as amostras no copo teste (Figura 32 – c).

Iniciou-se o procedimento do ensaio adicionando o dessecante nos copos testes a uma altura de, aproximadamente, 2 cm. Em seguida a amostra foi posicionada no copo e selada, deixando um espaço livre (aproximadamente 7 mm) entre a amostra e o dessecante, para que

ao sacudir o copo seja possível misturar o dessecante. Após esta etapa o copo teste foi pesado e, imediatamente, colocado na câmara de permeabilidade, iniciando o ensaio. Então, foram realizadas pesagens periódicas, nas quais os copos foram retirados da câmara, um por vez, pesados e agitados e retornam para a câmara logo em seguida.

6.4.4 Ensaio de análise colorimétrica

As amostras expostas ao ambiente urbano de Porto Alegre/RS foram avaliadas quanto a sua capacidade de autolimpeza. Para isso, foram realizados registros fotográficos e análise colorimétrica com o uso de um espectrofotômetro, ambas realizadas nos mesmos intervalos de tempos.

Os registros fotográficos foram realizados com a câmera de um celular Samsung Galaxy S9 posicionada verticalmente a uma distância de, aproximadamente, 18 cm das amostras. Foi utilizada uma câmara de madeira com luz led, conforme a Figura 33, com a mínima presença de luz externa de forma a padronizar a posição das amostras e a observação das variações de cor. As configurações da câmera são: resolução de 12 megapixels (resolução de 4032 x 3024 pixels), ISO 320, abertura focal de 1.5, exposição de 1/250 e uma temperatura de cor na escala Kelvin de 5800 K. Configurações estas que mais se aproximavam à percepção visual das amostras.

Figura 33 – Vista superior da câmara de iluminação, com o furo onde a câmera é encaixada



Fonte: própria da autora

As análises colorimétricas foram realizadas a partir dos dados obtidos com o uso de um espectrofotômetro portátil do modelo Konica Minolta CM-2500d, um instrumento que mede a luz refletida de um objeto em cada comprimento de onda. Estes dados são as coordenadas

cromáticas de cor para cada ponto medido. Para isso, foi utilizado um molde para a medição de 5 pontos por amostra de argamassa (Figura 34), sendo que o canto superior esquerdo era fixo de modo a realizar as leituras nos mesmos lugares em cada amostra. Estes pontos são centralizados e estão a uma distância das bordas de, aproximadamente, 2 cm, de forma a se evitar qualquer interferência nos resultados devido à deformação ou alteração das bordas em decorrência do posicionamento no suporte. Evitou-se, ainda, fazer as fotografias e a coleta de dados em dias chuvosas ou quando as amostras ainda poderiam estar molhadas, pois a umidade é um fator que poderia alterar a tonalidade da cor obtida.

Figura 34 – Placa de argamassa com o molde para as medições com o espectrofotômetro

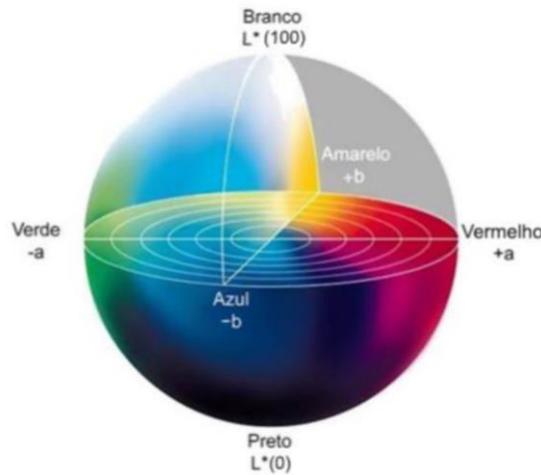


Fonte: própria da autora

As coordenadas cromáticas foram medidas de acordo com o sistema CIELAB (CIE $L^*a^*b^*$) definido pela Comissão Internacional da Iluminação (CIE). Neste sistema, as cores formam um espaço tridimensional (Figura 35) e são expressas em coordenadas $L^*a^*b^*$ que representam:

- a) L^* : luminosidade ou brilho, em uma escala que varia entre 0 (preto) e 100 (branco);
- b) a^* : coordenada que mostra a intensidade de cor, variando entre vermelho (+a) e verde (-a);
- c) b^* coordenada que mostra a intensidade de cor, variando entre amarelo (+b) e azul (-b).

Figura 35 – Sólido do espaço de cores L*a*b*



Fonte: adaptado de MINOLTA⁴, 1998 *apud* PASSUELO, 2003.

Para determinar a variação de cor ao longo do tempo (ΔE), é utilizada a equação (6) que representa a distância entre dois pontos de cor, um no tempo inicial (t_0) e outro no tempo t . Assim, foram realizadas leituras das coordenadas L*a*b* de 5 pontos por placa para as idades de 0 (cor original - sem manchamento), 1 (início de exposição – com manchamento), 5, 7, 9, 14, 23 e 28 dias de exposição ao ambiente natural. Calculou-se, então, o valor de ΔE , tomando o tempo t como a idade de 28 dias e o tempo t_0 como a idade de 1 dia.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad \text{onde,} \quad (6)$$

$$\Delta L^* = L_t^* - L_{t_0}^* \quad (7)$$

$$\Delta a^* = a_t^* - a_{t_0}^* \quad (8)$$

$$\Delta b^* = b_t^* - b_{t_0}^* \quad (9)$$

O sistema CIELAB é muito utilizado, pois, segundo o próprio fabricante do espectrofotômetro, ele correlaciona os valores de cor com a percepção individual de forma consistente. Ainda, de acordo com Mokrzycki e Tatol (2011), um observador padrão consegue perceber diferença de cor quando os valores de ΔE estão entre 2 e 3,5, sendo que valores acima de 5 representam a percepção de duas cores diferentes, enquanto que valores entre 0 e 1 não é possível notar diferença de cor.

⁴ MINOLTA. Precise color communication: color control from perception to instrumentation. Japão: Minolta Co. Ltd., 1998.

7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, estão apresentados os resultados dos ensaios realizados para a caracterização das argamassas nos estados fresco e endurecido, conforme o programa experimental. Com relação à avaliação da capacidade autolimpante, são apresentados os resultados visualizados a partir dos registros fotográficos e dos dados obtidos no ensaio colorimétrico, por meio do espectrofotômetro portátil. Também foi possível realizar a análise estatística na maioria dos resultados dos ensaios através do software Statistica 7.0, por meio da Análise de Variância (ANOVA).

Assim como mencionado anteriormente, a denominação das argamassas é realizada conforme a Tabela 4 para as argamassas de acabamento e como “Base” para a argamassa que serviu como base para os acabamentos.

7.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Abaixo são apresentados os resultados dos ensaios para as argamassas no estado fresco. Os dados obtidos nos ensaios podem ser visualizados no Apêndice A.

7.1.1 Índice de consistência

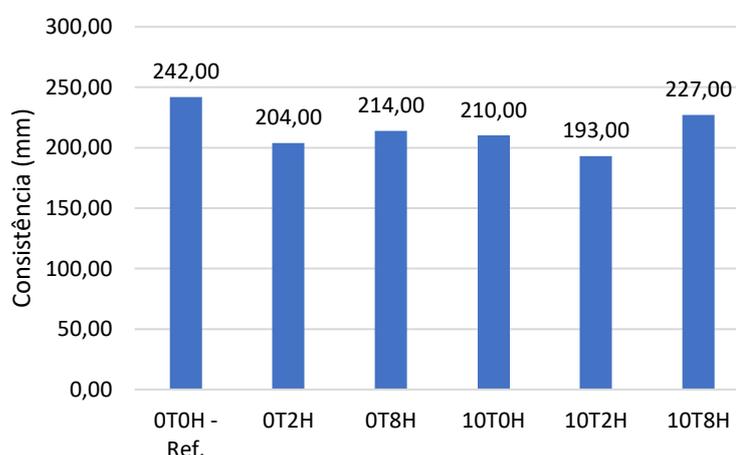
Para as moldagens das argamassas foram empregadas as quantidades mínimas de água indicada pelos fabricantes, resultando em uma relação a/c fixa de 0,14 para a argamassa de base e de 0,45 para as argamassas de acabamento. A Tabela 6 e a Figura 36 apresentam os resultados médios obtidos a partir de três medições do índice de consistência. Percebe-se que a adição do TiO_2 e do hidrofugante reduziram o índice de consistência das argamassas em comparação com a argamassa referência. Inclusive, apresentando comportamento oposto àquele indicado pelo fabricante do aditivo hidrofugante. A Tabela 7 demonstra, estatisticamente, a influência significativa desses materiais nas argamassas, tanto no efeito individual quanto em conjunto.

Tabela 6 – Índices de consistência médios para as diferentes argamassas de acabamento e de base no estado fresco

| Denominação | Média (mm) | Desvio padrão (mm) | Coefficiente de variação (%) |
|-------------|------------|--------------------|------------------------------|
| Base | 224,00 | 6,45 | 2,88 |
| 0T0H - Ref. | 242,00 | 2,16 | 0,89 |
| 0T2H | 204,00 | 5,44 | 2,66 |
| 0T8H | 214,00 | 0,94 | 0,44 |
| 10T0H | 210,00 | 1,25 | 0,59 |
| 10T2H | 193,00 | 2,62 | 1,36 |
| 10T8H | 227,00 | 4,97 | 2,19 |

Fonte: própria da autora.

Figura 36 – Índice de consistência para as argamassas de acabamentos no estado fresco



Fonte: própria da autora.

Tabela 7 – ANOVA para o índice de consistência

| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO ₂ (%) [A] | 450,0 | 1 | 450,0 | 26,38 | 0,000246 | Sim |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 2443,0 | 2 | 1221,5 | 71,62 | 0,000000 | Sim |
| A x B | 1566,3 | 2 | 783,2 | 45,92 | 0,000002 | Sim |
| Erro | 204,7 | 12 | 17,1 | | | |

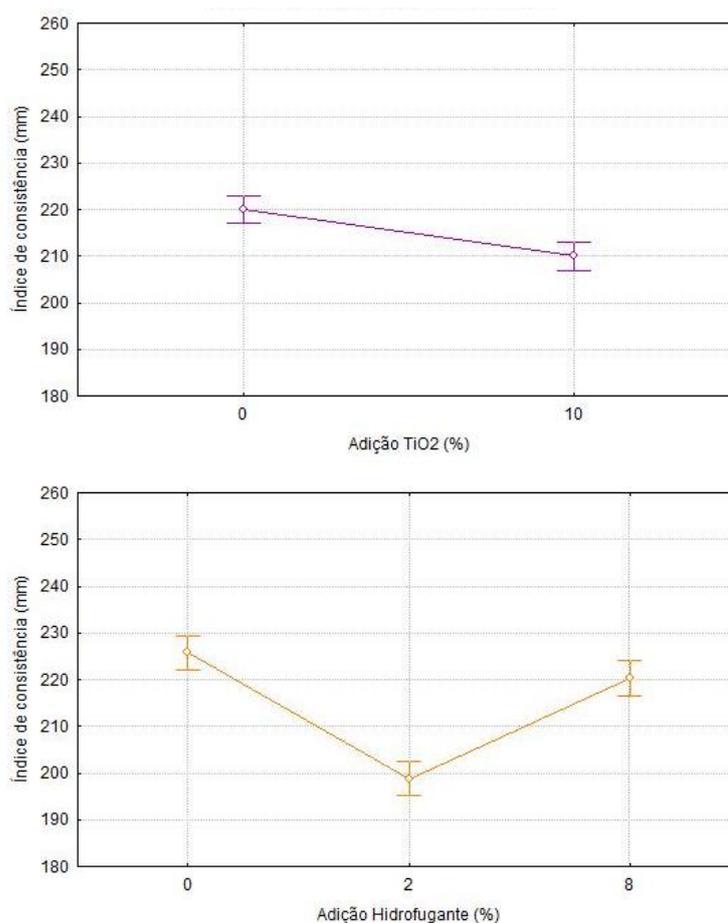
Fonte: própria da autora.

Austria (2015) também verificou uma redução no índice de consistência em argamassas com a adição do dióxido de titânio, havendo a necessidade de se adicionar uma maior quantidade de água para atingir uma determinada consistência, já que há a adição de um material fino. Assim, pode-se verificar que a adição de 10% de TiO₂ torna a argamassa menos

trabalhável em comparação com a referência para uma mesma relação água/cimento, conforme a Figura 37-a.

Com relação ao aditivo, Biehl *et al.* (2018) verificaram um índice de consistência de argamassas com adição de hidrofugantes líquidos superior ao valor atingido pela argamassa de referência. Gasques *et al.* (2017) também observou um aumento na fluidez das argamassas devido à adição de um aditivo hidrofugante, efeito oposto àquele observado neste trabalho. O comportamento observado pode ser devido à utilização de um aditivo hidrofugante em pó com granulometria fina, diferentemente dos aditivos utilizados nos trabalhos citados. É possível notar, pela Figura 37-b, que as argamassas com adição de 2% de hidrofugante possuem menores índices de consistência em comparação com àquelas com adição de 8%, sendo ambas menores que o valor obtido para a argamassa de referência.

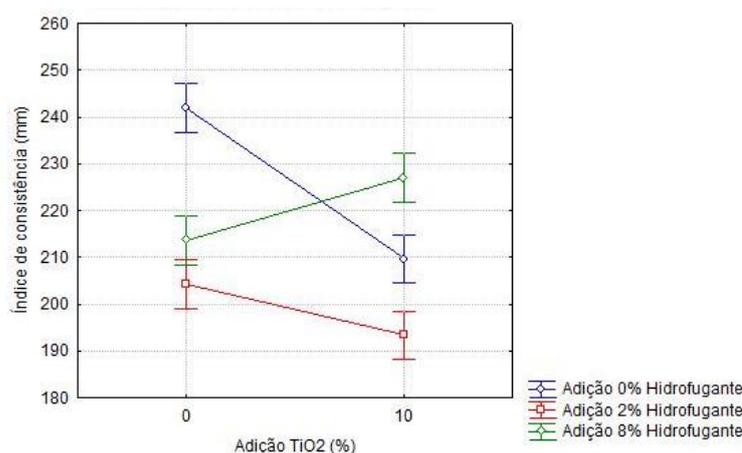
Figura 37 – Efeito isolado, em relação ao índice de consistência, das adições de: (a) TiO_2 e (b) hidrofugante



Fonte: própria da autora.

Na Figura 38, pode-se observar o efeito combinado da adição de TiO_2 e do hidrofugante, onde as argamassas com a adição da quantidade mínima do aditivo (2%) apresentaram os menores valores de índice de consistência.

Figura 38 – Efeito da combinação dos fatores de adição de TiO_2 e de adição de hidrofugante em relação ao índice de consistência

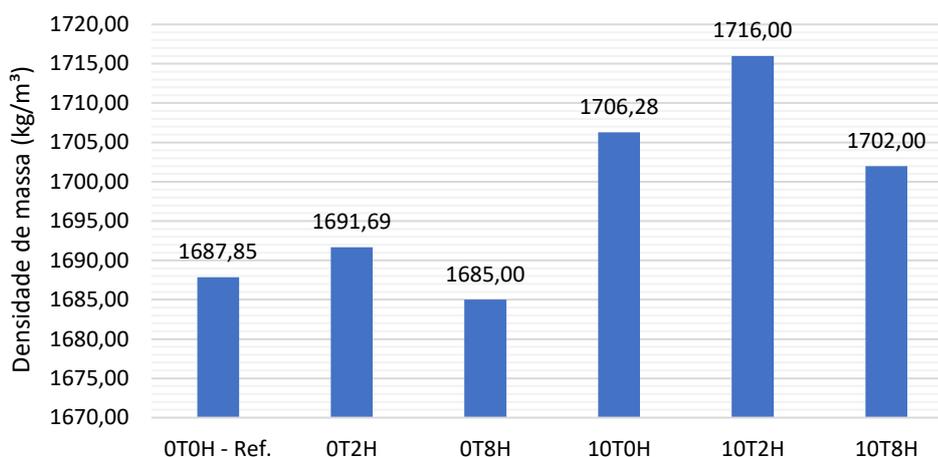


Fonte: própria da autora.

7.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

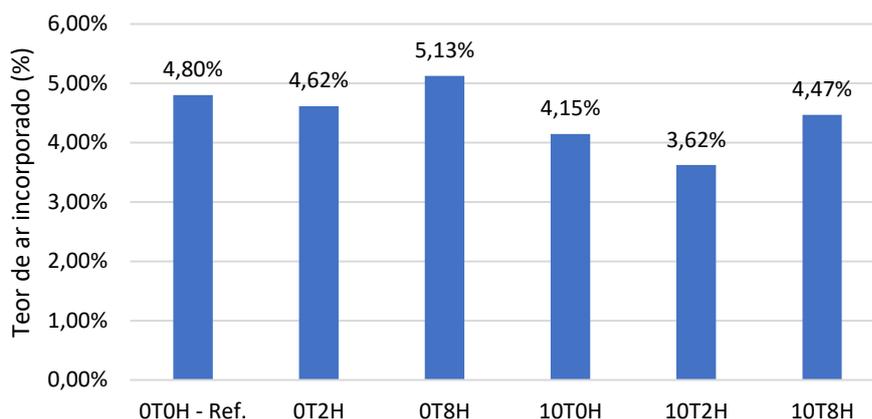
Os valores referentes à densidade de massa e ao teor de ar incorporado estão apresentados nas Figuras 39 e 40. É possível verificar que a adição do dióxido de titânio resulta em um aumento da densidade de massa das argamassas no estado fresco e uma redução no teor de ar incorporado, como era esperado. Este resultado é coerente e também foi verificado por Austria (2015). A adição de um material fino como o TiO_2 nas argamassas auxilia no fechamento dos poros do material, diminuindo o teor de ar incorporado. Além disso, a massa específica obtida para o dióxido de titânio foi de $3,91 \text{ g/cm}^3$, maior que as dos demais materiais, tornando a mistura mais densa.

Figura 39 – Densidade de massa para as argamassas de acabamentos no estado fresco



Fonte: própria da autora.

Figura 40 – Teor de ar incorporado para as argamassas de acabamentos no estado fresco



Fonte: própria da autora.

Como mencionado anteriormente, um efeito secundário do hidrofugante é aumentar o teor de ar incorporado, resultando em menor densidade e melhor trabalhabilidade. Tal comportamento não pode ser verificado. Apesar disso, as adições mínima e máxima de aditivo demonstram o mesmo comportamento anterior, no qual valores maiores de densidade de massa apresentam menores teores de ar incorporado.

7.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

A seguir estão descritos os resultados obtidos para as argamassas no estado endurecido, com os valores detalhados dos resultados dos ensaios disponíveis no Apêndice B.

7.2.1 Densidade de massa aparente

Os valores médios da densidade de massa aparente estão apresentados na Tabela 8. Estes resultados tem comportamento semelhante ao obtido na densidade de massa no estado fresco. Entretanto, o valor para a argamassa 0T2H apresenta-se superior aos valores resultantes para as argamassas com adição de dióxido de titânio (10T0H e 10T8H).

Tabela 8 – Densidades de massa aparente (kg/m^3) médias para as diferentes argamassas de acabamento e de base aos 28 dias de idade

| Denominação | Média (kg/m^3) | Desvio Padrão (kg/m^3) | Coefficiente de variação (%) |
|-------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Base | 1476,67 | 0,0013 | 0,00009 |
| 0T0H - Ref. | 1331,33 | 0,0068 | 0,00051 |
| 0T2H | 1378,33 | 0,0019 | 0,00014 |
| 0T8H | 1358,67 | 0,0134 | 0,00099 |
| 10T0H | 1375,67 | 0,0153 | 0,00111 |
| 10T2H | 1404,33 | 0,0061 | 0,00044 |
| 10T8H | 1364,67 | 0,0274 | 0,00201 |

Fonte: própria da autora.

A partir da análise de variância, verifica-se a influência significativa da adição individual do dióxido de titânio ou do aditivo hidrofugante, sendo que o efeito conjunto dos mesmos não se mostrou influente para a densidade de massa aparente.

Tabela 9 – ANOVA para a densidade de massa aparente

| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|----------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO_2 (%) [A] | 2913,38889 | 1 | 2913,3889 | 9,30 | 0,010083 | Sim |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 4756,33333 | 2 | 2378,1667 | 7,59 | 0,007393 | Sim |
| A x B | 1102,77778 | 2 | 551,3889 | 1,76 | 0,213553 | Não |
| Erro | 3758,00000 | 12 | 313,1667 | | | |

Fonte: própria da autora.

7.2.2 Resistência à tração na flexão e à compressão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com 3 corpos de prova por combinação de acabamento e, para cada metade dessas amostras rompidas, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial, ambos aos 28 dias de cura das argamassas. Os valores médios obtidos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resistências à tração na flexão e à compressão axial médias para as diferentes argamassas de acabamento e de base aos 28 dias de idade

| Denominação | Tração | | | Compressão | | |
|-------------|-------------|---------------------|------------------------------|-------------|---------------------|------------------------------|
| | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coefficiente de variação (%) | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coefficiente de variação (%) |
| Base | 1,6 | 0,15 | 9,34 | 3,3 | 0,45 | 13,78 |
| OT0H - Ref. | 1,2 | 0,13 | 10,56 | 2,7 | 0,30 | 11,09 |
| OT2H | 1,4 | 0,14 | 10,24 | 2,4 | 0,26 | 10,68 |
| OT8H | 1,4 | 0,07 | 4,96 | 2,6 | 0,27 | 10,73 |
| 10T0H | 1,5 | 0,02 | 1,32 | 2,9 | 0,29 | 10,16 |
| 10T2H | 1,3 | 0,13 | 10,39 | 3,0 | 0,36 | 12,01 |
| 10T8H | 1,4 | 0,13 | 8,66 | 3,1 | 0,30 | 9,72 |

Fonte: própria da autora.

A partir da análise de variância foi possível verificar que para a resistência à tração (Tabela 11), os efeitos individuais e em conjunto da adição do TiO_2 e do aditivo hidrofugante não possuem influência significativa. Já para a ANOVA dos resultados de resistência à compressão (Tabela 12), apenas há significância estatística no efeito da porcentagem de adição do dióxido de titânio nas argamassas.

Tabela 11 – ANOVA para a resistência à tração na flexão

| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|--------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO_2 (%) [A] | 0,1 | 1 | 0,1 | 2,48 | 0,141302 | Não |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 0,0 | 2 | 0,0 | 0,00 | 0,999685 | Não |
| A x B | 0,1 | 2 | 0,1 | 1,73 | 0,218118 | Não |
| Erro | 0,4 | 12 | 0,0 | | | |

Fonte: própria da autora.

Tabela 12 – ANOVA para a resistência à compressão axial

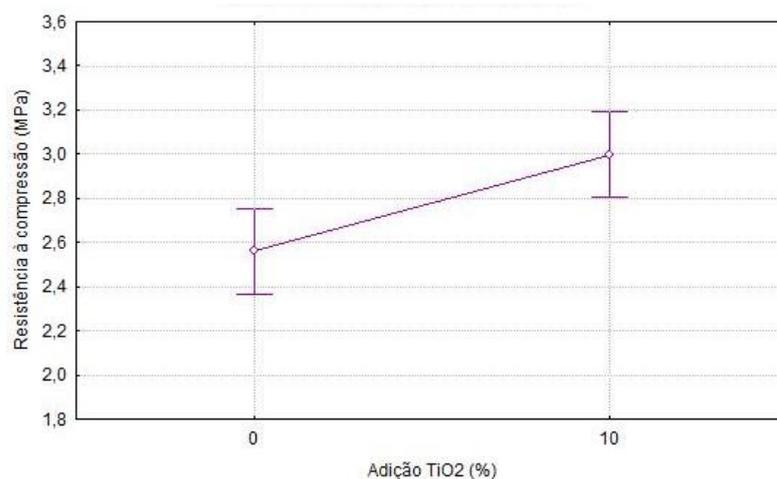
| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|--------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO_2 (%) [A] | 0,9 | 1 | 0,9 | 12,14 | 0,004509 | Sim |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 0,0 | 2 | 0,0 | 0,22 | 0,802088 | Não |
| A x B | 0,1 | 2 | 0,1 | 1,02 | 0,389558 | Não |
| Erro | 0,8 | 12 | 0,1 | | | |

Fonte: própria da autora.

Pela Figura 41, é constatada que a resistência à compressão axial das argamassas com adição de 10% TiO_2 é maior do que aquelas sem adição deste material. Os trabalhos de Austria (2015), Treviso (2016) e Casarin (2019) também verificaram o aumento da resistência devido

à presença do dióxido de titânio, mas também foi observado uma queda da resistência com o aumento da quantidade de TiO_2 em argamassas com adição de 10% em comparação com as de 5%. Como mencionado anteriormente, o TiO_2 atua fechando os poros do material, o que contribui para o aumento da resistência.

Figura 41 – Efeito isolado da adição de TiO_2 para a resistência à compressão



Fonte: própria da autora.

Diferentemente do que foi observado por Gava *et al.* (2016), que demonstrou que argamassas com aditivo hidrofugante apresentam as maiores resistências, neste trabalho a adição do aditivo não se mostrou significativa.

7.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico

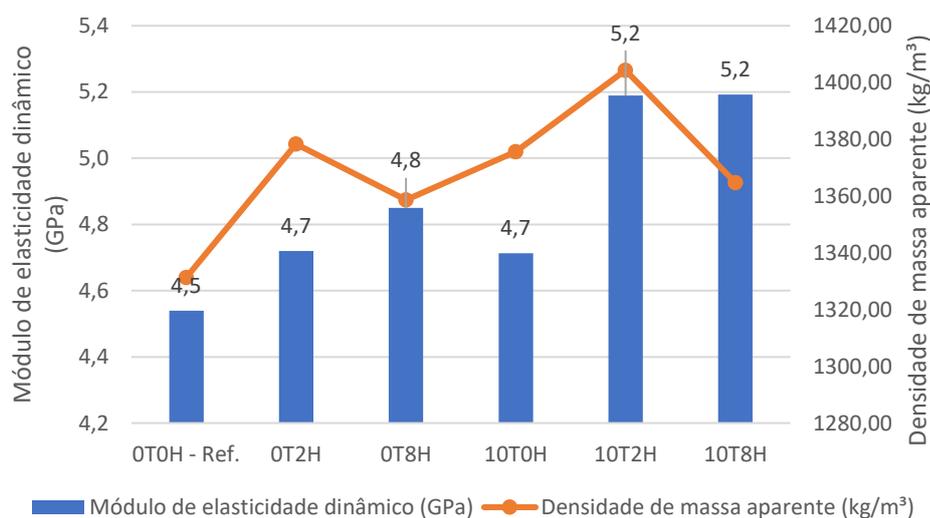
Este ensaio foi realizado aos 28 dias das argamassas e os resultados médios obtidos estão apresentados na Tabela 13 e na Figura 42.

Tabela 13 –Módulos de elasticidade dinâmico médios para as diferentes argamassas de acabamento e de base aos 28 dias de idade

| Denominação | Média (GPa) | Desvio padrão (GPa) | Coefficiente de variação (%) |
|-------------|-------------|---------------------|------------------------------|
| Base | 9,4 | 0,29 | 3,11 |
| 0T0H - Ref. | 4,5 | 0,13 | 2,88 |
| 0T2H | 4,7 | 0,05 | 1,01 |
| 0T8H | 4,8 | 0,02 | 0,50 |
| 10T0H | 4,7 | 0,05 | 0,97 |
| 10T2H | 5,2 | 0,02 | 0,48 |
| 10T8H | 5,2 | 0,19 | 3,58 |

Fonte: própria da autora.

Figura 42 – Módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas de acabamentos



Fonte: própria da autora.

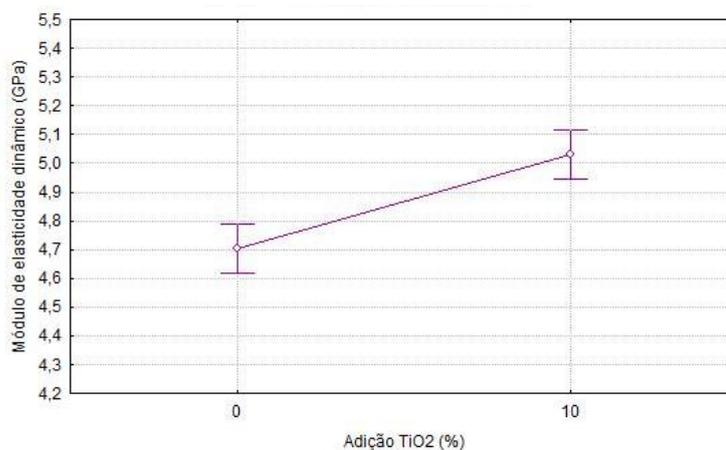
De modo geral os resultados estão coerentes, pois quanto maior a densidade de massa, maiores são os valores do módulo de elasticidade dinâmico. Por meio da análise estatística apresentada na Tabela 14, constata-se que a adição individual do TiO_2 ou do aditivo resulta em uma influência significativa nas argamassas. Porém, não há significância estatística nas argamassas com a combinação das duas adições. Na Figura 43, estão demonstrados os efeitos isolados da adição do TiO_2 (Figura 43 – a) e da adição do hidrofugante (Figura 43 – b).

Tabela 14 – ANOVA para o módulo de elasticidade dinâmico

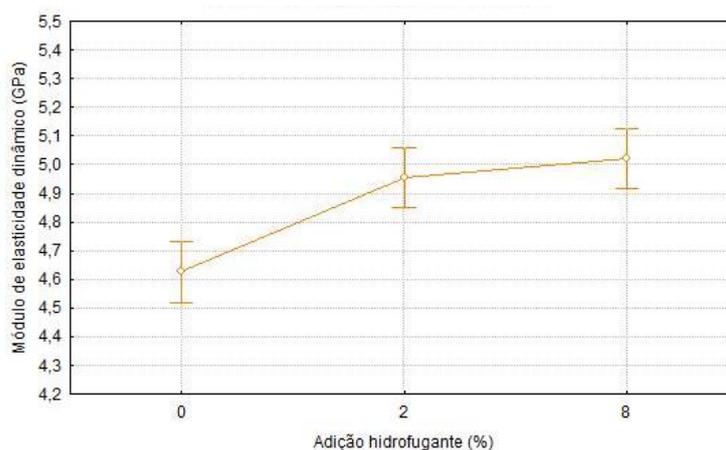
| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO ₂ (%) [A] | 0,5 | 1 | 0,5 | 34,10 | 0,000080 | Sim |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 0,5 | 2 | 0,3 | 18,81 | 0,000200 | Sim |
| A x B | 0,1 | 2 | 0,0 | 2,33 | 0,139702 | Não |
| Erro | 0,2 | 12 | 0,0 | | | |

Fonte: própria da autora.

Figura 43 – Efeito isolado, em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, das adições de: (a) TiO₂ e (b) hidrofugante



(a)



(b)

Fonte: própria da autora.

É possível perceber que as argamassas com adições de TiO₂ e de hidrofugante apresentam módulo maior que a argamassa de referência. Sabe-se que o módulo de elasticidade

está relacionado com a capacidade das argamassas em absorver deformações, sendo que, quanto menor o seu módulo, maior a sua capacidade. Assim, verifica-se que a argamassa de referência apresenta maior capacidade de absorver possíveis deformações.

As argamassas com adição do hidrofugante apresentaram maior módulo de elasticidade, diferente do que foi verificado por Biehl *et al.* (2018), onde as argamassas com aditivo obtiveram o módulo reduzido em comparação à referência. Treviso (2016) trabalhou com uma argamassa de cimento CPB-40 Estrutural de traço 1:3 obtendo valores de resistência à compressão na faixa de 37 a 45 MPa e de tração de, aproximadamente, 6 MPa, com módulo de elasticidade entre 38 e 41 GPa.

Austria (2015) utilizou o mesmo tipo de cimento que Treviso (2016) com os traços 1:3 e 1:2 e obteve valores semelhantes: resistência à compressão em torno de 30 MPa (traço 1:3) e variando de 41 a 51 MPa (traço 1:2), resistência à tração próximo dos 5 MPa e módulo de elasticidade entre 24 e 33 GPa. Casarin (2019), também utilizou um cimento CPB-40 Estrutural com traço de 1:4, obtendo valores na faixa dos 18 GPa para o módulo das argamassas de acabamento, com resistência à compressão variando de 15 a 18 MPa e a tração em torno de 18 MPa. A partir disso, pode-se verificar que os valores obtidos neste trabalho são menores do que os resultados encontrados em outras pesquisas, mas que estão condizentes, pois obteve-se menores valores de resistência, com, aproximadamente, 1,4 MPa para tração e 2,8 MPa para compressão.

7.2.4 Absorção de água por capilaridade

Os resultados médios dos coeficientes de capilaridade obtidos, assim como a absorção média aos 10 minutos e aos 90 minutos de ensaio estão apresentados na Tabela 15, tendo sido obtidos aos 28 dias de cura das argamassas de acordo com a NBR 15259:2005.

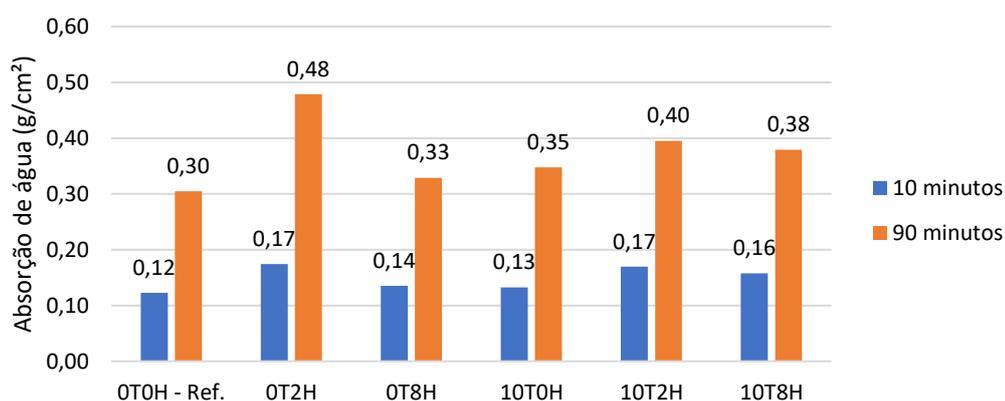
Tabela 15 – Absorção por capilaridade aos 10 e 90 minutos e o coeficiente de capilaridade médios para as diferentes argamassas de acabamento e de base aos 28 dias de idade

| Denominação | Absorção média 10 min (g/cm ²) | Absorção média 90 min (g/cm ²) | Coeficiente de capilaridade médio (g/dm ² .min ^{1/2}) | Desvio padrão do coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2}) | Coeficiente de variação do coeficiente de capilaridade (%) |
|-------------|--|--|--|---|--|
| Base | 0,17 | 0,29 | 1,9 | 0,12 | 6,23 |
| 0T0H - Ref. | 0,12 | 0,30 | 2,9 | 0,27 | 9,21 |
| 0T2H | 0,17 | 0,48 | 4,9 | 0,43 | 8,79 |
| 0T8H | 0,14 | 0,33 | 3,1 | 0,33 | 10,65 |
| 10T0H | 0,13 | 0,35 | 3,4 | 0,35 | 10,22 |
| 10T2H | 0,17 | 0,40 | 3,6 | 0,36 | 9,90 |
| 10T8H | 0,16 | 0,38 | 3,6 | 0,35 | 9,96 |

Fonte: própria da autora.

Observou-se, pela Figura 44, que os valores de absorção ficaram bem próximos para todas as argamassas, sendo que a argamassa de referência apresentou os menores valores de absorção, tanto aos 10 minutos quando aos 90 minutos. Para entender o comportamento dos corpos de prova foi realizada a análise estatística (Tabela 16) para o coeficiente de capilaridade que demonstrou que não há significância estatística na adição do TiO₂. Outros trabalhos, como o de Austria (2015), verificaram que a absorção aumentava de acordo com o teor de dióxido de titânio adicionado.

Figura 44 – Absorção de água aos 10 e 90 minutos para as argamassas de acabamentos



Fonte: própria da autora.

Tabela 16 – ANOVA para o coeficiente de capilaridade

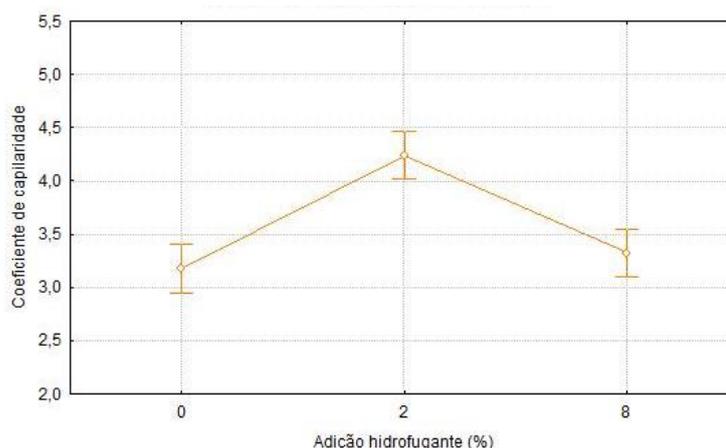
| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO ₂ (%) [A] | 0,1 | 1 | 0,1 | 0,50 | 0,485691 | Não |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 8,0 | 2 | 4,0 | 26,99 | 0,000000 | Sim |
| A x B | 6,1 | 2 | 3,1 | 20,62 | 0,000002 | Sim |
| Erro | 4,4 | 30 | 0,1 | | | |

Fonte: própria da autora.

A absorção é uma característica muito importante para a análise de hidrofugantes. Segundo Maranhão (2009), quanto maior a quantidade de materiais ativos (radicais apolares), menor será a absorção provocada por hidrofugantes, já que existem mais radicais apolares recobrando os poros capilares. Tal comportamento pode ser visualizado na Figura 45, onde o teor de 2% de aditivo apresenta maior absorção que o teor de 8%. Gava *et al.* (2016) também verificou uma redução na absorção com o aumento do teor de aditivo. Isso demonstra a necessidade de estudar o comportamento do aditivo em conjunto com a argamassa para determinar o traço ideal para cumprir a sua correta função.

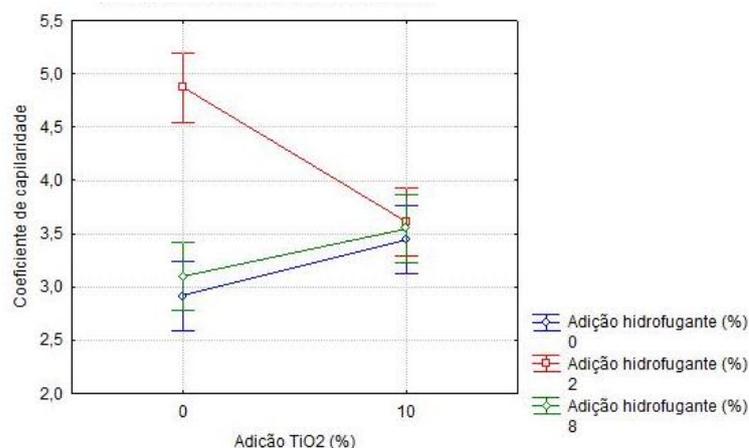
Tal comportamento já não foi observado para as argamassas com 2% e 8% de hidrofugante e com adição de TiO₂, apresentando valores muito próximos e sem influência significativa, conforme apresentado na Figura 46.

Figura 45 – Efeito isolado da adição de hidrofugante em relação ao coeficiente de capilaridade



Fonte: própria da autora.

Figura 46 – Efeito combinado, em relação ao coeficiente de capilaridade, das adições de: (a) TiO_2 e (b) hidrofugante



Fonte: própria da autora.

Em resumo, nota-se pouca diferença entre a utilização de uma argamassa com teor de 8% de hidrofugante e a argamassa sem aditivo, apresentando valores similares nas argamassas com adição de 0% (0T0H com $2,9 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ e 0T8H com $3,1 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) e 10% (10T0H com $3,4 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ e 10T8H com $3,6 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) de TiO_2 .

De modo geral, os valores encontrados, para argamassas com hidrofugantes, são menores do que aqueles obtidos por Biehl *et al.* (2018) para argamassas com cimento CP II F-32 (Cimento Portland Composto com Filler) e cal hidratada do tipo CH I com adição de hidrofugante, que se encontram próximos de $12,9 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Já com relação aos resultados obtidos por Salomão (2016), com argamassas de cimento CP V-ARI, cal hidratada e adição de aditivo hidrofugante, incorporador de ar e polímero superabsorvente, os menores valores de absorção registrados foram para as argamassas com hidrofugantes, na faixa de 0,1 e 0,3 $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, sendo menores do que os resultados verificados neste trabalho.

7.2.5 Determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial

Em complemento à norma brasileira vigente que avalia a absorção de água por capilaridade de argamassas durante um período de 90 minutos, foi realizado o ensaio para a determinação da absorção de água por imersão parcial pela ISO 15148:2016 por um período de 24 horas, com os resultados médios disposto na Tabela 17.

Tabela 17 – Coeficientes de absorção de água por imersão parcial médios para as diferentes argamassas de acabamento e de base aos 28 dias de idade

| Denominação | Coef. Absorção médio (kg/m ² .s ^{1/2}) | Desvio padrão (kg/m ² .s ^{1/2}) | Coefficiente de variação (%) |
|-------------|---|--|------------------------------|
| 0T0H - Ref. | 0,037 | 0,0050 | 13,40 |
| 0T2H | 0,045 | 0,0011 | 2,54 |
| 0T8H | 0,041 | 0,0030 | 7,36 |
| 10T0H | 0,040 | 0,0044 | 10,91 |
| 10T2H | 0,036 | 0,0065 | 18,13 |
| 10T8H | 0,040 | 0,0026 | 6,55 |

Fonte: própria da autora.

Diferentemente do que foi obtido para a absorção por capilaridade pela norma NBR 15259:2005, o efeito individual da adição do hidrofugante não se apresentou significativo pela análise estatística (Tabela 18). Este resultado não era esperado, já que o hidrofugante age diretamente na absorção de água líquida.

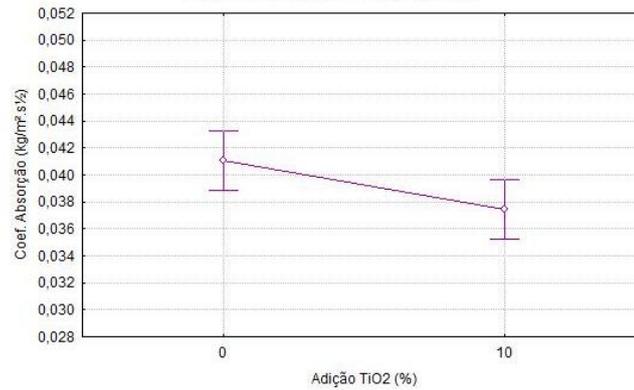
Tabela 18 – ANOVA para o coeficiente de absorção de água por imersão parcial

| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO ₂ (%) [A] | 0,00012 | 1 | 0,00012 | 5,81 | 0,022262 | Sim |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 0,00004 | 2 | 0,00002 | 1,01 | 0,374732 | Não |
| A x B | 0,00018 | 2 | 0,00009 | 4,29 | 0,022909 | Sim |
| Erro | 0,00062 | 30 | 0,00002 | | | |

Fonte: própria da autora.

Já o efeito individual da adição do dióxido de titânio (Figura 47) se mostrou influente, havendo menor absorção de água nas argamassas com adição de 10% de TiO₂ em comparação àquelas sem adição. Este comportamento se demonstra contrário aos resultados obtidos por Austria (2015), mas similar com os trabalhos de Treviso (2016) e de Casarin (2019).

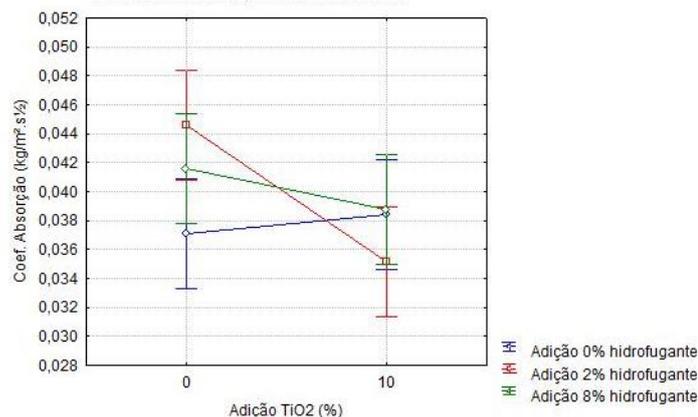
Figura 47 – Efeito isolado da adição de TiO₂ em relação ao coeficiente de absorção por imersão parcial



Fonte: própria da autora.

Analisando de forma conjunta o efeito das duas adições nas argamassas com seus diferentes teores (Figura 48), percebe-se um comportamento semelhante ao que foi relatado no Capítulo 7.2.4 (absorção por capilaridade pela norma brasileira) para as argamassas sem TiO₂. Apesar dos resultados mais próximos, pode-se verificar que o teor de 2% de aditivo apresentou valores maiores de absorção do que o teor de 8%, estando, este último, mais próximo do valor sem adição do hidrofugante. Já com relação as argamassas com teor de 10% de dióxido de titânio, observa-se que a adição de 2% apresentou menor absorção do que as quantidades de 0% e 8% de adição, diferente do que foi constatado anteriormente.

Figura 48 – Efeito combinado, em relação ao coeficiente de absorção, das adições de: (a) TiO₂ e (b) hidrofugante

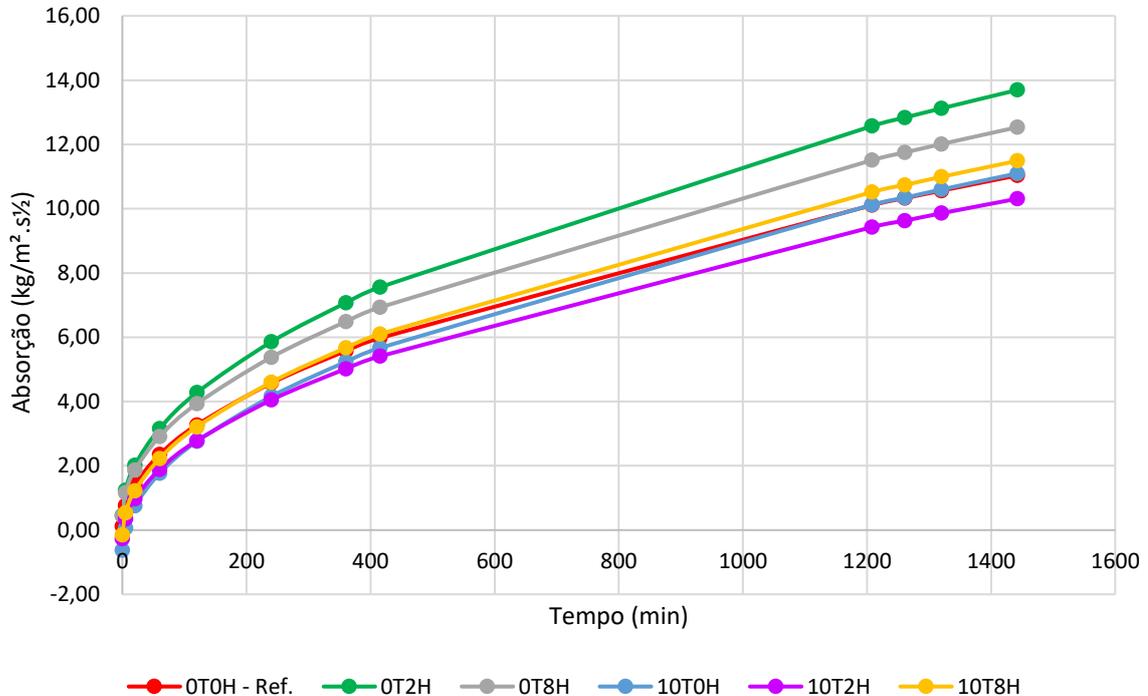


Fonte: própria da autora.

A partir da Figura 49 é possível verificar o gráfico resultante para a absorção por um período de 24 horas de imersão parcial. Observa-se que, durante todo o período, a argamassa com maior absorção é a 0T2H, com comportamento igual àquele verificado pela norma brasileira. Já a menor absorção é verificada para a argamassa 10T2H, que apresentou o segundo

maior valor de absorção pela NBR 15259. Com relação à argamassa de referência, o coeficiente de absorção pela NBR apresentou o menor valor, enquanto que pela norma ISO obteve-se o segundo menor valor.

Figura 49 – Absorção de água ao longo de 24 h para as argamassas de acabamentos



Fonte: própria da autora.

Em suma, pode-se verificar que a argamassa que apresentou o melhor comportamento quanto à absorção por capilaridade, pelos dois métodos de ensaio, foi a de referência, já que se deseja obter uma argamassa com reduzida capacidade de absorver água líquida.

Falchi *et al.* (2015) avaliou a influência de diferentes aditivos hidrofugantes no processo de hidratação do cimento de argamassas com cal e concluiu que todos os aditivos analisados causaram um atraso no processo de hidratação, indicando que a absorção dos estereatos do hidrofugante podem resultar na formação de uma camada hidrofóbica na superfície do clínquer, causando uma barreira para uma hidratação normal. Além disso, também foi verificado por Falchi *et al.* (2015) que os produtos à base de silanos e siloxanos apresentaram menor absorção por capilaridade, mas modificaram a estrutura do material em comparação com a referência, aumentando o volume de poros capilares.

7.2.6 Permeabilidade ao vapor

O ensaio de permeabilidade ao vapor seguiu o procedimento normativo da ASTM E96/E96M:2016. Na Tabela 19, é possível verificar os valores médios obtidos para a permeabilidade ao vapor das argamassas, bem como os resultados do fator de resistência à difusão de vapor de água (que é calculado pela relação entre a permeabilidade ao vapor de água do ar e a permeabilidade ao vapor de água do material) e da espessura de ar equivalente (que indica, em termos de permeabilidade, a espessura de uma camada de ar com característica equivalente a um material de determinada espessura).

Tabela 19 – Permeabilidade ao vapor, do fator de resistência e da espessura de ar equivalente médios para as diferentes argamassas de acabamento aos 28 dias de idade

| Denominação | CP | Sentido | Fator de resistência à difusão de vapor de água médio [μ] | Espessura de ar equivalente média [Sd] (m) | Permeabilidade [δ] média (kg/s.m.Pa) | Desvio padrão (kg/s.m.Pa) | Coefficiente de variação (%) |
|-------------|-----|----------|---|--|---|---------------------------|------------------------------|
| 0T0H | B+A | A p/cima | 12,09 | 0,36 | 1,65E-11 | 2,25E-12 | 13,65 |
| | B+A | B p/cima | 10,26 | 0,30 | 1,90E-11 | 1,54E-13 | 0,81 |
| 0T2H | B+A | A p/cima | 10,31 | 0,31 | 1,90E-11 | 7,24E-13 | 3,82 |
| | B+A | B p/cima | 11,14 | 0,34 | 1,88E-11 | 4,81E-12 | 25,65 |
| 0T8H | B+A | A p/cima | 11,14 | 0,34 | 1,75E-11 | 1,06E-12 | 6,02 |
| | B+A | B p/cima | 12,50 | 0,37 | 1,63E-11 | 3,36E-12 | 20,59 |
| 10T0H | B+A | A p/cima | 9,72 | 0,30 | 2,01E-11 | 9,02E-13 | 4,48 |
| | B+A | B p/cima | 11,35 | 0,36 | 1,72E-11 | 1,10E-13 | 0,64 |
| 10T2H | B+A | A p/cima | 11,02 | 0,33 | 1,83E-11 | 3,39E-12 | 18,50 |
| | B+A | B p/cima | 10,78 | 0,33 | 1,82E-11 | 1,29E-12 | 7,11 |
| 10T8H | B+A | A p/cima | 9,48 | 0,28 | 2,06E-11 | 1,98E-13 | 0,96 |
| | B+A | B p/cima | 10,88 | 0,31 | 1,80E-11 | 9,64E-13 | 5,36 |
| 0T0H | A | - | 6,54 | 0,15 | 2,99E-11 | 8,64E-13 | 2,89 |
| 0T2H | A | - | 7,44 | 0,18 | 2,63E-11 | 1,20E-12 | 4,56 |
| 0T8H | A | - | 7,06 | 0,17 | 2,77E-11 | 8,10E-13 | 2,92 |
| 10T0H | A | - | 6,71 | 0,16 | 2,91E-11 | 1,16E-12 | 3,98 |
| 10T2H | A | - | 6,70 | 0,16 | 2,92E-11 | 8,37E-13 | 2,87 |
| 10T8H | A | - | 6,65 | 0,16 | 2,94E-11 | 8,92E-13 | 3,03 |

Onde:

B - argamassa de base

A - argamassa de acabamento

Fonte: própria da autora.

Para este ensaio, foram realizadas duas análises: uma com um corpo de prova avaliando, em conjunto, a permeabilidade da base com uma camada de acabamento, com o fluxo de vapor em dois sentidos diferentes. Quando o acabamento está voltado para cima (com o fluxo de vapor no sentido: ambiente, acabamento, base, dessecante), avalia-se um fluxo proveniente do ambiente externo à edificação, enquanto que o fluxo oriundo da parte interna é avaliado com a camada de base para cima (com o fluxo de vapor no sentido: ambiente, base, acabamento, dessecante). A partir da ANOVA destas amostras (Tabela 20), verificou-se que nenhum dos

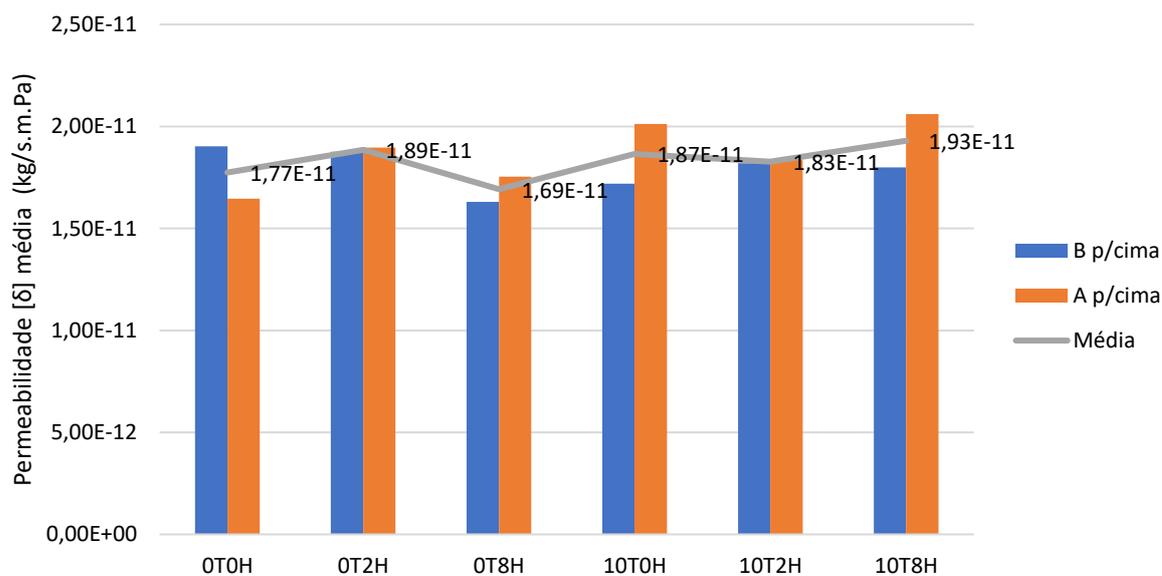
fatores possui influência significativa na permeabilidade, como também pode ser observado pela Figura 50, na qual a permeabilidade, nos dois sentidos de fluxo, apresenta valores muito próximos para todas as combinações de argamassa.

Tabela 20 – ANOVA para a permeabilidade ao vapor de água das amostras compostas por base e acabamento

| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO ₂ (%) [A] | 0,04871 | 1 | 0,04871 | 0,5293 | 0,480848 | Não |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 0,00939 | 2 | 0,00469 | 0,0510 | 0,950473 | Não |
| Material para cima [C] | 0,03416 | 1 | 0,03416 | 0,3712 | 0,553721 | Não |
| A x B | 0,08796 | 2 | 0,04398 | 0,4779 | 0,631369 | Não |
| A x C | 0,07727 | 1 | 0,07727 | 0,8397 | 0,377527 | Não |
| B x C | 0,04058 | 2 | 0,02029 | 0,2205 | 0,805311 | Não |
| A x B x C | 0,08265 | 2 | 0,04132 | 0,4491 | 0,648521 | Não |
| Erro | 1,10425 | 12 | 0,09202 | | | Não |

Fonte: própria da autora.

Figura 50 – Permeabilidade ao vapor média para as argamassas compostas por base e acabamento



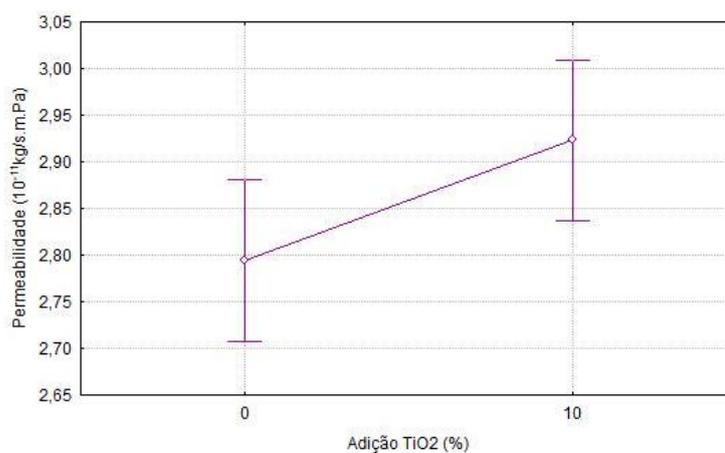
Fonte: própria da autora.

Outra análise foi realizada apenas para as amostras de argamassa de acabamento. Pela Tabela 21 verifica-se a significância estatística apenas para a adição de TiO₂, sendo que, pela Figura 51, nota-se que as argamassas sem adição de dióxido de titânio apresentam valores menores de permeabilidade ao vapor de água.

Tabela 21 – ANOVA para a permeabilidade ao vapor de água das amostras de acabamento

| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO ₂ (%) [A] | 0,0745 | 1 | 0,0745 | 5,25 | 0,040810 | Sim |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 0,0937 | 2 | 0,0468 | 3,30 | 0,072126 | Não |
| A x B | 0,1034 | 2 | 0,0517 | 3,64 | 0,058100 | Não |
| Erro | 0,1703 | 12 | 0,0142 | | | |

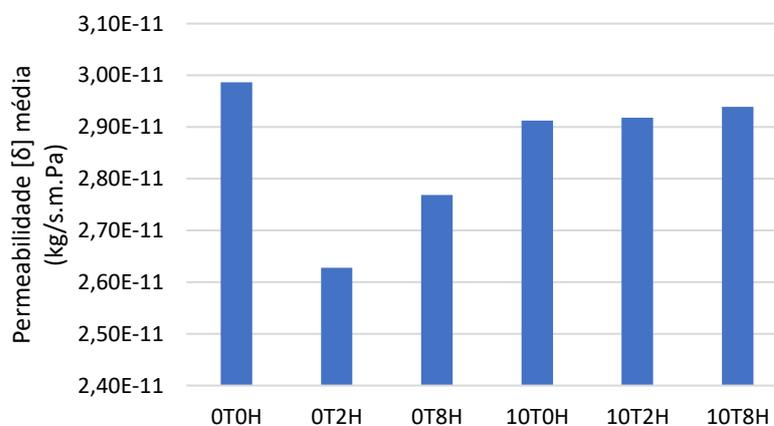
Fonte: própria da autora.

Figura 51 – Efeito isolado da adição de TiO₂ em relação à permeabilidade ao vapor de água

Fonte: própria da autora.

Observa-se, ainda, pela Figura 52, que a argamassa de referência apresentou o maior valor de permeabilidade, estando muito próximo dos resultados obtidos na presença de 10% de TiO₂.

Figura 52 – Permeabilidade ao vapor média para as argamassas de acabamentos



Fonte: própria da autora.

Os valores encontrados neste trabalho estão coerentes aos encontrados na bibliografia. Salomão (2016) analisou a permeabilidade ao vapor de argamassas com aditivos hidrofugantes, incorporadores de ar e com polímero super absorvente, verificando uma redução nos valores de permeabilidade naquelas argamassas com adição de hidrofugantes (faixa de 3×10^{-12} a 4×10^{-12} kg/m.s.Pa) com relação ao referência (7×10^{-12} kg/m.s.Pa), constatando um aumento do fator de resistência (μ) com a adição do aditivo, comportamento similar, quanto à permeabilidade, ao encontrado neste trabalho. Herrmann (2017) também avaliou a permeabilidade ao vapor para diferentes tipos de aditivos hidrofugantes aplicados sobre a argamassa e verificou redução da permeabilidade em comparação com a argamassa de referência.

7.3 REGISTRO FOTOGRÁFICO

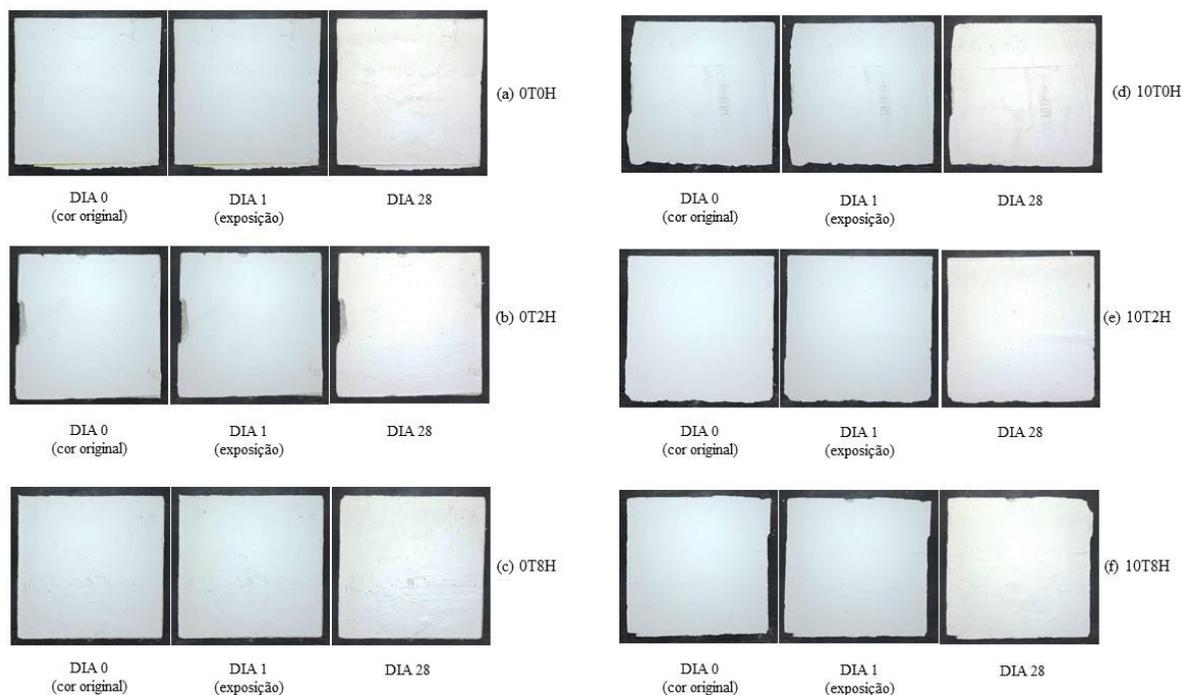
Para analisar de forma qualitativa a capacidade autolimpante das argamassas foi realizado o registro fotográfico. A partir dele, é possível comparar de forma visual a coloração das amostras expostas ao intemperismo natural ao longo dos 28 dias de exposição.

Apesar de todas as fotos terem sido feitas com a utilização de uma câmara de iluminação, com o intuito de minimizar possíveis alterações de luminosidade, de sombras ou de tonalidades, e com a utilização das mesmas configurações de câmara, algumas variações foram notadas. A seguir são apresentadas algumas fotos para realizar a comparação das variáveis: adição de TiO_2 , adição de aditivo hidrofugante e tipo de manchamento. No Apêndice C é apresentado o registro fotográfico completo de todas as 8 placas de argamassa por combinação de acabamento, sendo 3 com manchamento de fuligem, 3 com manchamento de Rodamina B e 2 sem manchamentos.

7.3.1 Amostras sem manchamentos

Para cada uma das 6 combinações de acabamento, 2 amostras de argamassa não receberam nenhum tipo de manchamento, para servir de comparação com as demais, tanto no sentido de visualizar a cor original do material, mas também para verificar se houve alguma variação da cor padrão devido à sua exposição ao ambiente. A Figura 53 apresenta uma comparação das amostras no dia 0 com os dias 1 e 28 de exposição, podendo-se observar que não houve variações visíveis de coloração.

Figura 53 – Comparação entre a cor original com a cor das plaquinhas sem manchamentos nos dias 1 e 28 de exposição: (a) 0T0H, (b) 0T2H, (c) 0T8H, (d) 10T0H, (e) 10T2H e (f) 10T8H



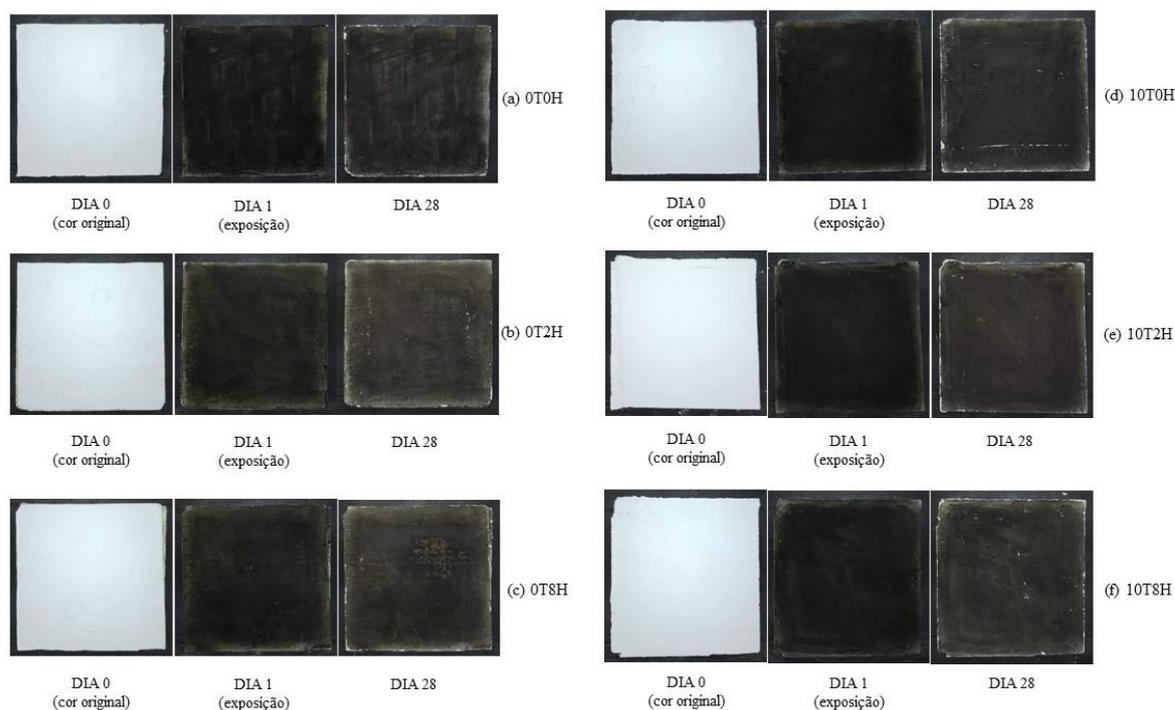
Fonte: própria da autora.

7.3.2 Amostras com manchamento de fuligem

As amostras com manchamento de fuligem proveniente dos canos de descarga de veículos a diesel resultaram em um manchamento intenso apesar da quantidade reduzida de sujidade aplicada em comparação com outros trabalhos realizados (Casarin, 2019; De La Rosa *et al.*, 2017). Tal fato pode ser devido tanto aos materiais constituintes da argamassa industrializada de acabamento como também pode ter sido empregado um manchamento excessivo, o que poderia bloquear a exposição do TiO_2 à radiação solar, conforme verificado por Austria (2015). Além disso, verificou-se que a fuligem adere facilmente em superfícies o que pode ser um fator determinante para a avaliação da capacidade de autolimpeza, necessitando de um período de exposição mais longo.

A partir da Figura 54, é possível identificar uma leve variação do manchamento das amostras, que apresentam um tom mais acinzentado em comparação com o dia 1 de exposição e uma sutil variação do manchamento. Contudo, tal aparência pode ser observada para todas as combinações de argamassa. No ítem 7.4 será possível ter uma noção quantitativa do comportamento das amostras manchadas com fuligem durante os 28 dias de exposição.

Figura 54 – Comparação entre os dias 1 e 28 de exposição das plaquinhas com fuligem: (a) 0T0H, (b) 0T2H, (c) 0T8H, (d) 10T0H, (e) 10T2H e (f) 10T8H

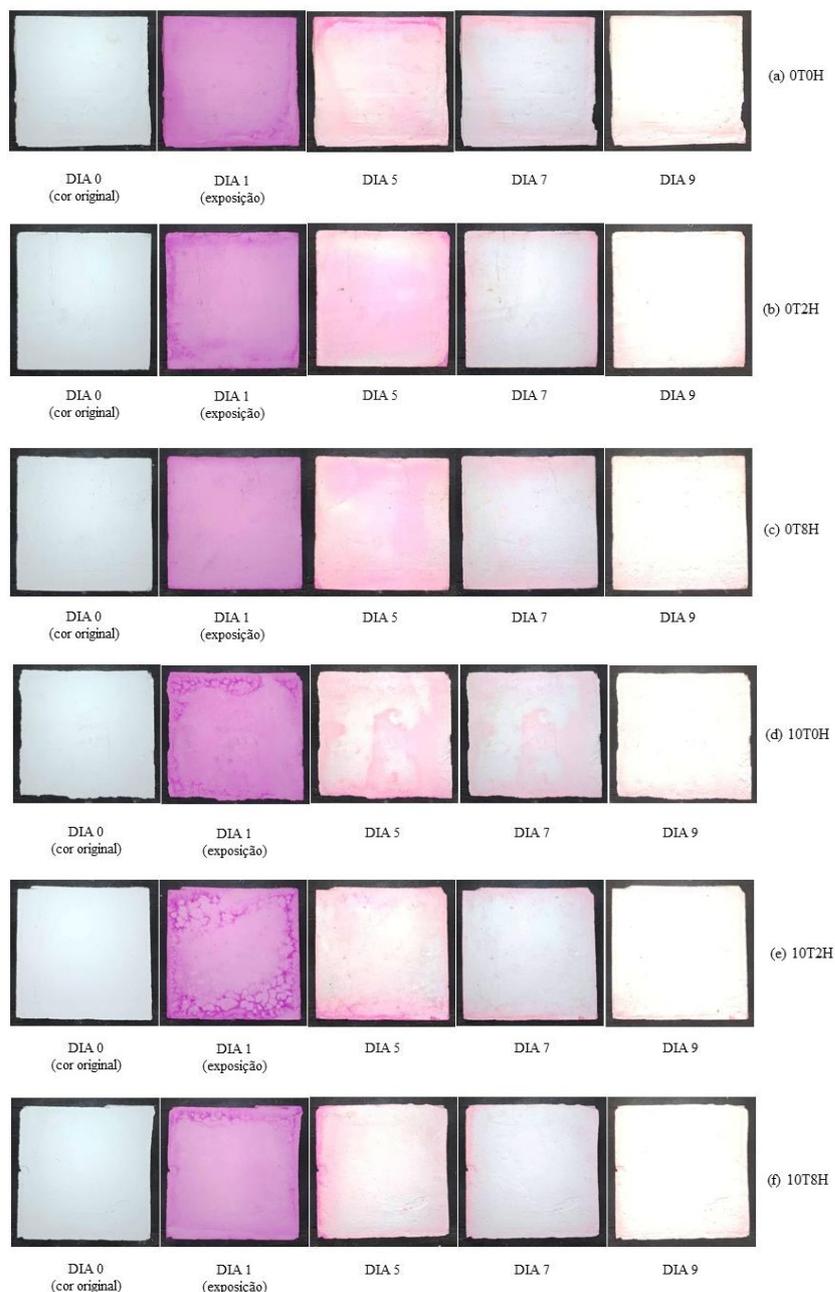


Fonte: própria da autora.

7.3.3 Amostras com manchamento de Rodamina B

As placas com manchamento de Rodamina B apresentaram uma rápida limpeza, retornando quase 100% para a coloração original. Pelas fotografias feitas (Figura 55), no quinto dia de exposição já foi possível visualizar uma grande variação de cor. No sétimo dia verificou-se a presença da coloração rosa do corante apenas nas bordas das amostras e, a partir do dia 9, notou-se o retorno quase completo a cor branca original. Apesar das amostras com adição de dióxido de titânio se apresentarem levemente mais claras, tal limpeza da Rodamina B ocorreu em todas as combinações de argamassa, inclusive naqueles sem a adição de TiO_2 . Este fenômeno também foi identificado no trabalho de Casarin (2019) após 7 dias de exposição. Segundo apontado por Casarin (2019), este fato pode ocorrer devido a auto-degradação do próprio corante Rodamina B quando exposto à alta radiação UV, mesmo sem a presença de um material fotocatalítico.

Figura 55 – Variação das plaquinhas manchadas com Rodamina B: dias 1, 5 e 7 de exposição ao ambiente natural: (a) 0T0H, (b) 0T2H, (c) 0T8H, (d) 10T0H, (e) 10T2H e (f) 10T8H

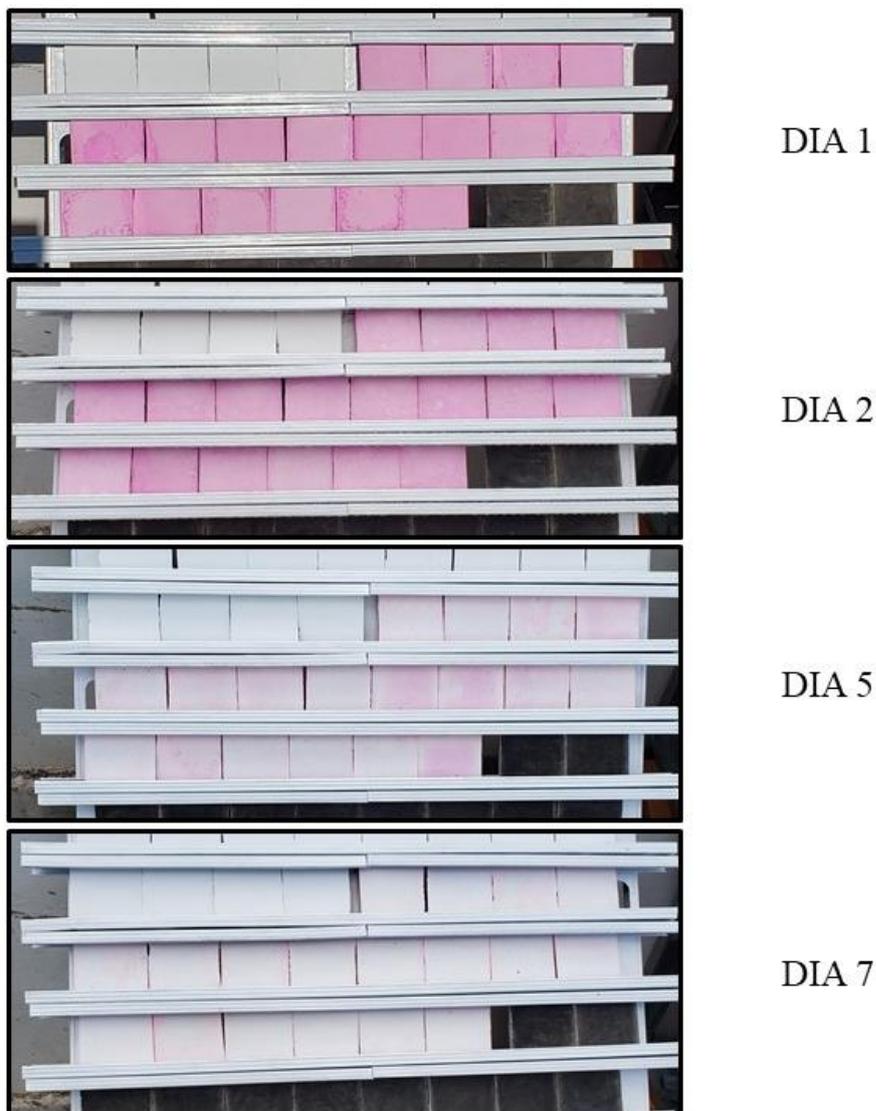


Fonte: própria da autora.

Inicialmente, o planejamento experimental contemplava a obtenção de fotos das amostras já no segundo dia de exposição para verificar se já havia alguma degradação. Contudo, este registro não foi possível de ser realizado, pois o dia estava chuvoso. Os registros fotográficos foram realizados juntamente com a coleta de dados do espectrofotômetro, evitando realizá-los em dias chuvosos ou quando as amostras ainda poderiam estar molhadas ou umedecidas, pois é um fator que poderia alterar a tonalidade de cor. Assim, as amostras foram apenas registradas

no segundo dia de exposição posicionadas no suporte. Pode-se visualizar, pela Figura 56, que já no segundo dia exposição as amostras já apresentaram alguns pontos esbranquiçados, mas não há, visualmente, uma diferença nítida entre os tipos de argamassa.

Figura 56 – Amostras manchadas com Rodamina B nos dias 1, 2, 5 e 7 de exposição



Fonte: própria da autora.

7.4 ENSAIO COLORIMÉTRICO

Este ensaio foi realizado conforme o procedimento exposto no ítem 6.4.4. Foram realizadas medições em 5 pontos de cada uma das amostras expostas com o auxílio do espectrofotômetro portátil, sendo que os valores médios obtidos em cada medição estão apresentados de forma completa no Apêndice D, assim como o cálculo da variação de cor ao longo do tempo (ΔE) e a

classificação quanto a visualização desta mudança de coloração. Para auxiliar a análise dos dados, também foi realizada à análise de variância (ANOVA) para os dados obtidos de três maneiras distintas:

- Análise geral da ΔE das amostras a partir de 3 fatores: adição de TiO_2 (0% e 10%), adição de hidrofugante (0%, 2% e 8%) e tipo de manchamento (fuligem, Rodamina B e sem manchamento);
- Análise geral da ΔL^* das amostras a partir dos mesmos 3 fatores: adição de TiO_2 (0% e 10%), adição de hidrofugante (0%, 2% e 8%) e tipo de manchamento (fuligem, Rodamina B e sem manchamento);
- Análise da ΔE das amostras com o manchamento do corante Rodamina B a partir dos 2 fatores: adição de TiO_2 (0% e 10%) e adição de hidrofugante (0%, 2% e 8%);

7.4.1 Análise geral da variação de cor ao longo do tempo (ΔE)

Pela análise estatística dos resultados de ΔE das amostras expostas ao ambiente natural do dia 1 ao dia 28 de exposição, apresentada na Tabela 22, pode-se perceber que apenas o tipo de manchamento se mostrou significativo. Tal efeito isolado está apresentado na Figura 57, onde observa-se que os maiores valores de ΔE foram obtidos nas amostras com o manchamento do corante Rodamina B, indicando uma maior variação de cor ao longo do tempo e, de acordo com Mokrzycki e Tatol (2011), valores de ΔE maiores que 5 indicam que um observador consegue visualizar duas cores diferentes, o que é coerente com a análise visual das plaquinhas a partir do registro fotográfico.

Tabela 22 – ANOVA para o ensaio colorimétrico com relação aos valores de ΔE

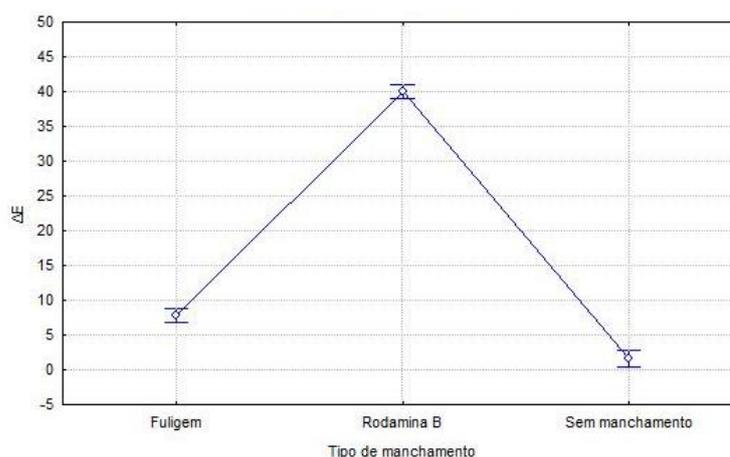
| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|----------------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO_2 (%) [A] | 4,65 | 1 | 4,65 | 0,978 | 0,33055 | Não |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 7,20 | 2 | 3,60 | 0,757 | 0,47781 | Não |
| Manchamento [C] | 13821,58 | 2 | 6910,79 | 1454,219 | 0,00000 | Sim |
| A x B | 22,09 | 2 | 11,05 | 2,324 | 0,11523 | Não |
| A x C | 26,24 | 2 | 13,12 | 2,760 | 0,07935 | Não |
| B x C | 14,02 | 4 | 3,50 | 0,737 | 0,57387 | Não |
| A x B x C | 39,34 | 4 | 9,84 | 2,070 | 0,10972 | Não |
| Erro | 142,57 | 30 | 4,75 | | | |

Fonte: própria da autora.

Também é possível notar, pela Figura 57, que as amostras sem manchamentos apresentam valores de ΔE próximos de 0, apresentando quase nenhuma variação de cor ao longo

do tempo, mantendo sua cor branca original. Já para o manchamento de fuligem, nota-se que há uma leve alteração de cor. Este efeito isolado apresenta tendência similar àquela encontrada por Casarin (2019), que também obteve valores próximos de 40 para o manchamento com Rodamina B (para um maior tempo de exposição), mas os valores encontrados pela autora para o manchamento de fuligem estavam em torno dos 20, superiores aos resultados encontrados neste trabalho.

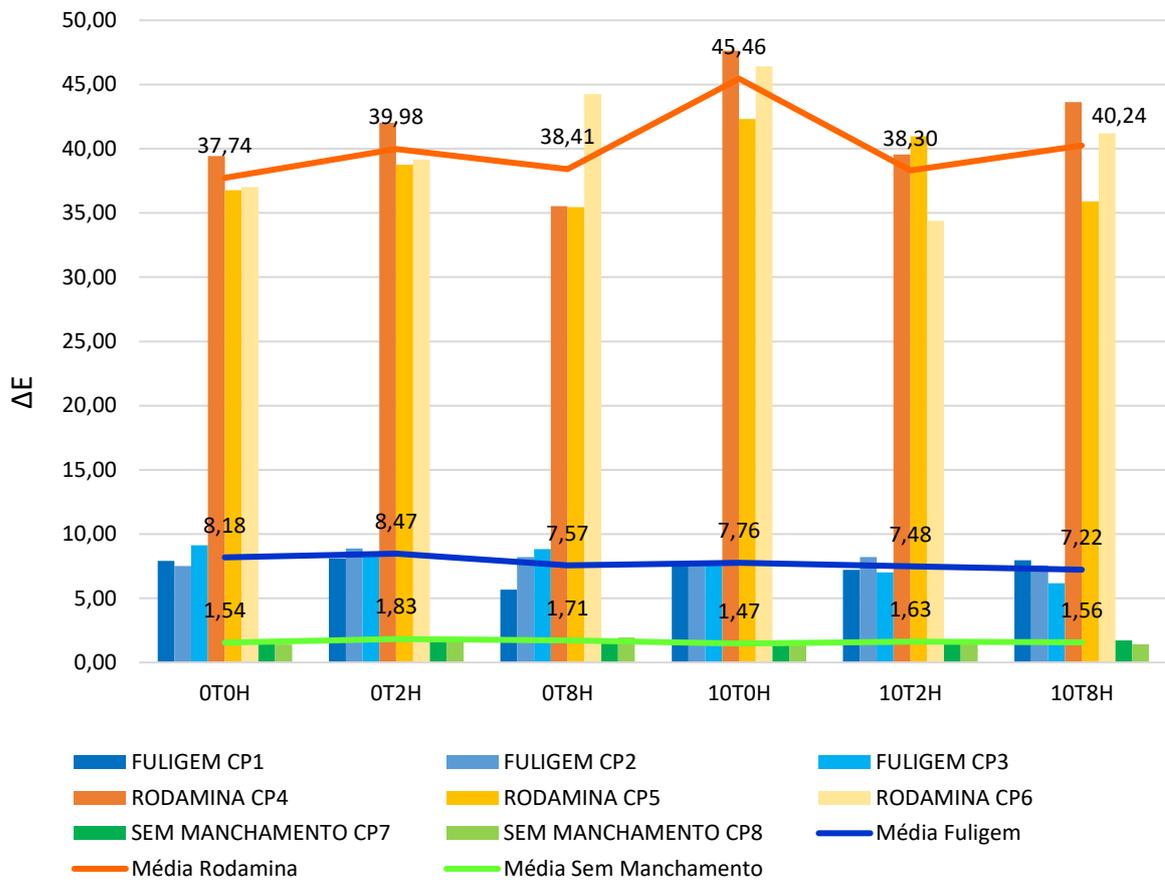
Figura 57 – Efeito isolado do tipo de manchamento em relação à variação de cor ao longo do tempo



Fonte: própria da autora.

A Figura 58 apresenta os valores médios de ΔE por corpo de prova de cada uma das combinações de argamassa obtidos entre os dias 1 e 28 de exposição ao ambiente natural. Nota-se que os CPs de mesmo tipo de manchamento apresentam comportamento médio similar independente da combinação, não sendo possível identificar a influência do TiO_2 e do aditivo hidrofugante. Percebe-se, apenas, que houve alteração de cor nas plaquinhas de Rodamina B para todas as argamassas. Devido a isso, optou-se por realizar uma nova análise geral das placas a partir da coordenada L^* , que demonstra a luminosidade ou brilho do material, variando entre 0 (preto) a 100 (branco), com o objetivo de verificar se há alguma alteração de cor significativa, já que, Austria (2015) e Diamanti *et al.* (2015) reportaram que argamassas com adição de TiO_2 apresentaram uma luminosidade mais elevada, pois o dióxido de titânio é um material com elevado índice de refração.

Figura 58 – Valores individuais (por CP por manchamento) e médios de ΔE entre o dia 1 e o dia 28 de exposição por combinação de argamassa.



Fonte: própria da autora.

7.4.2 Análise geral da variação da coordenada L^* (ΔL^*)

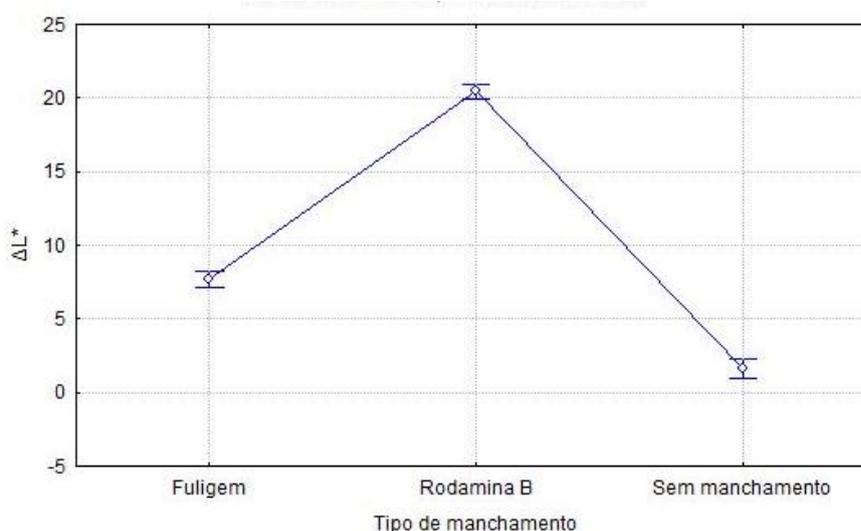
A Tabela 23 apresenta a nova análise ANOVA para as amostras com relação à variação da coordenada L^* (ΔL^*) entre os dias 1 e 28 de exposição ao ambiente natural. Apesar de a coordenada L^* não representar de forma tão precisa a variação de cor das placas, ela mostra a variação de luminosidade das argamassas. É, novamente, verificada a influência significativa apenas do tipo de manchamento, com o mesmo efeito verificado anteriormente apresentado na Figura 59.

Tabela 23 – ANOVA para o ensaio colorimétrico com relação aos valores médios de ΔL^*

| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|----------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO ₂ (%) [A] | 0,147 | 1 | 0,147 | 0,121 | 0,730073 | Não |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 1,600 | 2 | 0,800 | 0,661 | 0,523593 | Não |
| Manchamento [C] | 2855,412 | 2 | 1427,706 | 1180,297 | 0,000000 | Sim |
| A x B | 5,638 | 2 | 2,819 | 2,331 | 0,114587 | Não |
| A x C | 1,234 | 2 | 0,617 | 0,510 | 0,605539 | Não |
| B x C | 3,976 | 4 | 0,994 | 0,822 | 0,521596 | Não |
| A x B x C | 7,515 | 4 | 1,879 | 1,553 | 0,212325 | Não |
| Erro | 36,288 | 30 | 1,210 | | | Não |

Fonte: própria da autora.

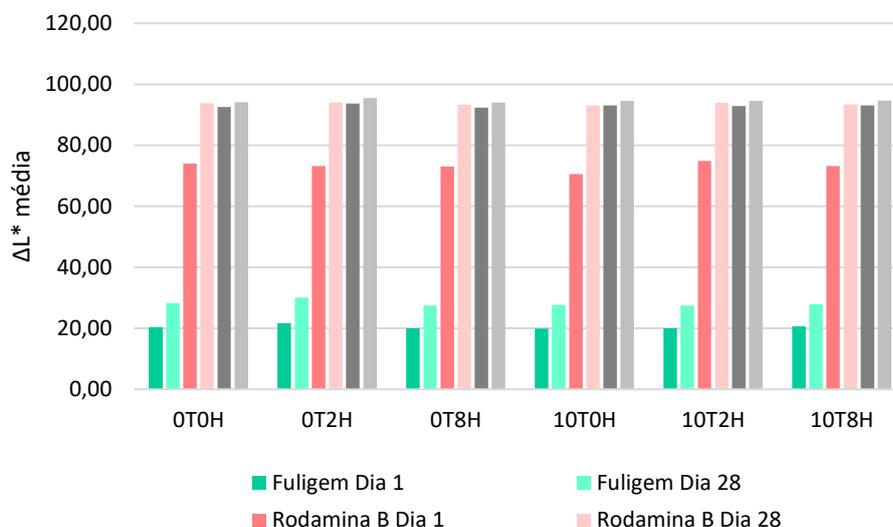
Figura 59 – Efeito isolado do tipo de manchamento em relação à variação da luminosidade ao longo do tempo



Fonte: própria da autora.

Pode-se observar na Figura 60 que, independentemente da combinação das argamassas, a variação da coordenada L^* dos manchamentos entre o dia 1 e o dia 28 de exposição apresentaram uma tendência similar entre todas as argamassas, sendo que era esperado que as combinações com adição de TiO₂ (10T0H, 10T2H, 10T8H) demonstrassem uma maior variação aos 28 dias devido à presença do fotocatalisador, significando a limpeza da sujeira imposta à amostra.

Figura 60 – Valores médios da variação da coordenada L* de acordo com as combinações de argamassa para os dias 1 e 28 de exposição.



Fonte: própria da autora.

7.4.3 Análise das amostras com manchamento de Rodamina B

Buscou-se determinar, por meio da análise das placas com manchamento de Rodamina B, o comportamento das amostras frente a adição do TiO₂ e do aditivo hidrofugante, já que as amostras deste tipo de manchamento demonstraram considerável variação de cor. Vale lembrar que já foi observado e constatado que o corante pode ser autodegradado com a radiação UV, independente da adição de um material autolimpante.

Conforme mencionado na análise do registro fotográfico, as amostras com a adição de TiO₂ aparentavam, visualmente, uma maior variação de cor com relação às demais, mesmo de forma leve. Assim, foi realizada a análise estatística apresentada na Tabela 24 com o intuito de verificar esta característica. No entanto, pode-se perceber que nenhum dos fatores foi significativo na análise para o período de 28 dias de exposição, já que as amostras de todas as combinações da argamassa de acabamento retornaram a cor original.

Tabela 24 – ANOVA para o ensaio colorimétrico com relação aos valores de ΔE entre o dia 1 e 28 de exposição

| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|------------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO ₂ (%) [A] | 31,03 | 1 | 31,03 | 2,811 | 0,119466 | Não |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 22,43 | 2 | 11,22 | 1,016 | 0,391112 | Não |
| A x B | 67,70 | 2 | 33,85 | 3,067 | 0,083988 | Não |
| Erro | 132,45 | 12 | 11,04 | | | |

Fonte: própria da autora.

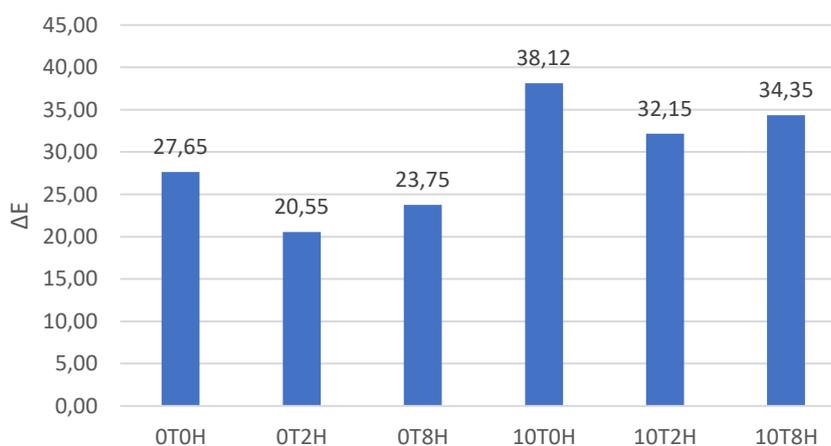
Assim, foi realizada uma segunda análise dos valores de ΔE das amostras com manchamento de Rodamina B entre o dia 1 de exposição e o dia 5, onde foi observado, visualmente (Figura 55), uma alteração do manchamento. A partir da análise ANOVA (Tabela 25), pode-se verificar que houve influência significativa para o efeito isolado da adição do TiO_2 e do hidrofugante, mas não da combinação das duas adições.

Tabela 25 – ANOVA para o ensaio colorimétrico com relação aos valores de ΔE entre o dia 1 e o dia 5 de exposição

| Efeito | Soma Quadrada | Graus de Liberdade | Média Quadrada | Teste F | Probabilidade | Influência Significativa |
|----------------------------------|---------------|--------------------|----------------|---------|---------------|--------------------------|
| Adição de TiO_2 (%) [A] | 533,50 | 1 | 533,50 | 35,401 | 0,000067 | Sim |
| Adição de hidrofugante (%) [B] | 129,71 | 2 | 64,85 | 4,303 | 0,038995 | Sim |
| A x B | 1,14 | 2 | 0,57 | 0,038 | 0,962896 | Não |
| Erro | 180,84 | 12 | 15,07 | | | |

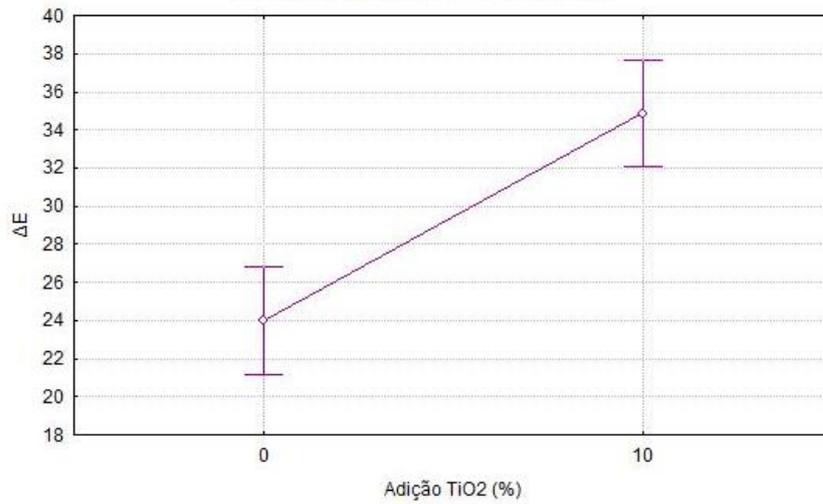
Fonte: própria da autora.

Figura 61 – Valores médios de ΔE entre o dia 1 e o dia 5 de exposição por combinação de argamassa.



Fonte: própria da autora.

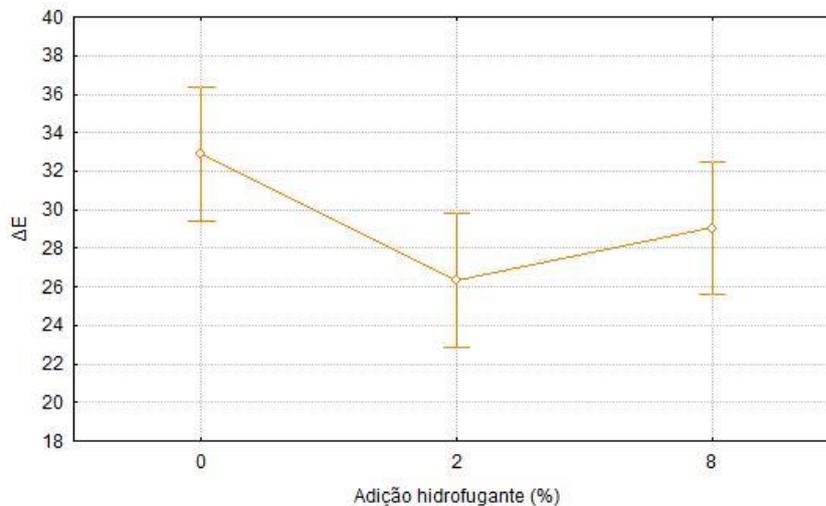
Figura 62 – Efeito isolado da adição do TiO₂ em relação à variação de cor ao longo do tempo entre o dia 1 e o dia 5 de exposição



Fonte: própria da autora.

Observa-se que, a partir da Figura 61 e 62, a adição de 10% de TiO₂ apresentou maior variação de cor ao longo dos 5 dias de exposição ao ambiente natural em comparação com a argamassa sem o fotocatalisador. Assim, este resultado indica uma atividade fotocatalítica nas amostras com o manchamento de Rodamina B. Já com relação à adição do aditivo hidrofugante, nota-se que a sua presença reduziu a variação de cor ao longo do tempo (Figura 63), não sendo um resultado esperado.

Figura 63 – Efeito isolado da adição do hidrofugante em relação à variação de cor ao longo do tempo entre o dia 1 e o dia 5 de exposição



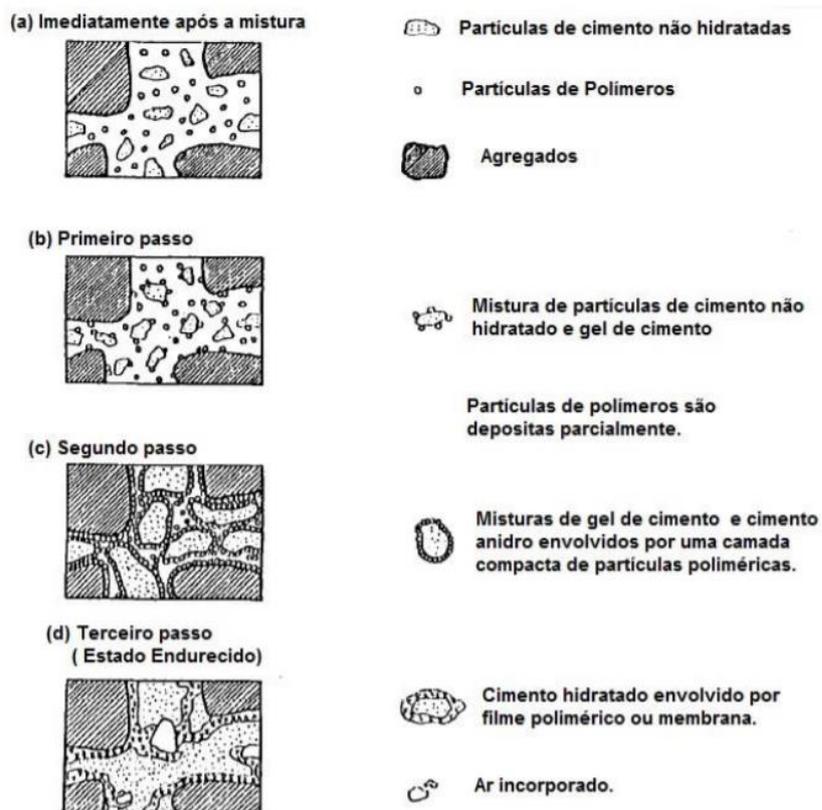
Fonte: própria da autora.

Buscando uma justificativa para a não observância da autolimpeza nas demais amostras com o manchamento de fuligem e para a falta de influência significativa do TiO_2 nas demais análises estatísticas das argamassas, foi questionado a efetividade do TiO_2 utilizado, a quantidade de fuligem aplicada nas amostras, o tempo de exposição ao ambiente natural (já que o trabalho realizado por Casarin (2019), conseguiu verificar a autolimpeza de amostras com manchamento de fuligem após um período de, aproximadamente, 100 dias de exposição), mas também a influência da constituição da argamassa nos resultados obtidos. Como mencionado no item 7.4.3.1, a argamassa de acabamento é constituída por diversos materiais desconhecidos como aditivos químicos e polímeros especiais.

Com isso, acredita-se que a argamassa pode conter alguma resina ou polímero em sua constituição que possa alterar ou impedir o comportamento esperado do TiO_2 . Segundo Ferreira (2017), que utilizou uma argamassa polimérica de cimento Portland CP V ARI com polímero MHEC (metilhidroxietil celulose) e EVA (acetato de vinila-etileno polivinila) e com um aditivo dispersante a base de policarboxilato, há a formação de um filme polimérico juntamente com a hidratação do cimento, conforme apresentado na Figura 64. Conforme o autor, o processo ocorre da seguinte forma:

- a) as partículas poliméricas adicionadas à mistura são dispersas e preenchem os espaços entre os grãos de cimento;
- b) durante o processo de hidratação, algumas partículas poliméricas ficam confinadas nos vazios capilares, sendo que uma parte do polímero pode empacotar os grãos anidros do cimento, retardando o processo de hidratação;
- c) por fim, ocorre a formação do filme polimérico contínuo por toda a matriz cimentícia, devido a saída de água do sistema. Assim, forma-se o filme no interior dos poros capilares e em torno dos grãos de cimento.

Figura 64 – Modelo da formação da matriz de cimento e polímero.



Fonte: OHAMA (1998) *apud* FERREIRA (2017).

A partir do que foi exposto, pode se supor que as partículas de TiO_2 podem ter sido aprisionadas por partículas poliméricas, o que impediria a sua ativação pela radiação solar e, conseqüentemente, impediria a atividade fotocatalítica e a autolimpeza das argamassas, havendo a necessidade de avaliar o comportamento da argamassa além do escopo deste trabalho.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a eficiência da autolimpeza de argamassas industrializadas de acabamento externo de cor branca produzidas com a adição de TiO_2 (nas quantidades de 0% e 10%) e de um aditivo hidrofugante comercial nos teores de 0%, 2% e 8%. Para isso, amostras do material foram manchadas com dois tipos de manchamentos (o corante Rodamina B e a fuligem proveniente da combustão incompleta dos combustíveis de veículos a diesel) e foram expostas ao ambiente natural da cidade de Porto Alegre/RS, a uma inclinação de 45° e voltadas para a direção norte. Durante um período de exposição de 28 dias, foram realizadas medições cromáticas com o auxílio de um espectrofotômetro portátil para acompanhar a variação da coloração das amostras e a degradação dos manchamentos aplicados, além do acompanhamento através de registros fotográficos. Também buscou-se analisar a influência das adições do dióxido de titânio e do aditivo hidrofugante no módulo de elasticidade dinâmico e na resistência à tração e à compressão das argamassas, além de analisar o comportamento das argamassas quanto à absorção de água por capilaridade e à permeabilidade ao vapor de água, características muito importantes para revestimentos externos e influenciadas pela adição do aditivo. Na sequência são apresentadas as conclusões obtidas para os materiais e metodologias utilizadas neste trabalho.

8.1 CONCLUSÕES

O aditivo hidrofugante comercial utilizado como adição na mistura das argamassas com o intuito de reduzir a absorção de água por capilaridade não se mostrou efetivo, pois obtiveram-se valores de absorção maiores do que os da argamassa de referência. Além disso, desejava-se obter uma argamassa que permitisse uma adequada permeabilidade ao vapor de água de modo que ocorra a secagem da água presente nos poros dos materiais, evitando possíveis manifestações patológicas. Entretanto, as argamassas com teores de hidrofugante apresentaram menores resultados de permeabilidade do que a de referência e ainda se verificou que as argamassas com o hidrofugante em estudo apresentaram maiores módulo de elasticidade dinâmico do que a argamassa de referência, resultando em menores capacidades de absorver deformações. Dessa maneira, conclui-se que o aditivo hidrofugante não conferiu às argamassas as características esperadas, não sendo favorável sua utilização.

A influência do TiO_2 nas argamassas também não se mostrou muito satisfatória. Por ser um material fino acredita-se que o dióxido de titânio auxiliou no fechamento dos poros do

material, já que as argamassas com 10% de adição apresentaram maior densidade de massa, menores valores de teor de ar incorporado e maiores valores de resistência a compressão axial. Contudo, o módulo de elasticidade dinâmico foi superior ao módulo da argamassa de referência, apresentando menor capacidade em absorver deformações. Além disso, em comparação com a argamassa de referência, a adição do TiO_2 resultou em valores de absorção por capilaridade maiores pela norma EN ISO 15148: 2016 e de permeabilidade ao vapor muito próximas.

Com relação à avaliação da eficiência da autolimpeza, não foi possível constatar alguma influência significativa do dióxido de titânio para o manchamento de fuligem. Já para o manchamento de Rodamina B, foi possível verificar um indício da atividade autolimpante. Tal conclusão pode ter várias justificativas:

- a) o período de exposição de 28 dias pode ter sido insuficiente para a visualização da autolimpeza nas argamassas com manchamento de fuligem;
- b) o corante Rodamina B pode não ser o material ideal para avaliar a autolimpeza de argamassas com TiO_2 , já que ele pode se auto degradar quando exposto a radiação UV. Assim, medições mais frequentes nos primeiros dias de exposição seriam importantes;
- c) o manchamento de fuligem aplicado pode ter sido excessivo para as amostras, bloqueando a passagem da radiação solar e impedindo a ativação do TiO_2 ;
- d) o TiO_2 utilizado pode não ser efetivo na fotocatalise, necessitando uma melhor caracterização e análise da sua estrutura e do seu comportamento individual;
- e) a argamassa de acabamento é composta por diferentes materiais como polímeros e aditivos de origem e comportamento desconhecidos e que podem ter afetado a ação do TiO_2 .

Assim, verifica-se que os objetivos deste trabalho foram atingidos, apesar de os resultados não terem sido os esperados de acordo com a revisão bibliográfica. Com relação aos ensaios realizados, verifica-se que foram importantes para haver um entendimento do comportamento em conjunto dos materiais, mas que devido aos resultados obtidos, é necessário a realização de ensaios para a caracterização dos materiais de forma individual para compreender a sua microestrutura e sua influência no desempenho das argamassas analisadas. Por isso, alguns fatores que podem ter influenciado os resultados necessitam de um estudo mais aprofundado, sendo eles:

- a) características da microestrutura da argamassa de acabamento, da microestrutura do TiO_2 e do aditivo hidrofugante e suas influências nos demais materiais;

- b) comportamento do aditivo comercial utilizado em relação a outro traço ou tipo de argamassa;
- c) influência das partículas de fuligem e a quantidade utilizada para a capacidade de autolimpeza das argamassas;

REFERÊNCIAS

ALLEN, N. S.; EDGE, M.; VERRAN, J.; STRATTON, J.; MALTBY, J.; BYGOTT, C. Photocatalytic titania based surfaces: Environmental benefits. **Polymer degradation and stability**. v. 93, p. 1632-1646, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Chemical Admixtures for concrete, **ACI 212.3R-91**.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E96/E96M – 16**: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. West Conshohocken, PA - USA, ASTM International, 2016.

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

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

_____. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, ABNT, 2013.

_____. **NBR 13755**: Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante – Projeto, execução, inspeção e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.

_____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

_____. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

_____. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

_____. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.

AUSTRIA, G. C. **Argamassa autolimpante para revestimento de fachadas: o efeito das propriedades fotocatalíticas do dióxido de titânio (TiO₂)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BALL, R. J.; ALLEN, G. C. The measurement of water transport in porous materials using impedance spectroscopy. **Journal of physics D: Applied physics**, v.43, n.10, 2010

BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Dados meteorológicos diários da cidade de Porto Alegre/RS. **Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: novembro 2021.

BERSCH, J. D. **Atividade fotocatalítica, autolimpeza e durabilidade do ponto de vista de envelhecimento de argamassas pigmentadas contendo dióxido de titânio (TiO₂)**. 2021. No prelo.

BIEHL, A.; ZIEGLER, F.; CALHEIRO, L.; MASUERO, A. B. Avaliação do desempenho de argamassas com aditivos hidrofugantes e sílica ativa. *In*: 3º Simpósio Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, 2018, Coimbra. **Anais [...]**. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2018, p. 27-40.

CASALI, J. M.; GAVA, G. P.; PRUDÊNCIO JR, L. R. Avaliação do desempenho de aditivos hidrofugantes e impermeabilizantes empregados em argamassas de assentamento para alvenaria estrutural. *In*: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 2006, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: [s.n.], 2006

CASARIN, R. P. **Análise da eficiência da ação autolimpante em diferentes tipos de acabamentos superficiais de argamassas com adição de TiO₂**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

CASSAR, L.; PEPE, C.; TOGNON, G.; GUERRINI, G. L.; AMADELLI, R. White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties. 11th International Congress on the Chemistry of Cement, Durban, South Africa, 2003.

CONSTANTINO, J. C. P.; GARCIA, D. C. S.; PALHARES, H. G.; HOUMARD, M.; FIGUEIREDO, R. B. Development of functional TiO₂ coatings deposited on cementitious materials. **Construction and Building Materials**. v. 250, 118732, 2020.

DE LA ROSA, J. M.; MILLER, A. Z.; POZO-ANTONIO, J. A.; GONZÁLEZ-PÉREZ, J. A.; JIMÉNEZ-MORILLO, N. T.; DIONISIO, A. Assessing the effects of UVA photocatalysis on soot-coated TiO₂-containing mortars. **Science of the Total Environment**. n. 605-606, p. 147-157, 2017.

DIAMANTI, M. V.; DEL CURTO, B.; ORMELLESE, M.; PEDEFERRI, M. P. Photocatalytic and self-cleaning activity of colored mortars containing TiO₂. **Construction and Building Materials**. v. 46, p. 167-174, 2013.

DIAMANTI, M. V.; LUONGO, N. MASSARI, S. SPAGNOLO, S. L. DANIOTTI, B. PEDEFERRI, M. P. Durability of self-cleaning cement-based materials. **Construction and Building Materials**. v. 280, 122442, 2021.

DIAMANTI, M. V.; ORMELLESE, M.; PEDEFERRI, M. P. Characterization of photocatalytic and superhydrophilic properties of mortars containing titanium dioxide. **Cement and Concrete Research**. v. 38, p. 1349-1353, 2008.

DIAMANTI, M. V.; PAOLINI, R.; ROSSINI, M; ASLAN, A. B.; ZINZI, M.; POLI, T.; PEDEFERRI, M. P. Long term self-cleaning and photocatalytic performance of anatase added mortars exposed to the urban environment. **Construction and Building Materials**. v. 96, p. 270-278, 2015.

DIN EN ISO 15148: 2016 Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption coefficient by partial immersion.

FALCHI, L.; ZENDRI E.; MÜLLER, U.; FONANA, P. The influence of water-repellent admixtures on the behaviour and the effectiveness of Portland limestone cement mortars. **Cement & Concrete Composites** v. 59, p 107-118, 2015.

FERREIRA, B. B. D. **Tipificação de patologias em revestimentos argamassados**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FERREIRA, L. R. C. **Dosagem de argamassa polimérica com utilização de regras de misturas por métodos estatísticos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

FILHO, F. P. **Estudo exploratório do comportamento mecânico de argamassas poliméricas e argamassas industrializadas ensacadas para assentamento de blocos de vedação**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FUJISHIMA, A; RAO, T. N.; TRYK, D. A. Titanium dioxide photocatalysis. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**. v. 1, p. 1-21, 2000.

FUJISHIMA, K.; ZHANG, X.; TRYK, D. A. TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. **Surface science reports**. v. 63, p. 515-582, 2008.

GASQUES, E. G. F.; OYAMADA, G. P. G.; ROSA, M. A. Influência de aditivos hidrofugantes na propriedade de aderência de argamassa de revestimento. *In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2017, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: [s.n.], 2017.*

GAVA, G. P.; GASQUES, E. G. F.; RIGO, E. Avaliação da influência de aditivos hidrofugantes/impermeabilizantes nas propriedades das argamassas. *In: Congresso Técnico*

Científico da Engenharia e da Agronomia, 2016, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: [s.n.], 2017, p. 1-5.

GROFF, C. **Revestimentos em fachadas: análise das manifestações patológicas nos empreendimentos de construtora em Porto Alegre**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

GUERRA, F. L. **Avaliação da eficiência de nanopartículas de TiO₂ no controle do crescimento de fungos filamentosos deteriorogênicos em argamassas históricas**. 2018. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

GUO, Z. M.; MAURY-RAMIREZ, A.; POON, C. S. Photocatalytic activities of titanium dioxide incorporated architectural mortars: Effects of weathering and activation light. **Building and Environment**. v. 94, p. 395-402, 2015

GUO, Z. M.; CHEN, J.; XIA, M.; WANG, T.; POON, C. S. Pathways of conversion of nitrogen oxides by nano TiO₂ incorporated in cement-based materials. **Building and Environment**. v. 144, p. 412-418, 2018.

HERRMANN, T. B. **Avaliação do desempenho à estanqueidade à água de diferentes revestimentos para a recuperação de uma fachada degradada**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

HERRMANN, T. D.; MOHAMAD, G.; LIMA, R. C. A.; NETO, A. B. S. S.; LÜBECK, A. Avaliação do comportamento de estanqueidade à água de argamassas e hidrorrepelentes – Parte II. **Revista Matéria**, v.24, n. 04, 2019.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos**. São Paulo, 1998. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5075717/mod_resource/content/1/Apostila_Revestimento%20Argamassa.pdf>. Acesso em: 11 set. 2021.

MADUREIRA, S.; COLEN-FLORES, I.; DE BRITO, J. PERERIRA C. Maintenance planning of facades in current buildings. **Construction and Building Materials** v. 147, p. 790-802, 2017.

MARANHÃO, F. L. **Método para redução de mancha nas vedações externas de edifícios**. 2009. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2ª ed. São Paulo: **IBRACON**, 2014.

MENDOZA, C.; VALLE, A.; CASTELLOTE, M.; BAHAMONDE, A.; FARALDOS, M. TiO₂ and TiO₂-SiO₂ coated cement: Comparison of mechanic and photocatalytic properties. **Applied Catalysis B: Environmental**. v. 178, p. 155-164, 2015.

MOKRZYCKI, W.; TATOL, M.; Color difference Delta E – a survey. **Machine Graphic & Vision**, s/v, s/p, 2011.

MUHAMMAD, N. Z.; KEYVANFAR, A.; MAJID, M. Z. A.; SHAFAGHAT, A.; MIRZA, J. Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches. **Construction and Building Materials** v. 101, p. 80-90, 2015.

OLIVEIRA, C. S. P. **Análise crítica de experiências e discussão de estratégias para implantação de leis de inspeção de elementos de fachadas**. 2013. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

OLIVEIRA, J. M. P. O. **Estudo da durabilidade e eficácia da ação de repelentes de água em fachadas de edifícios recentes**. 2016 Dissertação (Mestrado em Construções) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, 2013.

PASSUELO, A. **Análise de parâmetros influentes na cromacidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PIAZZAROLLO, C. B. **Estudo da evolução e da gravidade da degradação nas diferentes zonas componentes da fachada**. 2019. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

PEDROLLO, V. F. R. **Avaliação da eficiência da autolimpeza de argamassa de revestimento com adição de TiO₂**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

PEREIRA, M. A. C.; JALALI, S.; TORGAL, F. P. Argamassas aditivadas com dióxido de titânio: uma solução eficaz no combate aos graffitis. **Materiais de Construção**, p. 42-45, 2009

PETRUCCI, H. M. C. **A alteração da aparência das fachadas dos edifícios: interação entre as condições ambientais e a forma construída**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

POZO-ANTONIO, J. S.; DIONÍSIO, A. Physical-mechanical properties of mortars with addition of TiO₂ nanoparticles. **Construction and Building Materials**. v. 148, p. 261-272, 2017.

ROOS, M.; KÖNIG, F.; STADTMÜLLER, S.; WEYERSHAUSEN, B. Evolution of silicone based water repellents for modern building protection. *In: 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials*, 2008. **Anais [...]**. [S.I.]: Aedificatio Publishers, 2008, p. 3-16.

RUDUIT, F. R. **Contribuição ao estudo da aderência de revestimentos de argamassa e chapisco em substrato de concreto**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SALOMÃO, M. C. F. **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água**. 2016. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 2016.

SÁNCHEZ, J. F. G. **Desarrollo de nuevos morteros de restauración de cal com aditivos**. 2020. Tese de Doutorado – Programa de Doctorado em Ciencias Naturales y Aplicadas, Departamento de Química, Universidad de Navarra, Pamplona, 2020.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat island and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy** v. 85, p.3085-3102, 2011.

SEGAT, G. T. **Manifestações patológicas observadas em revestimentos de argamassa: estudo de caso em conjunto habitacional popular na cidade de Caxias do Sul (RS)**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissional) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SILVA, J. F. **Estudo de caso de revestimento argamassado externo aplicado sobre alvenaria convencional**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2021.

SILVA, M. N. B. **Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada – Aplicação ao caso de Brasília/DF**. 2014. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

SMITS, M; CHAN, C. K.; TYTGAT, T.; CRAEYE, B.; COSTARRAMONE, N.; LACOMBE, S.; LENAERTS, S. Photocatalytic degradation of soot deposition: Self-cleaning effect on titanium dioxide coated cementitious materials. **Chemical Engineering Journal**. v. 222, p. 411-418, 2013.

SOUSA, V.; PEREIRA, F.D.; BRITO, J. DE. **Rebocos Tradicionais: Principais causas de degradação**. Engenharia Civil, UM, v. 23, p. 5-18, 2005.

SOUZA, J. S. **Evolução da degradação de fachadas – efeito dos agentes de degradação e dos elementos constituintes**. 2016. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

TREVISIO, J. P. M. **Avaliação da eficiência de autolimpeza em argamassas com TiO₂ expostas ao microclima urbano**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

UEMOTO, K. L.; IKEMATSU, P.; AGOPYAN, V. Impacto ambiental das tintas imobiliárias. **Coletânea Habitare: construção e meio ambiente**. v. 7, p. 58-97, 2006

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Tabela 26 – Índice de consistência (mm)

| Denominação | Diâmetro 1 (mm) | Diâmetro 2 (mm) | Diâmetro 3 (mm) | Média (mm) | Desvio padrão (mm) | Coefficiente de variação |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|--------------------|--------------------------|
| Base | 230,00 | 232,00 | 226,00 | 224,00 | 6,45 | 2,88% |
| | 220,00 | 221,00 | 213,00 | | | |
| 0T0H - Ref. | 239,00 | 244,00 | 243,00 | 242,00 | 2,16 | 0,89% |
| 0T2H | 197,00 | 210,00 | 206,00 | 204,00 | 5,44 | 2,66% |
| 0T8H | 213,00 | 215,00 | 213,00 | 214,00 | 0,94 | 0,44% |
| 10T0H | 210,00 | 211,00 | 208,00 | 210,00 | 1,25 | 0,59% |
| 10T2H | 191,00 | 197,00 | 192,00 | 193,00 | 2,62 | 1,36% |
| 10T8H | 220,00 | 230,00 | 231,00 | 227,00 | 4,97 | 2,19% |

Fonte: própria da autora

Tabela 27 – Massa específica (g/cm³)

| Denominação | V1 | V2 | Massa (g) | Massa específica (g/cm ³) | Média (g/cm ³) | Desvio padrão (g/cm ³) | Coefficiente de variação |
|----------------------|------|-------|-----------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| Argamassa base | 0,10 | 19,80 | 53,89 | 2,74 | 2,73 | 0,0036 | 0,132% |
| | 0,20 | 18,90 | 51,02 | 2,73 | | | |
| Argamassa acabamento | 0,30 | 19,50 | 52,33 | 2,73 | 2,73 | 0,0001 | 0,005% |
| | 0,20 | 18,80 | 50,69 | 2,73 | | | |
| Aditivo hidrofugante | 0,10 | 19,10 | 48,14 | 2,53 | 2,53 | 0,0009 | 0,036% |
| | 0,65 | 19,00 | 46,46 | 2,53 | | | |
| TiO ₂ | 0,60 | 18,00 | 68,07 | 3,91 | 3,91 | 0,0027 | 0,070% |
| | 0,20 | 17,90 | 69,34 | 3,92 | | | |

Fonte: própria da autora

Tabela 28 – Densidade de massa no estado fresco (kg/m³) e teor de ar incorporado (%)

| Denominação | Densidade de massa (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | Desvio padrão (kg/m ³) | Coefficiente de variação | Densidade de massa teórica (g/cm ³) | Teor de ar incorporado (%) | Média (%) | Desvio padrão (%) | Coefficiente de variação |
|-------------|---|----------------------------|------------------------------------|--------------------------|---|----------------------------|-----------|-------------------|--------------------------|
| Base | 1629,0 | 1657,00 | 28,00 | 1,69% | 2,25 | 28% | 26% | 1,24% | 4,72% |
| | 1685,0 | | | | 2,25 | 25% | | | |
| 0T0H - Ref. | 1688,0 | - | - | - | 1,77 | 5% | - | - | - |
| 0T2H | 1692,0 | - | - | - | 1,77 | 5% | - | - | - |
| 0T8H | 1685,0 | - | - | - | 1,78 | 5% | - | - | - |
| 10T0H | 1706,0 | - | - | - | 1,78 | 4% | - | - | - |
| 10T2H | 1716,0 | - | - | - | 1,78 | 4% | - | - | - |
| 10T8H | 1703,0 | - | - | - | 1,78 | 4% | - | - | - |

Fonte: própria da autora

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Tabela 29 – Densidade de massa aparente (kg/m³)

| Denominação | L médio (mm) | c médio (mm) | h médio (mm) | Peso (g) | Volume (cm ³) | Densidade de massa aparente (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | Desvio Padrão (kg/m ³) | Coefficiente de variância |
|-------------|--------------|--------------|--------------|----------|---------------------------|--|----------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Base | 161,1 | 41,5 | 42,7 | 415,7 | 285,5 | 1456,0 | 1476,7 | 0,001 | 0,00009% |
| | 160,3 | 40,9 | 40,8 | 393,0 | 267,4 | 1469,0 | | | |
| | 161,4 | 41,2 | 42,1 | 412,0 | 279,7 | 1473,0 | | | |
| | 161,8 | 39,5 | 41,3 | 390,8 | 263,8 | 1482,0 | | | |
| | 161,3 | 40,6 | 42,2 | 409,4 | 276,6 | 1480,0 | | | |
| | 161,0 | 40,6 | 39,9 | 390,8 | 260,6 | 1500,0 | | | |
| 0T0H - Ref. | 155,1 | 39,2 | 37,3 | 301,2 | 227,1 | 1326,0 | 1331,3 | 0,007 | 0,00051% |
| | 153,8 | 39,1 | 38,1 | 304,0 | 229,1 | 1327,0 | | | |
| | 154,9 | 38,4 | 38,2 | 305,3 | 227,6 | 1341,0 | | | |
| 0T2H | 154,0 | 38,1 | 38,2 | 309,1 | 224,5 | 1377,0 | 1378,3 | 0,002 | 0,00014% |
| | 152,5 | 38,7 | 38,1 | 309,8 | 225,1 | 1377,0 | | | |
| | 153,2 | 38,2 | 38,7 | 312,7 | 226,4 | 1381,0 | | | |
| 0T8H | 152,6 | 39,2 | 37,9 | 308,7 | 226,2 | 1365,0 | 1358,7 | 0,013 | 0,00099% |
| | 152,4 | 38,9 | 38,5 | 312,9 | 228,2 | 1371,0 | | | |
| | 154,9 | 38,6 | 38,6 | 309,0 | 230,5 | 1340,0 | | | |
| 10T0H | 152,9 | 38,3 | 38,3 | 313,4 | 224,4 | 1396,0 | 1375,7 | 0,015 | 0,00111% |
| | 154,9 | 38,6 | 38,9 | 319,6 | 233,0 | 1372,0 | | | |
| | 155,0 | 39,0 | 38,7 | 317,7 | 233,7 | 1359,0 | | | |
| 10T2H | 153,3 | 38,4 | 38,3 | 316,6 | 225,4 | 1404,0 | 1404,3 | 0,006 | 0,00044% |
| | 152,5 | 38,6 | 38,4 | 319,0 | 225,9 | 1412,0 | | | |
| | 153,5 | 38,4 | 38,6 | 317,7 | 227,5 | 1397,0 | | | |
| 10T8H | 152,0 | 39,2 | 37,5 | 312,3 | 223,2 | 1399,0 | 1364,7 | 0,027 | 0,00201% |
| | 153,5 | 39,1 | 39,0 | 318,5 | 233,7 | 1363,0 | | | |
| | 156,1 | 38,3 | 40,0 | 318,8 | 239,4 | 1332,0 | | | |

Fonte: própria da autora

Tabela 30 – Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)

| Denominação | L médio (mm) | t1 (µs) | t2 (µs) | t3 (µs) | Velocidade de propagação de ondas (mm/µs) | Densidade de massa aparente (kg/m ³) | Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa) | Módulo de Elasticidade Dinâmico médio (GPa) | Desvio Padrão (GPa) | Coefficiente de variância |
|-------------|--------------|---------|---------|---------|---|--|---------------------------------------|---|---------------------|---------------------------|
| Base | 161,1 | 59,7 | 59,9 | 59,9 | 2,70 | 1456,00 | 9541,36 | 9,4 | 0,029 | 0,31% |
| | 160,3 | 61,1 | 61,0 | 61,2 | 2,63 | 1469,00 | 9124,70 | | | |
| | 161,4 | 59,4 | 59,4 | 59,5 | 2,72 | 1473,00 | 9786,86 | | | |
| | 161,8 | 62,0 | 62,0 | 62,2 | 2,61 | 1482,00 | 9080,36 | | | |
| | 161,3 | 59,5 | 59,6 | 59,6 | 2,71 | 1480,00 | 9792,25 | | | |
| | 161,0 | 61,6 | 61,7 | 61,5 | 2,62 | 1500,00 | 9256,59 | | | |
| | 155,1 | 79,0 | 79,5 | 79,5 | 1,96 | 1326,00 | 4598,39 | | | |
| 0T0H - Ref. | 153,8 | 80,5 | 80,6 | 80,6 | 1,91 | 1327,00 | 4358,34 | 4,5 | 0,131 | 2,88% |
| | 154,9 | 79,3 | 79,2 | 78,8 | 1,97 | 1341,00 | 4661,20 | | | |
| | 154,0 | 79,6 | 79,7 | 79,3 | 1,94 | 1377,00 | 4671,39 | | | |
| 0T2H | 152,5 | 78,7 | 78,7 | 78,3 | 1,95 | 1377,00 | 4702,46 | 4,7 | 0,048 | 1,01% |
| | 152,2 | 79,0 | 78,1 | 78,3 | 1,96 | 1381,00 | 4784,34 | | | |
| | 152,6 | 77,2 | 76,9 | 76,8 | 1,99 | 1365,00 | 4850,01 | | | |
| 0T8H | 152,4 | 78,0 | 77,3 | 77,1 | 1,98 | 1371,00 | 4819,57 | 4,8 | 0,024 | 0,50% |
| | 154,9 | 77,1 | 77,1 | 77,0 | 2,01 | 1340,00 | 4879,08 | | | |
| | 152,9 | 78,8 | 78,7 | 79,1 | 1,94 | 1396,00 | 4744,21 | | | |
| 10T0H | 154,9 | 79,4 | 79,1 | 79,0 | 1,96 | 1372,00 | 4745,65 | 4,7 | 0,046 | 0,97% |
| | 155,0 | 79,9 | 79,5 | 79,7 | 1,95 | 1359,00 | 4648,34 | | | |
| | 153,3 | 75,6 | 75,8 | 75,8 | 2,03 | 1404,00 | 5198,71 | | | |
| 10T2H | 152,5 | 75,3 | 75,7 | 76,5 | 2,03 | 1412,00 | 5214,32 | 5,2 | 0,025 | 0,48% |
| | 153,5 | 76,3 | 76,1 | 75,8 | 2,02 | 1397,00 | 5155,38 | | | |
| | 152,0 | 74,0 | 74,2 | 73,9 | 2,06 | 1399,00 | 5326,94 | | | |
| 10T8H | 153,5 | 73,7 | 74,1 | 74,0 | 2,08 | 1363,00 | 5320,17 | 5,2 | 0,186 | 3,58% |
| | 156,1 | 77,3 | 77,0 | 77,4 | 2,03 | 1332,00 | 4929,82 | | | |

Fonte: própria da autora

Tabela 31 – Resistência à tração na flexão (MPa)

| Denominação | Resistência à tração (MPa) | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coefficiente de variação |
|-------------|----------------------------|-------------|---------------------|--------------------------|
| Base | 1,57 | 1,58 | 0,15 | 9,34% |
| | 1,46 | | | |
| | 1,42 | | | |
| | 1,55 | | | |
| | 1,57 | | | |
| | 1,88 | | | |
| 0T0H - Ref. | 1,34 | 1,20 | 0,13 | 10,56% |
| | 1,03 | | | |
| | 1,22 | | | |
| 0T2H | 1,19 | 1,38 | 0,14 | 10,24% |
| | 1,52 | | | |
| | 1,42 | | | |
| 0T8H | 1,32 | 1,21 | 0,26 | 21,81% |
| | 1,46 | | | |
| | 0,85 | | | |
| 10T0H | 1,45 | 1,47 | 0,02 | 1,32% |
| | 1,46 | | | |
| | 1,49 | | | |
| 10T2H | 1,31 | 1,28 | 0,13 | 10,39% |
| | 1,43 | | | |
| | 1,11 | | | |
| 10T8H | 1,60 | 1,45 | 0,13 | 8,66% |
| | 1,45 | | | |
| | 1,29 | | | |

Fonte: própria da autora

Tabela 32 – Resistência à compressão na flexão (MPa)

| Denominação | Resistência à compressão (MPa) | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coefficiente de variação |
|-------------|--------------------------------|-------------|---------------------|--------------------------|
| Base | 3,28 | 3,3 | 0,45 | 13,78% |
| | 3,48 | | | |
| | 3,45 | | | |
| | 3,22 | | | |
| | 4,07 | | | |
| | 3,40 | | | |
| | 2,72 | | | |
| | 2,38 | | | |
| | 3,84 | | | |
| | 3,30 | | | |
| | 2,75 | | | |
| 0T0H - Ref. | 2,35 | 2,7 | 0,30 | 11,09% |
| | 2,53 | | | |
| | 2,40 | | | |
| | 2,72 | | | |
| | 2,95 | | | |
| | 3,18 | | | |
| 0T2H | 2,12 | 2,4 | 0,26 | 10,68% |
| | 2,25 | | | |
| | 2,25 | | | |
| | 2,55 | | | |
| | 2,57 | | | |
| 0T8H | 2,11 | 2,6 | 0,27 | 10,73% |
| | 2,35 | | | |
| | 2,61 | | | |
| | 2,53 | | | |
| | 2,90 | | | |
| | 2,85 | | | |
| 10T0H | 3,41 | 2,9 | 0,29 | 10,16% |
| | 2,56 | | | |
| | 2,63 | | | |
| | 3,04 | | | |
| | 2,90 | | | |
| | 2,69 | | | |
| 10T2H | 3,35 | 3,0 | 0,36 | 12,01% |
| | 3,01 | | | |
| | 3,05 | | | |
| | 3,22 | | | |
| | 2,25 | | | |
| | 3,23 | | | |
| 10T8H | 3,53 | 3,1 | 0,30 | 9,72% |
| | 2,89 | | | |
| | 2,77 | | | |
| | 3,51 | | | |
| | 2,97 | | | |
| | 2,96 | | | |

Fonte: própria da autora

Tabela 33 – Absorção de água por capilaridade (g/cm²) e coeficiente de capilaridade (g/dm².min^{1/2})

| Denominação | m0 (g) | m10 (g) | m90 (g) | A10min (g/cm ²) | A10min média (g/cm ²) | A90min (g/cm ²) | A90min média (g/cm ²) | Coeficiente de capilaridade [g/dm ² .min ^{1/2}] | Coeficiente de capilaridade médio [g/dm ² .min ^{1/2}] | Desvio padrão [g/dm ² .min ^{1/2}] | Coeficiente de variação |
|-------------|--------|---------|---------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|--|--|-------------------------|
| Base | 416,15 | 418,93 | 421,64 | 0,17 | 0,17 | 0,34 | 0,29 | 2,7 | 1,9 | 0,12 | 6,23% |
| | 406,11 | 409,23 | 411,26 | 0,20 | | 0,32 | | 2,0 | | | |
| | 412,22 | 414,52 | 416,29 | 0,14 | | 0,25 | | 1,8 | | | |
| | 401,87 | 405,15 | 407,11 | 0,20 | | 0,33 | | 2,0 | | | |
| | 415,30 | 416,85 | 418,58 | 0,10 | | 0,20 | | 1,7 | | | |
| | 405,45 | 408,37 | 410,33 | 0,18 | | 0,31 | | 2,0 | | | |
| | 294,66 | 296,77 | 299,82 | 0,13 | | 0,32 | | 3,1 | | | |
| 0T0H - Ref. | 301,63 | 303,30 | 306,06 | 0,10 | 0,12 | 0,28 | 0,30 | 2,8 | 2,9 | 0,27 | 9,21% |
| | 299,10 | 301,10 | 304,41 | 0,13 | | 0,33 | | 3,3 | | | |
| | 307,37 | 309,20 | 312,31 | 0,11 | | 0,31 | | 3,1 | | | |
| | 300,74 | 303,12 | 305,88 | 0,15 | | 0,32 | | 2,8 | | | |
| | 303,83 | 305,61 | 308,11 | 0,11 | | 0,27 | | 2,5 | | | |
| | 306,68 | 309,96 | 314,80 | 0,20 | | 0,51 | | 4,8 | | | |
| | 306,06 | 308,67 | 313,04 | 0,16 | | 0,44 | | 4,4 | | | |
| 0T2H | 314,35 | 316,75 | 321,07 | 0,15 | 0,17 | 0,42 | 0,48 | 4,3 | 4,9 | 0,43 | 8,79% |
| | 312,05 | 314,78 | 319,73 | 0,17 | | 0,48 | | 5,0 | | | |
| | 296,75 | 299,40 | 304,63 | 0,17 | | 0,49 | | 5,2 | | | |
| | 310,32 | 313,37 | 318,88 | 0,19 | | 0,54 | | 5,5 | | | |
| | 311,95 | 314,39 | 317,40 | 0,15 | | 0,34 | | 3,0 | | | |
| | 308,71 | 310,87 | 314,19 | 0,14 | | 0,34 | | 3,3 | | | |
| | 306,53 | 308,47 | 311,05 | 0,12 | | 0,28 | | 2,6 | | | |
| 0T8H | 311,69 | 313,81 | 317,02 | 0,13 | 0,14 | 0,33 | 0,33 | 3,2 | 3,1 | 0,33 | 10,65% |
| | 313,96 | 315,92 | 318,77 | 0,12 | | 0,30 | | 2,8 | | | |
| | 307,83 | 310,21 | 313,81 | 0,15 | | 0,37 | | 3,6 | | | |
| | 307,25 | 309,57 | 312,82 | 0,15 | | 0,35 | | 3,3 | | | |
| | 315,83 | 318,07 | 321,61 | 0,14 | | 0,36 | | 3,5 | | | |
| | 316,25 | 318,28 | 321,53 | 0,13 | | 0,33 | | 3,3 | | | |
| | 324,48 | 326,44 | 329,39 | 0,12 | | 0,31 | | 2,9 | | | |
| 10T0H | 320,05 | 322,40 | 325,99 | 0,15 | 0,13 | 0,37 | 0,35 | 3,6 | 3,4 | 0,35 | 10,22% |
| | 318,15 | 319,96 | 324,03 | 0,11 | | 0,37 | | 4,1 | | | |
| | 313,70 | 316,49 | 320,43 | 0,17 | | 0,42 | | 3,9 | | | |
| | 310,11 | 312,67 | 316,15 | 0,16 | | 0,38 | | 3,5 | | | |
| | 313,99 | 316,71 | 320,11 | 0,17 | | 0,38 | | 3,4 | | | |
| | 312,87 | 315,23 | 318,24 | 0,15 | | 0,34 | | 3,0 | | | |
| | 319,88 | 322,76 | 326,82 | 0,18 | | 0,43 | | 4,1 | | | |
| 10T2H | 305,16 | 308,12 | 311,92 | 0,18 | 0,17 | 0,42 | 0,40 | 3,8 | 3,6 | 0,36 | 9,90% |
| | 308,54 | 311,23 | 314,75 | 0,17 | | 0,39 | | 3,5 | | | |
| | 311,31 | 313,86 | 316,92 | 0,16 | | 0,35 | | 3,1 | | | |
| | 304,75 | 307,13 | 311,23 | 0,15 | | 0,41 | | 4,1 | | | |
| | 312,60 | 314,84 | 318,25 | 0,14 | | 0,35 | | 3,4 | | | |
| | 307,27 | 310,08 | 313,39 | 0,18 | | 0,38 | | 3,3 | | | |
| | 318,99 | 321,43 | 325,34 | 0,15 | | 0,40 | | 3,9 | | | |
| 10T8H | | | | | 0,16 | | 0,38 | | 3,6 | 0,35 | 9,96% |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Fonte: própria da autora

Tabela 34 – Coeficiente de absorção de água ISO 15148:2016

| Denominação | Peso 0 min (g) | Peso 5 min (g) | Peso 20 min (g) | Peso 1 h (g) | Peso 2 h (g) | Peso 4 h (g) | Peso 6 h (g) | Peso 7 h (g) | Peso 20 h (g) | Peso 21 h (g) | Peso 22 h (g) | Peso 24 h (g) | Área da base - A (m ²) | Equação da reta |
|-------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------------|------------------|
| 0T0H - Ref. | 298,92 | 302,70 | 306,64 | 312,86 | 318,77 | 326,55 | 332,35 | 334,77 | 358,07 | 359,27 | 360,51 | 362,92 | 0,006 | Y=0,0371X+0,1217 |
| 0T2H | 307,04 | 311,35 | 317,33 | 326,69 | 334,59 | 345,11 | 352,71 | 355,71 | 382,28 | 383,22 | 384,02 | 385,43 | 0,006 | Y=0,045X+0,4568 |
| 0T8H | 308,92 | 313,59 | 319,32 | 327,38 | 334,62 | 343,24 | 349,88 | 352,09 | 377,43 | 378,67 | 379,77 | 381,95 | 0,006 | Y=0,0411X+0,4446 |
| 10T0H | 313,57 | 315,63 | 318,12 | 322,99 | 328,33 | 335,94 | 342,14 | 345,06 | 374,66 | 375,91 | 377,57 | 380,54 | 0,006 | Y=0,0399X-0,6295 |
| 10T2H | 311,03 | 313,32 | 316,65 | 321,79 | 326,99 | 334,33 | 340,14 | 342,61 | 367,37 | 368,37 | 369,75 | 372,20 | 0,006 | Y=0,036X-0,2729 |
| 10T8H | 309,56 | 312,96 | 316,59 | 322,55 | 328,17 | 335,87 | 343,43 | 346,48 | 373,12 | 374,09 | 375,37 | 377,64 | 0,006 | Y=0,0396X-0,1512 |

| Denominação | Coef. Absorção médio (kg/m ² .s ^{1/2}) | Desvio padrão (kg/m ² .s ^{1/2}) | Coeficiente de variação (%) |
|-------------|---|--|-----------------------------|
| 0T0H - Ref. | 0,037 | 0,0050 | 13,40 |
| 0T2H | 0,045 | 0,0011 | 2,54 |
| 0T8H | 0,041 | 0,0030 | 7,36 |
| 10T0H | 0,040 | 0,0044 | 10,91 |
| 10T2H | 0,036 | 0,0065 | 18,13 |
| 10T8H | 0,040 | 0,0026 | 6,55 |

Fonte: própria da autora

Tabela 35 – Permeabilidade ao vapor de água

| | | Medição | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | TOTAL |
|-------------|-------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | Temperatura média (°C) | 21,88 | 21,65 | 22,20 | 22,35 | 21,83 | 21,87 | 22,05 | 22,45 | 21,97 | 21,93 | 22,03 | 22,02 |
| | | Umidade relativa média (%) | 52,00 | 54,00 | 53,33 | 47,33 | 51,67 | 50,33 | 51,00 | 49,33 | 50,00 | 52,00 | 50,67 | 51,06 |
| Denominação | CP | Sentido | Peso (g) |
| 0T0H | 1 B+A | A p/cima | 611,45 | 611,71 | 612,45 | 613,33 | 613,87 | 614,15 | 615,44 | 615,86 | 616,28 | 616,68 | 616,97 | |
| | 2 B+A | B p/cima | 619,74 | 619,89 | 620,57 | 621,60 | 621,91 | 622,36 | 623,65 | 624,01 | 624,44 | 624,97 | 625,37 | |
| | 3 B+A | B p/cima | 614,03 | 614,04 | 614,92 | 615,81 | 616,35 | 616,61 | 618,09 | 618,38 | 618,65 | 619,18 | 619,75 | |
| | 4 B+A | A p/cima | 645,63 | 645,49 | 646,05 | 646,71 | 647,11 | 647,29 | 648,47 | 648,67 | 648,93 | 649,44 | 649,83 | |
| 0T2H | 1 B+A | B p/cima | 637,42 | 637,69 | 638,44 | 639,55 | 640,01 | 640,33 | 641,93 | 642,35 | 642,84 | 643,11 | 643,81 | |
| | 2 B+A | B p/cima | 648,53 | 648,16 | 648,40 | 649,22 | 649,51 | 649,77 | 650,78 | 651,07 | 651,50 | 651,80 | 652,27 | |
| | 3 B+A | A p/cima | 628,97 | 629,04 | 629,62 | 630,39 | 630,74 | 631,13 | 632,63 | 632,88 | 633,23 | 633,92 | 634,33 | |
| | 4 B+A | A p/cima | 612,55 | 612,59 | 613,14 | 613,99 | 614,47 | 614,78 | 616,09 | 616,54 | 616,95 | 617,35 | 617,86 | |
| 0T8H | 1 B+A | B p/cima | 604,39 | 604,45 | 609,22 | 606,05 | 606,67 | 607,01 | 608,46 | 608,77 | 609,33 | 609,63 | 610,11 | |
| | 2 B+A | B p/cima | 629,73 | 629,51 | 629,84 | 630,56 | 630,91 | 631,10 | 632,22 | 632,46 | 632,84 | 633,17 | 633,65 | |
| | 3 B+A | A p/cima | 639,79 | 639,83 | 640,41 | 641,32 | 641,83 | 642,09 | 643,33 | 643,70 | 644,14 | 644,60 | 645,06 | |
| | 4 B+A | A p/cima | 613,90 | 613,82 | 614,34 | 615,05 | 615,33 | 615,68 | 616,97 | 617,24 | 617,51 | 617,96 | 618,39 | |
| 10T0H | 1 B+A | A p/cima | 646,48 | 646,73 | 647,41 | 648,17 | 648,52 | 648,99 | 650,02 | 650,43 | 650,92 | 651,25 | 651,55 | |
| | 2 B+A | A p/cima | 659,01 | 658,95 | 659,98 | 660,58 | 661,03 | 661,43 | 662,68 | 663,14 | 663,57 | 663,93 | 664,40 | |
| | 3 B+A | B p/cima | 627,05 | 626,85 | 627,67 | 628,14 | 628,59 | 628,91 | 630,16 | 630,62 | 631,08 | 631,39 | 631,73 | |
| | 4 B+A | B p/cima | 629,10 | 628,97 | 629,77 | 630,23 | 630,64 | 631,14 | 632,31 | 632,74 | 633,15 | 633,50 | 633,98 | |
| 10T2H | 1 B+A | A p/cima | 631,36 | 631,36 | 632,47 | 633,28 | 633,81 | 634,34 | 635,63 | 639,09 | 636,59 | 637,02 | 637,49 | |
| | 2 B+A | A p/cima | 603,58 | 603,44 | 604,07 | 604,61 | 605,01 | 605,41 | 606,42 | 606,89 | 607,25 | 607,56 | 607,92 | |
| | 3 B+A | B p/cima | 644,45 | 644,53 | 645,08 | 645,66 | 646,00 | 646,40 | 647,50 | 647,79 | 648,25 | 648,66 | 648,91 | |
| | 4 B+A | B p/cima | 612,22 | 612,32 | 612,98 | 613,74 | 614,25 | 614,56 | 615,83 | 616,39 | 616,72 | 617,13 | 617,55 | |
| 10T8H | 1 B+A | A p/cima | 608,02 | 608,14 | 609,16 | 609,94 | 610,43 | 610,88 | 612,09 | 612,55 | 612,95 | 613,39 | 613,73 | |
| | 2 B+A | A p/cima | 604,43 | 604,45 | 605,59 | 606,44 | 606,83 | 607,39 | 608,78 | 609,21 | 609,67 | 610,12 | 610,56 | |
| | 3 B+A | B p/cima | 611,82 | 611,97 | 612,77 | 613,66 | 614,04 | 614,63 | 615,83 | 616,26 | 616,72 | 617,18 | 617,58 | |
| | 4 B+A | B p/cima | 607,31 | 607,23 | 608,08 | 608,84 | 609,28 | 609,65 | 610,97 | 611,26 | 611,79 | 612,20 | 612,67 | |
| 0T0H | 1 A | - | 486,08 | 486,88 | 488,89 | 490,39 | 491,21 | 491,98 | 494,31 | 495,00 | 495,67 | 496,48 | 497,13 | |
| | 2 A | - | 525,39 | 526,01 | 527,88 | 529,09 | 529,98 | 530,62 | 532,73 | 533,32 | 533,96 | 534,66 | 535,32 | |
| | 3 A | - | 491,12 | 492,04 | 494,09 | 495,49 | 496,33 | 497,10 | 499,44 | 500,15 | 500,98 | 501,86 | 502,51 | |
| 0T2H | 1 A | - | 475,14 | 475,72 | 477,29 | 478,63 | 479,48 | 480,09 | 482,18 | 482,94 | 483,67 | 484,34 | 485,07 | |
| | 2 A | - | 505,06 | 505,66 | 506,73 | 508,06 | 508,80 | 509,32 | 511,53 | 512,11 | 512,80 | 513,67 | 514,35 | |
| | 3 A | - | 528,12 | 528,47 | 530,16 | 531,20 | 531,94 | 532,53 | 534,35 | 534,96 | 535,80 | 536,56 | 537,22 | |
| 0T8H | 1 A | - | 506,23 | 506,94 | 508,29 | 509,57 | 510,38 | 511,03 | 513,17 | 513,76 | 514,63 | 515,53 | 516,31 | |
| | 2 A | - | 508,07 | 508,64 | 510,13 | 511,48 | 512,20 | 512,85 | 515,01 | 515,62 | 516,40 | 517,22 | 517,81 | |
| | 3 A | - | 514,72 | 515,41 | 517,13 | 518,39 | 519,07 | 519,74 | 521,94 | 522,53 | 523,37 | 524,11 | 524,87 | |
| 10T0H | 1 A | - | 521,04 | 521,80 | 523,79 | 525,19 | 525,92 | 526,75 | 528,85 | 529,55 | 530,20 | 530,82 | 531,61 | |
| | 2 A | - | 510,72 | 511,37 | 513,33 | 514,60 | 515,41 | 516,01 | 518,10 | 518,61 | 519,44 | 520,18 | 520,91 | |
| | 3 A | - | 487,50 | 488,16 | 490,21 | 491,18 | 492,13 | 492,76 | 494,90 | 495,53 | 496,34 | 497,08 | 497,84 | |
| 10T2H | 1 A | - | 516,34 | 516,86 | 518,76 | 520,32 | 521,07 | 521,71 | 523,94 | 524,64 | 525,28 | 526,13 | 526,90 | |
| | 2 A | - | 523,79 | 524,43 | 526,37 | 527,68 | 528,39 | 529,13 | 531,39 | 532,08 | 532,90 | 533,61 | 534,34 | |
| | 3 A | - | 504,44 | 505,24 | 507,26 | 508,58 | 509,29 | 510,14 | 512,34 | 512,99 | 513,78 | 514,52 | 515,23 | |
| 10T8H | 1 A | - | 517,28 | 517,87 | 519,59 | 521,19 | 522,02 | 522,68 | 524,95 | 525,67 | 526,34 | 527,10 | 527,88 | |
| | 2 A | - | 529,08 | 529,85 | 531,79 | 532,92 | 533,68 | 534,31 | 536,34 | 536,91 | 537,63 | 538,37 | 539,06 | |
| | 3 A | - | 500,49 | 501,24 | 503,20 | 504,37 | 505,07 | 505,81 | 507,97 | 508,56 | 509,39 | 509,92 | 510,66 | |

| Denominação | CP | Sentido | Tempo (s) | Área do teste (m ²) | Variação peso (kg) | Taxa de mudança de massa (g) (kg/s) | Transmissão do vapor de água [WVT] (kg/s.m ²) | Permeância (W ou Λ) (kg/s.m ² .Pa) | Espessura média (m) | Permeabilidade (δ) (kg/s.m.Pa) | Fator de resistência à difusão de vapor de água [μ] | Espessura de ar equivalente [S _{ae}] (m) | Permeabilidade ao vapor de água do ar (g/h.m.Pa) | | |
|-------------|-------|----------|-----------|---------------------------------|--------------------|-------------------------------------|---|---|---------------------|--------------------------------|---|--|--|--------------------------|----------|
| | | | | | | | | | | | | | Pressão Ambiente (Pa) | Pressão Saturação S (Pa) | 1,95E-10 |
| 0T0H | 1 B+A | A p/cima | 950400 | 0,0068 | 0,0055 | 5,81E-09 | 8,54E-07 | 6,34E-10 | 0,030 | 1,87E-11 | 10,44 | 0,31 | 101090 | 2640 | |
| | 2 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0068 | 0,0056 | 5,92E-09 | 8,78E-07 | 6,51E-10 | 0,029 | 1,89E-11 | 10,34 | 0,30 | | | |
| | 3 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0068 | 0,0057 | 6,02E-09 | 8,85E-07 | 6,57E-10 | 0,029 | 1,92E-11 | 10,18 | 0,30 | | | |
| 0T2H | 1 B+A | A p/cima | 950400 | 0,0070 | 0,0042 | 4,42E-09 | 6,35E-07 | 4,71E-10 | 0,030 | 1,42E-11 | 13,74 | 0,41 | | | |
| | 2 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0066 | 0,0064 | 6,72E-09 | 1,02E-06 | 7,59E-10 | 0,031 | 2,36E-11 | 8,28 | 0,26 | | | |
| | 3 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0064 | 0,0037 | 3,94E-09 | 6,11E-07 | 4,53E-10 | 0,031 | 1,40E-11 | 13,99 | 0,43 | | | |
| 0T8H | 1 B+A | A p/cima | 950400 | 0,0066 | 0,0054 | 5,64E-09 | 8,55E-07 | 6,34E-10 | 0,031 | 1,97E-11 | 9,92 | 0,31 | | | |
| | 2 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0068 | 0,0053 | 5,99E-09 | 8,22E-07 | 6,10E-10 | 0,030 | 1,82E-11 | 10,71 | 0,32 | | | |
| | 3 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0069 | 0,0057 | 6,02E-09 | 8,78E-07 | 6,51E-10 | 0,030 | 1,97E-11 | 9,93 | 0,30 | | | |
| 10T0H | 1 B+A | A p/cima | 950400 | 0,0070 | 0,0039 | 4,12E-09 | 4,39E-10 | 4,39E-10 | 0,029 | 1,29E-11 | 15,08 | 0,44 | | | |
| | 2 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0069 | 0,0053 | 5,59E-09 | 8,07E-07 | 5,98E-10 | 0,030 | 1,80E-11 | 10,86 | 0,33 | | | |
| | 3 B+A | A p/cima | 950400 | 0,0063 | 0,0045 | 4,72E-09 | 7,55E-07 | 5,60E-10 | 0,031 | 1,71E-11 | 11,41 | 0,35 | | | |
| 10T2H | 1 B+A | A p/cima | 950400 | 0,0063 | 0,0051 | 5,33E-09 | 8,46E-07 | 6,27E-10 | 0,031 | 1,92E-11 | 10,16 | 0,31 | | | |
| | 2 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0063 | 0,0054 | 5,67E-09 | 9,02E-07 | 6,69E-10 | 0,031 | 2,10E-11 | 9,29 | 0,29 | | | |
| | 3 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0068 | 0,0047 | 4,92E-09 | 7,24E-07 | 5,37E-10 | 0,032 | 1,71E-11 | 11,43 | 0,36 | | | |
| 10T8H | 1 B+A | A p/cima | 950400 | 0,0069 | 0,0049 | 5,13E-09 | 7,43E-07 | 5,51E-10 | 0,031 | 1,73E-11 | 11,28 | 0,35 | | | |
| | 2 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0067 | 0,0061 | 6,45E-09 | 9,60E-07 | 7,12E-10 | 0,031 | 2,17E-11 | 8,98 | 0,27 | | | |
| | 3 B+A | A p/cima | 950400 | 0,0068 | 0,0043 | 4,57E-09 | 6,67E-07 | 4,95E-10 | 0,030 | 1,50E-11 | 13,06 | 0,39 | | | |
| 10T8H | 1 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0064 | 0,0045 | 4,69E-09 | 7,33E-07 | 5,44E-10 | 0,031 | 1,69E-11 | 11,55 | 0,36 | | | |
| | 2 B+A | B p/cima | 950400 | 0,0065 | 0,0053 | 5,61E-09 | 8,66E-07 | 6,43E-10 | 0,030 | 1,95E-11 | 10,01 | 0,30 | | | |
| | 3 B+A | A p/cima | 950400 | 0,0063 | 0,0057 | 6,01E-09 | 9,53E-07 | 7,07E-10 | 0,029 | 2,04E-11 | 9,57 | 0,28 | | | |
| 0T0H | 1 A | - | 950400 | 0,0067 | 0,0111 | 1,16E-08 | 1,74E-06 | 1,29E-09 | 0,023 | 2,98E-11 | 6,56 | 0,15 | | | |
| | 2 A | - | 950400 | 0,0066 | 0,0099 | 1,04E-08 | 1,59E-06 | 1,18E-09 | 0,024 | 2,89E-11 | 6,77 | 0,17 | | | |
| | 3 A | - | 950400 | 0,0065 | 0,0114 | 1,20E-08 | 1,85E-06 | 1,37E-09 | 0,023 | 3,10E-11 | 6,31 | 0,14 | | | |
| 0T2H | 1 A | - | 950400 | 0,0064 | 0,0099 | 1,04E-08 | 1,62E-06 | 1,20E-09 | 0,023 | 2,79E-11 | 6,99 | 0,16 | | | |
| | 2 A | - | 950400 | 0,0066 | 0,0093 | 9,77E-09 | 1,47E-06 | 1,09E-09 | 0,024 | 2,59E-11 | 7,55 | 0,18 | | | |
| | 3 A | - | 950400 | 0,0069 | 0,0091 | 9,57E-09 | 1,39E-06 | 1,03E-09 | 0,024 | 2,51E-11 | 7,79 | 0,19 | | | |
| 0T8H | 1 A | - | 950400 | 0,0068 | 0,0101 | 1,06E-08 | 1,56E-06 | 1,16E-09 | 0,024 | 2,77E-11 | 7,06 | 0,17 | | | |
| | 2 A | - | 950400 | 0,0068 | 0,0097 | 1,02E-08 | 1,52E-06 | 1,13E-09 | 0,024 | 2,67E-11 | 7,31 | 0,17 | | | |
| | 3 A | - | 950400 | 0,0063 | 0,0102 | 1,07E-08 | 1,69E-06 | 1,25E-09 | 0,023 | 2,87E-11 | 6,81 | 0,16 | | | |
| 10T0H | 1 A | - | 950400 | 0,0064 | 0,0106 | 1,11E-08 | 1,73E-06 | 1,28E-09 | 0,024 | 3,02E-11 | 6,46 | 0,15 | | | |
| | 2 A | - | 950400 | 0,0063 | 0,0102 | 1,07E-08 | 1,69E-06 | 1,26E-09 | 0,024 | 2,96E-11 | 6,59 | 0,16 | | | |
| | 3 A | - | 950400 | 0,0070 | 0,0103 | 1,09E-08 | 1,57E-06 | 1,16E-09 | 0,024 | 2,75E-11 | 7,09 | 0,17 | | | |
| 10T2H | 1 A | - | 950400 | 0,0068 | 0,0106 | 1,11E-08 | 1,63E-06 | 1,21E-09 | 0,024 | 2,87E-11 | 6,80 | 0,16 | | | |
| | 2 A | - | 950400 | 0,0068 | 0,0106 | 1,11E-08 | 1,63E-06 | 1,21E-09 | 0,024 | 2,85E-11 | 6,86 | 0,16 | | | |
| | 3 A | - | 950400 | 0,0066 | 0,0108 | 1,14E-08 | 1,71E-06 | 1,27E-09 | 0,024 | 3,04E-11 | 6,43 | 0,15 | | | |
| 10T8H | 1 A | - | 950400 | 0,0066 | 0,0106 | 1,12E-08 | 1,69E-06 | 1,26E-09 | 0,024 | 3,06E-11 | 6,39 | 0,16 | | | |
| | 2 A | - | 950400 | 0,0066 | 0,0100 | 1,05E-08 | 1,59E-06 | 1,18E-09 | 0,024 | 2,84E-11 | 6,87 | 0,17 | | | |
| | 3 A | - | 950400 | 0,0064 | 0,0102 | 1,07E-08 | 1,68E-06 | 1,25E-09 | 0,023 | 2,92E-11 | 6,70 | 0,16 | | | |

Fonte: própria da autora

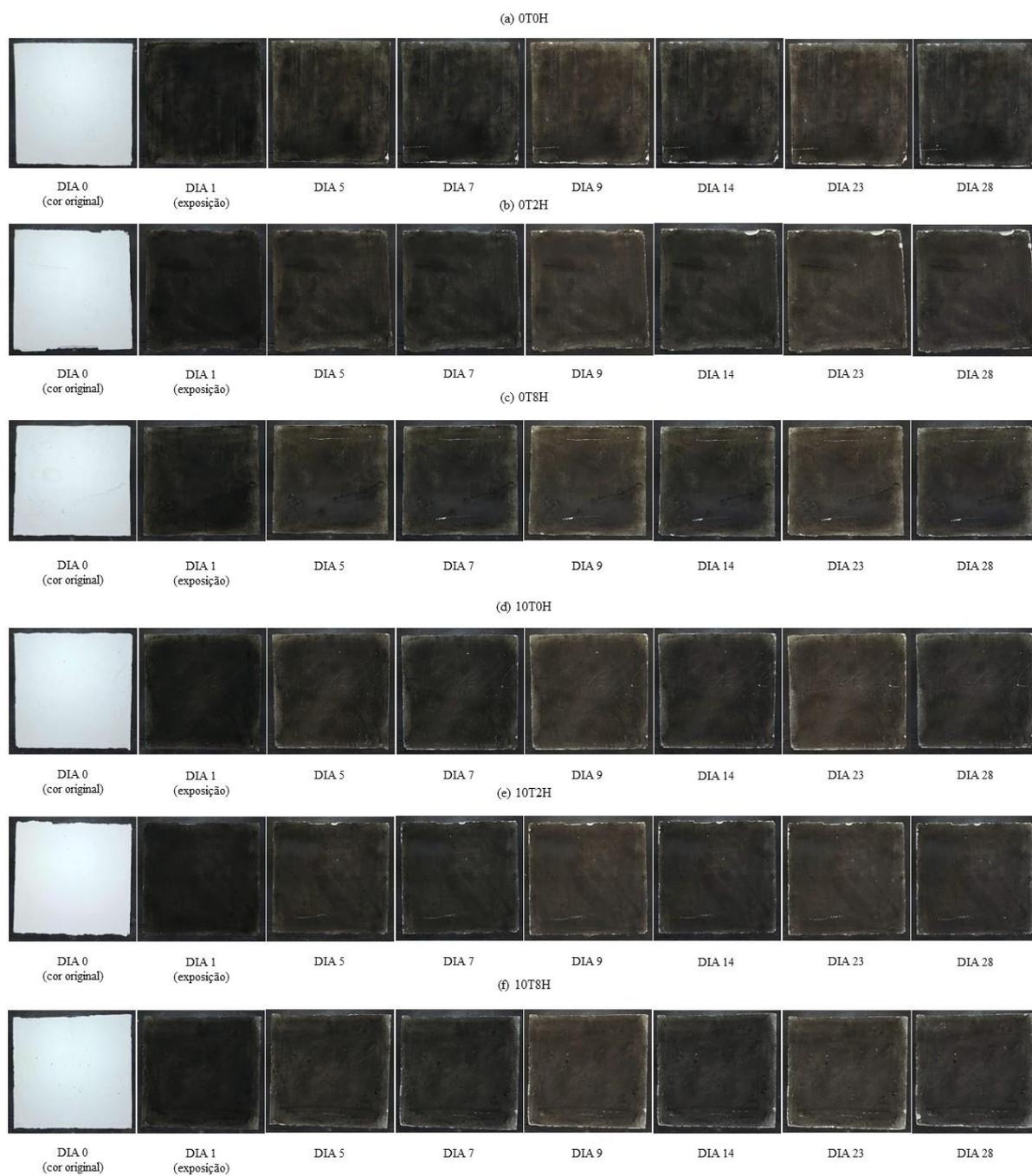
**APÊNDICE C – REGISTRO FOTOGRÁFICO DOS CORPOS DE PROVA EXPOSTOS AO
AMBIENTE NATURAL**

Figura 65 – Placas com manchamentos de fuligem – Placas nº 1



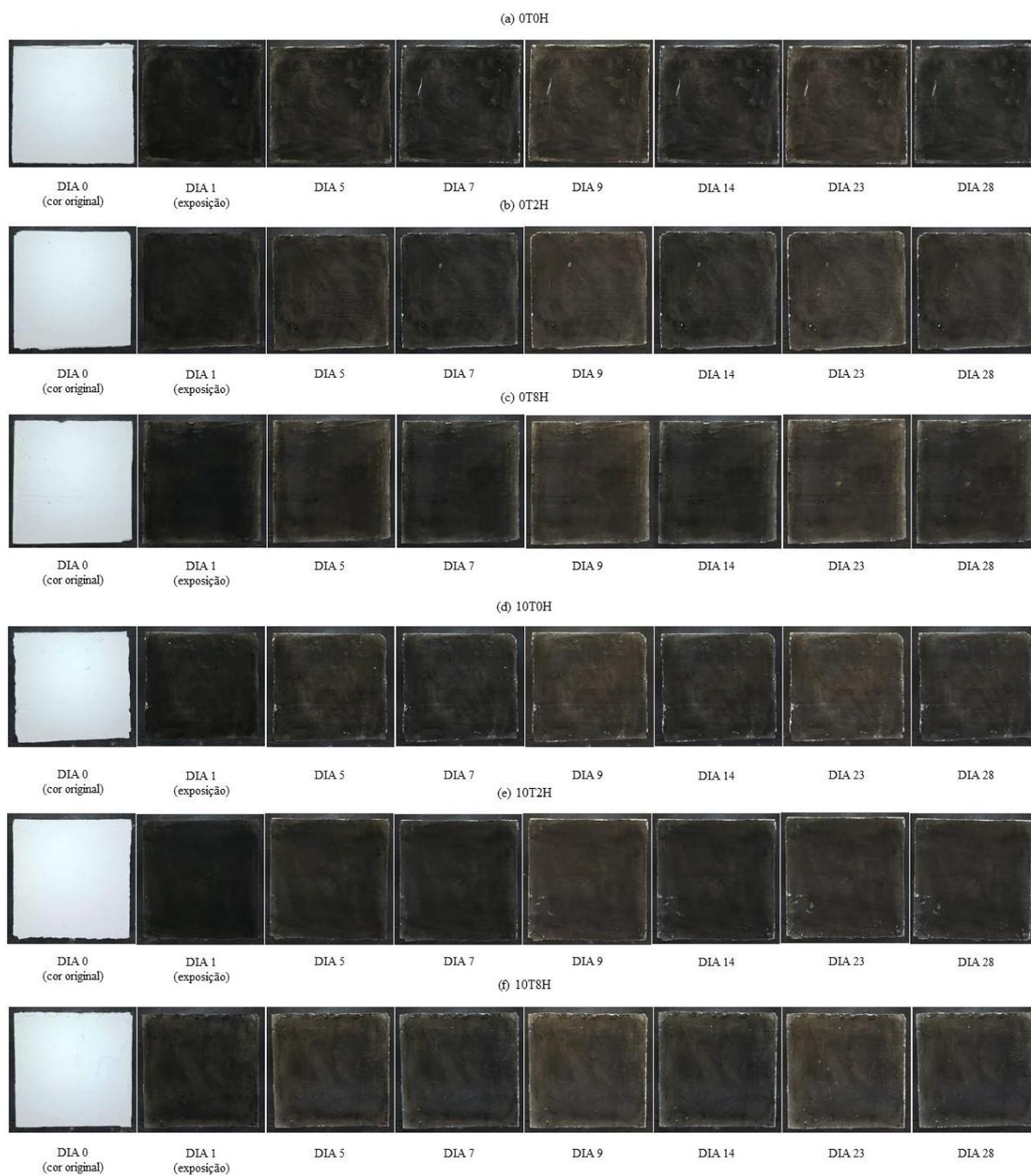
Fonte: própria da autora

Figura 66 – Placas com manchamentos de fuligem – Placas nº 2



Fonte: própria da autora

Figura 67 – Placas com manchamentos de fuligem – Placas nº 3



Fonte: própria da autora

Figura 68 – Placas com manchamentos de Rodamina B – Placas nº 4



Fonte: própria da autora

Figura 69– Placas com manchamentos de Rodamina B – Placas n° 5



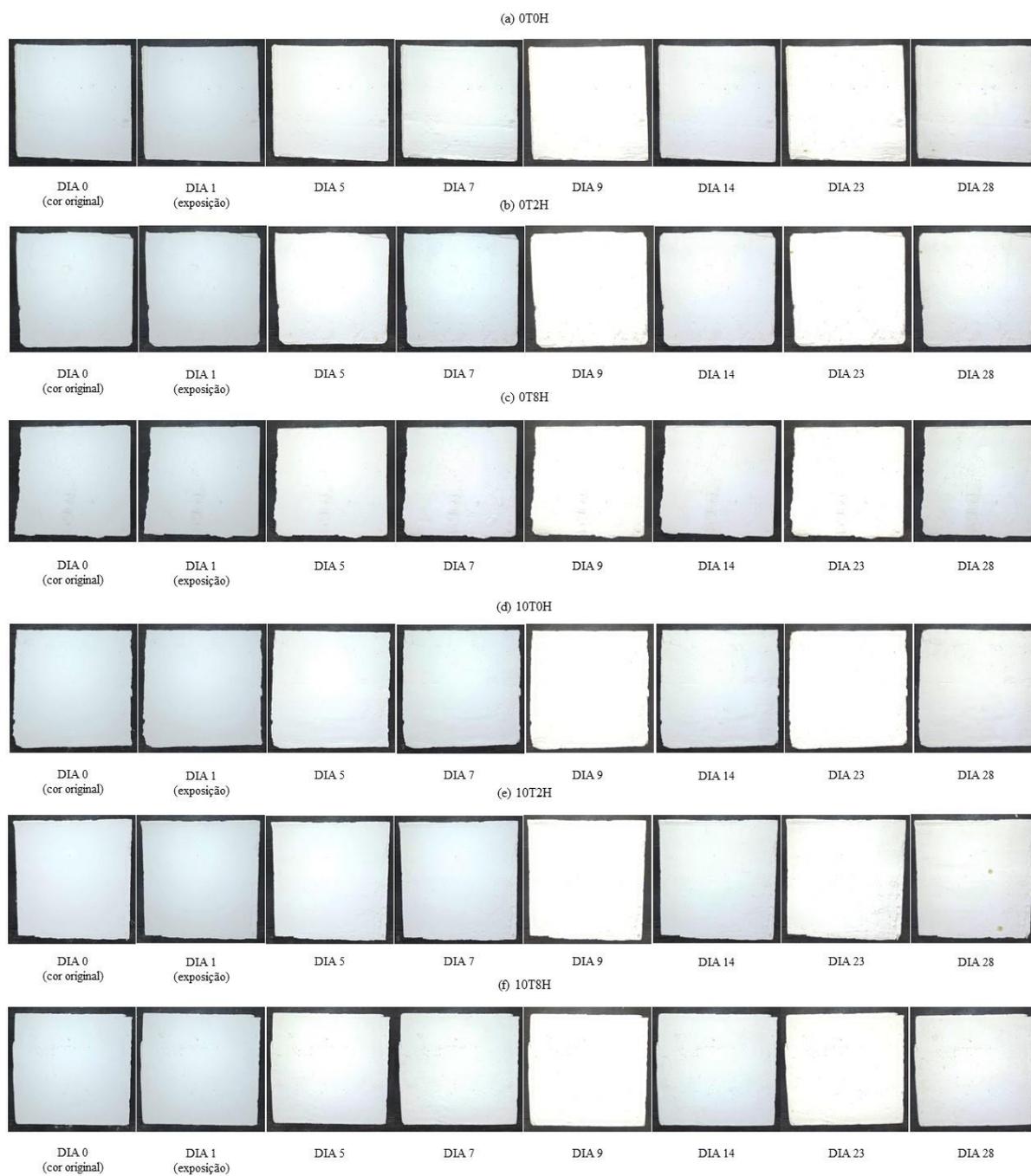
Fonte: própria da autora

Figura 70 – Placas com manchamentos de Rodamina B – Placas nº 6



Fonte: própria da autora

Figura 71 – Placas sem manchamentos – Placas nº 7



Fonte: própria da autora

Figura 72 – Placas sem manchamentos – Placas nº 8



Fonte: própria da autora

**APÊNDICE D – DADOS DA ANÁLISE COLORIMÉTRICA OBTIDOS POR MEIO DO
ESPECTROFOTÔMETRO**

Tabela 36 – Dados colorimétricos médios obtidos por meio do espectrofotômetro

| Denominação | CP | Manchamento | 0 dias (Cor original sem manchamentos) | | | 1 dia (Início exposição) | | | 5 dias | | | ΔE | | | | | | | |
|-------------|----|-----------------|--|----------|----------|--------------------------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|---------|
| | | | L* médio | a* médio | b* médio | C* médio | h- médio | ΔE | L* médio | a* médio | b* médio | | C* médio | h- médio | | | | | |
| 0T0H - Ref. | 1 | Fuligem | 92,0403 | 0,0072 | 2,8068 | 2,8071 | 89,8079 | 19,6113 | 1,2216 | 2,4997 | 2,7871 | 63,0802 | 72,4399 | 3,2120 | 3,3947 | 70,9055 | 1,7392 | | |
| | 2 | Fuligem | 92,6440 | -0,0049 | 2,5681 | 2,5683 | 90,1139 | 21,9284 | 1,3249 | 3,1865 | 3,4546 | 66,6646 | 70,7308 | 4,0842 | 4,2739 | 72,2619 | 1,3644 | | |
| | 3 | Fuligem | 90,3526 | 0,0567 | 2,6719 | 2,6734 | 88,7584 | 19,2876 | 1,2324 | 2,8964 | 2,8964 | 63,7298 | 71,0748 | 3,5054 | 3,6848 | 71,7616 | 2,1280 | | |
| | 4 | Rodamina B | 92,0348 | 0,0137 | 2,7451 | 2,7456 | 89,7390 | 74,2244 | 31,4926 | -12,2658 | 33,7986 | 338,7392 | 39,1594 | 11,9869 | 1,3710 | 12,0935 | 6,9431 | 27,7095 | |
| | 5 | Rodamina B | 92,9115 | 0,0032 | 2,5233 | 2,5234 | 89,8592 | 73,3271 | 30,8161 | -11,7579 | 32,9855 | 339,1319 | 39,2070 | 14,2346 | 0,8968 | 14,3279 | 75,9603 | 25,0237 | |
| | 6 | Rodamina B | 92,7699 | 0,0059 | 2,5936 | 2,5937 | 89,8574 | 74,4799 | 29,7993 | -11,1888 | 31,8319 | 339,4302 | 37,5780 | 8,0741 | 8,5083 | 18,4357 | 30,2306 | | |
| | 7 | Sem manchamento | 92,6299 | 0,0240 | 2,3957 | 2,3960 | 89,4166 | 92,8247 | 0,0496 | 2,3983 | 2,3990 | 88,8233 | 0,1964 | 0,3338 | 2,5811 | 2,5814 | 89,2298 | 0,7362 | |
| | 8 | Sem manchamento | 91,9354 | 0,0300 | 2,9028 | 2,9031 | 89,4459 | 92,3163 | 0,0496 | 2,8896 | 2,8903 | 89,0767 | 0,3816 | 0,0444 | 2,7206 | 2,7212 | 89,0860 | 0,3144 | |
| 0T2H | 1 | Fuligem | 93,1736 | -0,0292 | 2,4110 | 2,4217 | 94,9132 | 22,8684 | 1,4646 | 3,4359 | 3,7373 | 66,5359 | 70,3326 | 4,2672 | 4,4917 | 71,6701 | 1,9014 | | |
| | 2 | Fuligem | 92,6882 | 0,0015 | 2,8777 | 2,8780 | 89,9526 | 20,8143 | 1,3341 | 2,8786 | 3,1749 | 64,8864 | 71,8863 | 3,4603 | 3,6555 | 71,1155 | 1,7095 | | |
| | 3 | Fuligem | 93,1365 | 0,0036 | 2,5388 | 2,5390 | 89,9179 | 21,4105 | 1,5685 | 3,3834 | 3,7319 | 64,8762 | 71,7480 | 1,2532 | 3,6706 | 8,7991 | 21,148 | | |
| | 4 | Rodamina B | 91,6597 | 0,0483 | 2,6074 | 2,6090 | 89,0679 | 72,0559 | 33,9999 | -12,6750 | 35,7248 | 339,2187 | 41,5956 | 18,1039 | -2,4548 | 18,3181 | 352,7714 | 22,0466 | |
| | 5 | Rodamina B | 93,0001 | -0,0053 | 2,3958 | 2,3964 | 90,1518 | 73,8666 | 31,3805 | -12,2206 | 33,6761 | 338,7229 | 39,5576 | 84,6323 | 17,4967 | 17,7904 | 280,7181 | 19,9913 | |
| | 6 | Rodamina B | 92,6681 | 0,0014 | 2,2262 | 2,2266 | 89,9319 | 73,6713 | 31,0736 | -11,6571 | 33,1885 | 339,4365 | 38,9757 | 17,2667 | -2,9210 | 17,6428 | 280,2274 | 19,6077 | |
| | 7 | Sem manchamento | 93,4190 | -0,0412 | 2,4209 | 2,4212 | 90,9755 | 93,6423 | -0,0176 | 2,3699 | 2,3700 | 90,4166 | 0,2303 | 93,1137 | -0,0008 | 2,3683 | 90,0361 | 0,5289 | |
| | 8 | Sem manchamento | 92,4379 | 0,0300 | 2,3874 | 2,3880 | 89,2453 | 93,7094 | 0,0316 | 2,4005 | 2,4007 | 89,2607 | 1,2716 | 92,8997 | 0,0512 | 2,5579 | 88,8734 | 0,8251 | |
| 0T8H | 1 | Fuligem | 92,9883 | -0,0259 | 2,5793 | 2,5796 | 90,5350 | 21,5245 | 1,2642 | 2,9330 | 3,1971 | 65,9959 | 71,4764 | 23,0024 | 0,9726 | 2,7591 | 69,9646 | 1,5164 | |
| | 2 | Fuligem | 92,0155 | 0,0569 | 2,5444 | 2,5457 | 88,7315 | 19,9162 | 1,2338 | 2,5618 | 2,8452 | 63,9557 | 72,1089 | 2,9225 | 2,7090 | 70,6486 | 4,0295 | | |
| | 3 | Fuligem | 92,1422 | 0,0010 | 2,6639 | 2,6640 | 89,9699 | 18,5382 | 1,1093 | 1,9558 | 2,2497 | 60,3706 | 73,6158 | 22,1097 | 0,8809 | 2,6506 | 69,7155 | 3,6456 | |
| | 4 | Rodamina B | 91,7258 | 0,0242 | 2,5030 | 2,5035 | 89,4310 | 74,2717 | 28,3105 | -10,3321 | 30,1380 | 339,9627 | 35,6300 | 15,0047 | -0,9093 | 15,1240 | 214,0416 | 19,6345 | |
| | 5 | Rodamina B | 92,0068 | 0,0142 | 2,5903 | 2,5905 | 89,6083 | 74,5187 | 29,9117 | -10,8991 | 31,8360 | 339,9827 | 37,1707 | 85,5502 | 17,3135 | -1,2912 | 17,4264 | 283,8970 | 19,3060 |
| | 6 | Rodamina B | 91,9221 | 0,0354 | 2,5063 | 2,5077 | 89,1628 | 70,5102 | 36,4177 | -14,6476 | 39,2566 | 338,1311 | 45,5675 | 14,3413 | 1,6585 | 14,4653 | 2,2877 | 32,3018 | |
| | 7 | Sem manchamento | 92,2815 | 0,0376 | 2,6760 | 2,6764 | 89,2073 | 92,3748 | 0,0682 | 2,6557 | 2,6567 | 88,5478 | 0,1003 | 91,8104 | 0,0586 | 2,6648 | 88,7395 | 0,5646 | |
| | 8 | Sem manchamento | 91,8101 | 0,0320 | 2,5294 | 2,5297 | 89,2749 | 92,3648 | 0,0705 | 2,4927 | 2,4939 | 88,3858 | 0,5573 | 92,0464 | 0,0361 | 2,6603 | 89,2305 | 0,3615 | |
| 10T0H | 1 | Fuligem | 92,5938 | 0,0145 | 2,2919 | 2,2920 | 89,6250 | 18,9493 | 1,4199 | 2,0645 | 2,5078 | 55,2346 | 73,6582 | 21,0503 | 0,9552 | 2,7484 | 70,8408 | 2,2578 | |
| | 2 | Fuligem | 92,8206 | 0,0335 | 2,1334 | 2,1338 | 89,0812 | 18,9528 | 1,4767 | 2,4168 | 2,8354 | 58,1103 | 72,9826 | 22,5063 | 1,0881 | 3,7045 | 72,6738 | 2,9068 | |
| | 3 | Fuligem | 92,4652 | 0,0229 | 2,3022 | 2,3024 | 89,3412 | 20,9956 | 1,6839 | 3,0036 | 3,4470 | 60,2674 | 71,4924 | 23,8284 | 1,1153 | 3,6278 | 72,4689 | 2,9560 | |
| | 4 | Rodamina B | 93,0062 | 0,0030 | 2,2737 | 2,2740 | 89,9027 | 69,6899 | 39,8138 | -16,9543 | 43,2737 | 336,9349 | 49,9827 | 88,6430 | 10,8893 | 1,6307 | 11,0376 | 8,9942 | 39,2588 |
| | 5 | Rodamina B | 92,6649 | 0,0220 | 2,2973 | 2,2975 | 89,4499 | 71,9758 | 35,4532 | -14,8814 | 38,4519 | 337,2723 | 44,4805 | 89,0920 | 9,7611 | 1,8602 | 10,1383 | 15,5843 | 35,1188 |
| | 6 | Rodamina B | 92,6664 | 0,0418 | 2,1353 | 2,1357 | 88,8688 | 70,1806 | 38,7359 | -15,9884 | 41,9110 | 337,6651 | 48,2837 | 88,2875 | 8,3336 | 2,6502 | 8,8493 | 20,6364 | 39,9945 |
| | 7 | Sem manchamento | 93,3193 | 0,0008 | 2,1911 | 2,1911 | 89,9807 | 93,5183 | 0,0461 | 2,1789 | 2,1794 | 88,7927 | 0,2044 | 93,1009 | 0,0096 | 2,3324 | 89,7678 | 0,4462 | |
| | 8 | Sem manchamento | 92,5694 | 0,0157 | 2,4731 | 2,4735 | 89,6271 | 92,7150 | 0,0699 | 2,4430 | 2,4444 | 88,3575 | 0,1582 | 92,6475 | 0,0181 | 2,4721 | 89,5721 | 0,0899 | |
| 10T2H | 1 | Fuligem | 92,6082 | 0,0165 | 2,2436 | 2,2439 | 89,5993 | 20,1996 | 1,4284 | 2,3172 | 2,7228 | 58,2385 | 72,4224 | 22,2940 | 1,1564 | 3,2085 | 67,4830 | 2,2923 | |
| | 2 | Fuligem | 93,2339 | -0,0397 | 2,3599 | 2,3604 | 90,9544 | 20,3342 | 1,6299 | 2,9504 | 3,3736 | 60,6767 | 72,9211 | 23,3982 | 1,1284 | 3,3334 | 70,1004 | 3,1282 | |
| | 3 | Fuligem | 92,3058 | 0,0253 | 2,3873 | 2,3876 | 89,3816 | 19,3567 | 1,3653 | 2,0988 | 2,5069 | 56,5869 | 72,9619 | 20,7045 | 1,0057 | 2,7428 | 69,7431 | 1,5364 | |
| | 4 | Rodamina B | 93,1248 | -0,0102 | 2,3264 | 2,3264 | 90,2457 | 74,0257 | 31,5464 | -12,9674 | 34,1092 | 337,6809 | 39,9311 | 89,6769 | 6,2819 | 2,7249 | 6,8710 | 23,5386 | 33,6080 |
| | 5 | Rodamina B | 92,9024 | 0,0106 | 2,2523 | 2,2527 | 89,6899 | 74,0922 | 32,3706 | -13,5444 | 35,0915 | 337,3471 | 40,6267 | 89,4135 | 6,7691 | 2,1527 | 7,2769 | 21,2089 | 33,7131 |
| | 6 | Rodamina B | 92,6626 | 0,0005 | 2,3553 | 2,3555 | 89,9698 | 76,4431 | 27,4314 | -10,8069 | 29,4853 | 338,5111 | 34,4786 | 89,9759 | 5,4412 | 2,6484 | 6,0869 | 26,7207 | 29,1161 |
| | 7 | Sem manchamento | 93,2802 | -0,0036 | 2,2732 | 2,2732 | 90,0868 | 93,4540 | 0,0437 | 2,2914 | 2,2919 | 88,7889 | 0,1824 | 93,0267 | 0,0015 | 2,3334 | 89,9861 | 0,4319 | |
| | 8 | Sem manchamento | 92,3830 | 0,0267 | 2,2586 | 2,2595 | 89,3073 | 92,3849 | 0,0879 | 2,2398 | 2,2426 | 87,7372 | 0,0640 | 91,6961 | 0,0629 | 2,4580 | 88,5666 | 0,7230 | |
| 10T8H | 1 | Fuligem | 92,4732 | 0,0318 | 2,2976 | 2,2981 | 89,1891 | 20,0449 | 1,3644 | 2,4408 | 2,8022 | 60,0546 | 72,4407 | 22,8429 | 1,0096 | 2,9346 | 70,8921 | 2,8633 | |
| | 2 | Fuligem | 92,1322 | 0,0283 | 2,3728 | 2,3735 | 89,2607 | 20,2276 | 1,4028 | 2,6491 | 3,0020 | 61,3667 | 71,9182 | 22,5585 | 1,0806 | 3,1241 | 70,7163 | 2,4005 | |
| | 3 | Fuligem | 92,4640 | 0,0217 | 2,2553 | 2,2554 | 89,4472 | 21,7947 | 1,5400 | 3,2509 | 3,6304 | 63,9604 | 70,6926 | 24,1308 | 0,9015 | 2,6862 | 66,3639 | 2,4867 | |
| | 4 | Rodamina B | 92,5099 | 0,0402 | 2,2746 | 2,2751 | 88,9464 | 71,2972 | 36,4154 | -14,9125 | 39,3516 | 337,7383 | 45,4811 | 89,7038 | 8,4573 | 1,5708 | 8,6442 | 12,6529 | 37,3117 |
| | 5 | Rodamina B | 91,9784 | 0,0347 | 2,3478 | 2,3483 | 89,1475 | 75,5085 | 28,5915 | -11,4495 | 30,7995 | 338,1853 | 35,7368 | 89,7773 | 5,6251 | 2,2050 | 6,1398 | 23,9989 | 30,2903 |
| | 6 | Rodamina B | 92,8697 | 0,0186 | 2,1916 | 2,1918 | 89,5171 | 72,6975 | 33,8485 | -13,7983 | 36,5536 | 337,8371 | 42,5095 | 71,8846 | 2,6898 | 7,6793 | 20,5034 | 35,4354 | |
| | 7 | Sem manchamento | 93,0192 | 0,0174 | 2,1794 | 2,1795 | 89,5390 | 93,2075 | 0,0855 | 2,1539 | 2,1556 | 87,7170 | 0,2018 | 92,8041 | 0,0339 | 2,2141 | 89,1260 | 0,4110 | |
| | 8 | Sem manchamento | 92,6200 | 0,0148 | 2,3153 | 2,3154 | 89,6286 | 92,9836 | 0,0641 | 2,2787 | 2,2797 | 88,3956 | 0,3687 | 92,3976 | 0,0727 | 2,4547 | 88,3099 | 0,6120 | |

| Denominação | CP | Manchamento | 7 dias | | | | | 9 dias | | | | | 14 dias | | | | | | | |
|-------------|----|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| | | | L* médio | a* médio | b* médio | C* médio | h* médio | ΔE | L* médio | a* médio | b* médio | C* médio | h* médio | ΔE | L* médio | a* médio | b* médio | C* médio | h* médio | ΔE |
| OTOH - Ref. | 1 | Fuligem | 23,1790 | 1,0691 | 3,2898 | 3,4600 | 71,8062 | 3,4882 | 23,8482 | 1,2942 | 3,0842 | 3,3488 | 66,7029 | 4,2776 | 23,9040 | 1,2623 | 3,1683 | 3,4126 | 67,9832 | 4,3447 |
| | 2 | Fuligem | 25,3353 | 1,1948 | 4,0666 | 4,2405 | 73,1245 | 3,5211 | 25,5301 | 1,3188 | 3,8397 | 4,0650 | 70,2824 | 3,6605 | 26,2841 | 1,3350 | 3,8646 | 4,0925 | 70,2299 | 4,4082 |
| | 3 | Fuligem | 24,2238 | 1,1358 | 3,6614 | 3,8345 | 72,5021 | 3,5068 | 24,5884 | 1,2319 | 3,5031 | 3,7162 | 70,2042 | 3,7446 | 24,7711 | 1,2622 | 3,4649 | 3,6898 | 69,6252 | 5,5491 |
| | 4 | Rodamina B | 91,0094 | 3,3646 | 2,8459 | 4,4870 | 42,4110 | 36,0734 | 92,1633 | 1,6709 | 2,8738 | 3,4448 | 60,3106 | 37,9519 | 92,0905 | 1,0846 | 2,8843 | 3,1091 | 69,6006 | 38,3845 |
| | 5 | Rodamina B | 90,3861 | 4,5946 | 3,0579 | 5,7062 | 39,3523 | 34,6134 | 91,5540 | 2,8480 | 3,0466 | 4,4462 | 54,5874 | 36,5186 | 90,9245 | 1,9406 | 3,4013 | 4,1460 | 64,5158 | 37,0576 |
| | 6 | Rodamina B | 91,7839 | 2,4589 | 3,0180 | 3,9141 | 51,1818 | 35,3375 | 92,5809 | 1,3450 | 3,0320 | 3,3325 | 66,2573 | 36,5993 | 92,2749 | 0,8822 | 3,1446 | 2,8781 | 74,4581 | 36,8550 |
| | 7 | Sem manchamento | 92,5338 | 0,0444 | 2,3613 | 2,3618 | 88,9231 | 0,2932 | 92,7898 | 0,3488 | 2,3104 | 2,3122 | 87,9142 | 0,1011 | 92,5304 | 0,1107 | 2,3846 | 2,3872 | 87,3624 | 0,3010 |
| | 8 | Sem manchamento | 92,0847 | 0,0580 | 2,6768 | 2,6777 | 88,7723 | 0,3147 | 92,4429 | 0,0918 | 2,6729 | 2,6746 | 88,0421 | 0,2545 | 92,1682 | 0,1282 | 2,7865 | 2,7896 | 87,3643 | 0,1968 |
| OT2H | 1 | Fuligem | 26,9850 | 1,3149 | 4,3192 | 4,5155 | 72,9447 | 4,2129 | 27,4575 | 1,3277 | 4,2782 | 4,4801 | 72,6351 | 4,6677 | 27,5970 | 1,3995 | 4,2237 | 4,4502 | 71,5350 | 4,7942 |
| | 2 | Fuligem | 24,8991 | 1,1539 | 3,5820 | 3,7640 | 72,0723 | 4,1487 | 25,5941 | 1,1364 | 3,5867 | 3,7636 | 72,3426 | 4,8359 | 25,7448 | 1,2288 | 3,4934 | 3,7046 | 70,5158 | 4,9698 |
| | 3 | Fuligem | 25,7237 | 1,2529 | 3,7657 | 3,9691 | 71,5064 | 4,3416 | 26,1317 | 1,2437 | 3,7888 | 3,9885 | 71,7010 | 4,7497 | 26,6677 | 1,2371 | 3,5292 | 3,7404 | 70,5624 | 2,6696 |
| | 4 | Rodamina B | 90,6778 | 3,4595 | 2,8879 | 4,5281 | 40,9359 | 38,5410 | 91,6284 | 1,8488 | 2,9564 | 3,5371 | 60,3972 | 40,2852 | 91,4406 | 1,2216 | 3,0224 | 3,3008 | 69,8055 | 40,7139 |
| | 5 | Rodamina B | 91,2212 | 2,8405 | 2,8116 | 4,0092 | 45,2559 | 36,6290 | 92,2311 | 1,4624 | 2,8321 | 3,1907 | 62,9500 | 38,1959 | 92,1636 | 0,9940 | 2,9993 | 3,1632 | 71,7364 | 38,5975 |
| | 6 | Rodamina B | 90,8335 | 3,8752 | 2,5741 | 4,7038 | 35,2146 | 31,6884 | 92,0110 | 1,7227 | 2,7331 | 3,2726 | 57,4342 | 37,4428 | 92,0100 | 0,0616 | 2,7874 | 2,9886 | 69,3881 | 38,0227 |
| | 7 | Sem manchamento | 93,1233 | 0,0165 | 2,2298 | 2,2299 | 89,5807 | 0,5387 | 93,6272 | 0,0289 | 2,1887 | 2,1890 | 89,2502 | 0,1877 | 93,3550 | 0,0617 | 2,2170 | 2,2179 | 88,4029 | 0,3350 |
| | 8 | Sem manchamento | 93,4433 | 0,0506 | 2,2690 | 2,2696 | 88,7071 | 0,2975 | 93,8350 | 0,0546 | 2,2347 | 2,2354 | 88,6025 | 0,2092 | 93,4509 | 0,0839 | 2,2635 | 2,2651 | 87,8814 | 0,2972 |
| OT8H | 1 | Fuligem | 24,6832 | 1,0202 | 2,9582 | 3,1305 | 70,7099 | 3,1682 | 24,4918 | 0,9351 | 3,0019 | 3,1454 | 72,4271 | 2,9864 | 24,9085 | 1,0564 | 2,8479 | 3,0412 | 68,9929 | 3,9151 |
| | 2 | Fuligem | 25,6840 | 0,8756 | 2,8028 | 2,9436 | 71,0144 | 5,7840 | 25,8401 | 0,9746 | 2,7520 | 2,8587 | 73,1946 | 5,9462 | 26,1982 | 0,9156 | 2,7800 | 2,9385 | 69,4873 | 6,2939 |
| | 3 | Fuligem | 23,9603 | 0,8911 | 2,7544 | 2,9041 | 70,1928 | 4,8501 | 24,5221 | 0,8001 | 2,9076 | 3,0217 | 73,3007 | 4,9640 | 24,6805 | 0,9457 | 2,8283 | 2,9921 | 69,7920 | 2,0661 |
| | 4 | Rodamina B | 90,1531 | 2,9398 | 3,0227 | 4,2384 | 46,6377 | 32,7756 | 90,9768 | 1,4726 | 3,0371 | 3,3817 | 64,4382 | 34,3230 | 91,0034 | 0,9380 | 3,0663 | 3,2138 | 72,8023 | 34,7666 |
| | 5 | Rodamina B | 90,2717 | 5,4673 | 2,6967 | 6,1605 | 28,8336 | 32,1019 | 91,3575 | 3,2580 | 2,8692 | 4,4516 | 44,9567 | 34,4024 | 91,4258 | 2,4645 | 2,9822 | 4,0531 | 55,1866 | 35,2436 |
| | 6 | Rodamina B | 89,8659 | 6,6716 | 3,0208 | 7,4337 | 27,3366 | 39,6440 | 90,9209 | 0,9675 | 2,6776 | 5,2880 | 43,1963 | 42,3193 | 91,1139 | 2,9762 | 3,4400 | 4,8654 | 55,5036 | 43,2436 |
| | 7 | Sem manchamento | 92,0742 | 0,0766 | 2,6288 | 2,6300 | 88,3402 | 0,3019 | 92,3560 | 0,0845 | 2,6311 | 2,6324 | 88,1603 | 0,0351 | 92,0058 | 0,1270 | 2,7339 | 2,7369 | 87,3523 | 0,3818 |
| | 8 | Sem manchamento | 92,2079 | 0,0605 | 2,4661 | 2,4669 | 88,5981 | 0,1595 | 92,6278 | 0,0627 | 2,4369 | 2,4377 | 88,5049 | 0,2689 | 92,3349 | 0,0971 | 2,5120 | 2,5139 | 87,7884 | 0,4444 |
| 10TOH | 1 | Fuligem | 23,4746 | 1,0018 | 2,8874 | 3,0564 | 70,8179 | 4,6185 | 23,9064 | 0,8771 | 3,0111 | 3,1365 | 73,7514 | 5,0758 | 24,0311 | 0,9730 | 2,8970 | 3,0563 | 71,4306 | 5,1689 |
| | 2 | Fuligem | 24,5711 | 1,1009 | 3,7582 | 3,7465 | 72,6885 | 4,8736 | 24,8827 | 0,9657 | 3,7226 | 3,8474 | 75,3379 | 5,2217 | 25,4249 | 1,0731 | 3,5476 | 3,7078 | 73,0217 | 5,7000 |
| | 3 | Fuligem | 25,8334 | 1,1044 | 3,7130 | 3,8775 | 73,1723 | 4,9237 | 25,8773 | 0,9504 | 3,7580 | 3,8797 | 75,4931 | 4,9938 | 26,4150 | 1,0435 | 3,5573 | 3,7111 | 73,1798 | 5,4851 |
| | 4 | Rodamina B | 90,3842 | 5,6455 | 2,4841 | 6,3708 | 29,1688 | 44,4251 | 91,4187 | 3,9169 | 2,6972 | 4,9952 | 39,8913 | 46,3348 | 91,3945 | 2,7115 | 3,0096 | 4,2398 | 51,3598 | 47,3944 |
| | 5 | Rodamina B | 90,4377 | 5,4244 | 2,5834 | 6,3264 | 33,7076 | 39,3394 | 91,3063 | 3,8436 | 2,7885 | 5,0451 | 42,5293 | 41,0495 | 91,1923 | 3,1272 | 3,0873 | 4,5558 | 47,7254 | 41,6787 |
| | 6 | Rodamina B | 90,1766 | 3,1071 | 3,1750 | 4,5049 | 47,4736 | 45,1275 | 90,9939 | 2,0171 | 3,2753 | 3,8779 | 59,2991 | 46,3956 | 90,8357 | 1,1521 | 3,5260 | 3,7268 | 72,5494 | 47,1168 |
| | 7 | Sem manchamento | 93,0542 | 0,0147 | 2,3159 | 2,3161 | 89,6645 | 0,4848 | 93,4837 | 0,0030 | 2,2858 | 2,2860 | 89,9521 | 0,1204 | 92,8810 | 0,0572 | 2,4250 | 2,4257 | 88,6509 | 0,6832 |
| | 8 | Sem manchamento | 92,4322 | 0,0475 | 2,4108 | 2,4114 | 88,8408 | 0,2855 | 93,0895 | 0,0203 | 2,3676 | 2,3678 | 89,5028 | 0,3852 | 92,5641 | 0,0749 | 2,5103 | 2,5116 | 88,3192 | 0,1653 |
| 10T2H | 1 | Fuligem | 24,6226 | 1,1278 | 3,3240 | 3,5106 | 71,2200 | 4,5460 | 25,0598 | 0,9560 | 3,5452 | 3,6721 | 74,8975 | 5,0351 | 25,1274 | 1,0881 | 3,2962 | 3,4714 | 71,6982 | 5,0356 |
| | 2 | Fuligem | 25,3484 | 1,1121 | 3,3954 | 3,5825 | 69,5442 | 5,0604 | 25,6032 | 0,9221 | 3,5941 | 3,7141 | 74,3936 | 5,3551 | 26,2439 | 1,0658 | 3,704 | 3,5424 | 70,3843 | 5,9514 |
| | 3 | Fuligem | 22,9377 | 1,0345 | 2,8757 | 3,0565 | 70,1444 | 3,6792 | 23,5859 | 0,7954 | 3,2438 | 3,401 | 76,2454 | 4,4184 | 23,8772 | 1,0076 | 2,9691 | 3,1356 | 71,2690 | 4,6173 |
| | 4 | Rodamina B | 91,0717 | 2,0532 | 3,0160 | 3,6602 | 55,3084 | 37,6266 | 91,9300 | 1,2346 | 3,0463 | 3,2894 | 67,8323 | 38,6756 | 91,8602 | 0,7953 | 3,1067 | 3,2087 | 75,6645 | 39,0137 |
| | 5 | Rodamina B | 90,8401 | 1,8267 | 2,7564 | 3,3102 | 56,5835 | 38,4596 | 92,0403 | 1,1342 | 2,8026 | 3,0256 | 67,9886 | 39,5610 | 91,8016 | 0,7000 | 2,8934 | 2,9785 | 76,3917 | 39,8353 |
| | 6 | Rodamina B | 91,1790 | 1,9509 | 2,8084 | 3,4319 | 55,2523 | 32,4312 | 91,8002 | 1,1988 | 2,8645 | 3,1106 | 67,2483 | 33,3301 | 91,5815 | 0,7877 | 3,0210 | 3,1203 | 75,5563 | 33,6266 |
| | 7 | Sem manchamento | 93,0091 | 0,0222 | 2,3470 | 2,3472 | 89,4593 | 0,4492 | 93,4984 | 0,0120 | 2,3198 | 2,3199 | 89,7043 | 0,0642 | 93,9321 | 0,0623 | 2,4915 | 2,4925 | 88,6004 | 0,5592 |
| | 8 | Sem manchamento | 91,9550 | 0,0678 | 2,3525 | 2,3539 | 88,3914 | 0,4448 | 92,3979 | 0,0417 | 2,2826 | 2,2836 | 88,9925 | 0,0643 | 92,0407 | 0,0716 | 2,3578 | 2,3595 | 88,3239 | 0,3642 |
| 10T8H | 1 | Fuligem | 24,8416 | 1,0175 | 2,9905 | 3,1597 | 71,0808 | 4,8405 | 25,2652 | 0,6156 | 3,4944 | 3,5484 | 80,0550 | 5,3779 | 25,3618 | 0,9398 | 2,9687 | 3,1141 | 72,3803 | 5,3599 |
| | 2 | Fuligem | 24,7360 | 1,0750 | 3,2491 | 3,4230 | 71,5302 | 4,5600 | 25,1157 | 0,6385 | 3,7593 | 3,8132 | 80,4144 | 5,0705 | 25,4363 | 0,9902 | 3,1694 | 3,3207 | 72,5686 | 5,2508 |
| | 3 | Fuligem | 25,7626 | 0,8923 | 2,7607 | 2,9113 | 69,4512 | 4,0501 | 25,6842 | 0,8848 | 3,1722 | 3,2104 | 81,3516 | 4,0300 | 26,0064 | 0,8325 | 2,5973 | 2,7460 | 67,6899 | 4,3205 |
| | 4 | Rodamina B | 90,9411 | 4,2795 | 2,2379 | 4,9589 | 33,4171 | 41,3853 | 91,8154 | 2,8848 | 3,3500 | 3,8449 | 44,0454 | 42,9336 | 91,5699 | 1,9476 | 2,5925 | 2,7460 | 67,6899 | 4,3205 |
| | 5 | Rodamina B | 90,9249 | 1,8881 | 2,5277 | 3,1665 | 53,3952 | 33,8541 | 91,6557 | 1,1524 | 2,5724 | 2,8219 | 65,8457 | 34,7887 | 91,4329 | 0,7236 | 2,7358 | 2,8322 | 75,1164 | 35,0917 |
| | 6 | Rodamina B | 90,7074 | 2,6627 | 3,0391 | 4,0489 | 49,1156 | 39,7544 | 91,4888 | 1,6944 | 3,0391 | 3,5591 | 61,9517 | 40,9044 | 91,3819 | 0,9967 | 3,2979 | 3,4851 | 71,9965 | 41,3997 |
| | 7 | Sem manchamento | 92,8659 | 0,0429 | 2,2047 | 2,2051 | 88,8819 | 0,3749 | 93,3783 | 0,0042 | 2,1416 | 2,1416 | 89,8856 | 0,1896 | 92,9065 | 0,0566 | 2,2127 | 2,2134 | 88,5242 | 0,3080 |
| | 8 | Sem manchamento | 92,3457 | 0,0772 | 2,4504 | 2,4516 | 88,2139 | 0,6608 | 92,8071 | 0,0511 | 2,4039 | 2,4045 | 88,7874 | 0,2168 | 92,2989 | 0,1067 | 2,5977 | 2,6000 | 87,6618 | 0,7566 |

| Denominação | CP | Manchamento | 23 dias | | | | | | | | | | 28 dias | | | | | | | | | | Visibilidade da variação de cor ΔE55 = cor no dia 1 (manchamento) é diferente da cor depois de 28 dias de exposição |
|-------------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|------------------|------------------------------|------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| | | | L* médio | a* médio | b* médio | C* médio | h- médio | ΔE | L* médio | a* médio | b* médio | C* médio | h- médio | ΔE | Desvio Padrão ΔE | Coefficiente de variação | | | | | | | |
| 0T0H - Ref. | 1 | Fuligem | 24,5522 | 1,0411 | 3,4128 | 3,5682 | 73,0573 | 5,0279 | 27,2718 | 2,6368 | 1,2009 | 2,9371 | 23,8768 | 7,8976 | 0,6507 | 8,24% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 2 | Fuligem | 27,0381 | 1,1331 | 4,0040 | 4,1620 | 73,9039 | 5,1782 | 29,2715 | 2,5462 | 2,1254 | 3,4143 | 36,8934 | 7,5192 | 0,7519 | 16,68% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 3 | Fuligem | 25,2881 | 1,0940 | 3,6267 | 3,7888 | 73,0685 | 6,0867 | 28,2607 | 2,4993 | 1,9489 | 2,9774 | 30,0899 | 9,1306 | 0,7073 | 7,75% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 4 | Rodamina B | 92,1469 | 1,6995 | 2,8111 | 3,4068 | 62,1666 | 37,8967 | 94,1940 | 1,0540 | 2,8554 | 3,0564 | 69,8931 | 39,4201 | 1,6194 | 4,11% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 5 | Rodamina B | 91,1097 | 1,1151 | 3,1068 | 6,1926 | 36,0914 | 34,6081 | 93,1499 | 3,6607 | 3,1349 | 43,8010 | 36,7717 | 6,1653 | 1,67% | Diferença de cor visível | | | | | | | |
| | 6 | Rodamina B | 92,6286 | 1,4735 | 2,9898 | 3,4873 | 66,1884 | 36,5067 | 94,2578 | 1,8546 | 2,8877 | 3,7652 | 62,4028 | 37,0162 | 1,7773 | 4,80% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| 0T2H | 7 | Sem manchamento | 92,7290 | 0,1159 | 2,3048 | 2,3078 | 87,1368 | 0,1496 | 94,5142 | 0,1255 | 2,3695 | 2,3730 | 86,9771 | 1,6915 | 0,1858 | 10,98% | Diferença de cor não visível | | | | | | |
| | 8 | Sem manchamento | 92,1748 | 0,1810 | 2,8747 | 2,8805 | 86,4060 | 0,1937 | 93,6969 | 0,2029 | 2,8696 | 2,8771 | 85,9528 | 1,3892 | 0,3401 | 24,48% | Diferença de cor não visível | | | | | | |
| | 1 | Fuligem | 28,7146 | 1,2222 | 4,1909 | 4,3671 | 73,6791 | 5,8997 | 30,8964 | 2,3476 | 2,7281 | 3,6158 | 48,5406 | 8,1073 | 1,0445 | 12,88% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 2 | Fuligem | 26,7964 | 1,0478 | 3,6074 | 3,7573 | 73,7510 | 6,0330 | 29,6053 | 2,1915 | 1,8995 | 2,9145 | 40,6898 | 8,8668 | 1,0513 | 11,83% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 3 | Fuligem | 27,3568 | 1,0804 | 3,6036 | 3,7626 | 73,2455 | 5,9703 | 29,7118 | 2,1578 | 2,0384 | 2,9926 | 42,7466 | 8,4301 | 0,9119 | 10,82% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 4 | Rodamina B | 91,6920 | 2,0851 | 2,8975 | 3,6935 | 57,1713 | 40,1085 | 93,7154 | 0,9509 | 2,9450 | 3,1016 | 72,4760 | 42,0245 | 0,5138 | 1,22% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 5 | Rodamina B | 92,1157 | 3,2495 | 2,8617 | 4,4026 | 42,8116 | 36,7676 | 94,1707 | 1,9827 | 2,8353 | 3,6149 | 59,4622 | 38,7707 | 0,9653 | 2,49% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 6 | Rodamina B | 91,9626 | 3,5221 | 2,7358 | 4,5224 | 39,6289 | 36,0668 | 94,1699 | 0,9746 | 2,7244 | 2,9097 | 70,5607 | 39,1531 | 0,3195 | 0,82% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| 0T8H | 7 | Sem manchamento | 93,6202 | 0,0824 | 2,1448 | 2,1465 | 87,7870 | 0,2473 | 95,4051 | 0,0759 | 2,1760 | 2,1775 | 87,9952 | 1,7758 | 0,1751 | 9,86% | Diferença de cor não visível | | | | | | |
| | 8 | Sem manchamento | 93,8133 | 0,0954 | 2,1770 | 2,1791 | 87,4970 | 0,2546 | 95,5754 | 0,0862 | 2,2232 | 2,2249 | 87,7961 | 1,8751 | 0,2665 | 14,21% | Diferença de cor não visível | | | | | | |
| | 1 | Fuligem | 25,2047 | 0,9363 | 2,8309 | 2,9836 | 71,2594 | 3,6963 | 26,9678 | 2,0008 | 1,4787 | 2,5430 | 34,1846 | 5,6822 | 1,0569 | 18,60% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 2 | Fuligem | 26,2157 | 0,8157 | 2,7012 | 2,8295 | 71,2025 | 6,3149 | 28,0323 | 1,7972 | 1,4692 | 2,4317 | 34,0797 | 8,2087 | 1,1370 | 13,85% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 3 | Fuligem | 25,3659 | 0,8319 | 2,8247 | 2,9513 | 72,1829 | 6,8884 | 27,3175 | 1,8483 | 1,5665 | 2,5255 | 35,7213 | 8,8189 | 1,0281 | 11,66% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 4 | Rodamina B | 91,0321 | 2,1821 | 3,0130 | 3,8142 | 55,4228 | 33,7889 | 93,2127 | 1,3638 | 2,9805 | 3,2925 | 65,8246 | 35,5262 | 1,3509 | 3,80% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 5 | Rodamina B | 91,7520 | 3,4564 | 2,8040 | 4,8165 | 50,3750 | 34,4186 | 93,5452 | 3,2113 | 2,5841 | 4,6090 | 52,4217 | 35,4501 | 3,5576 | 10,04% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 6 | Rodamina B | 91,4794 | 3,9048 | 3,3951 | 5,2801 | 44,0422 | 42,8888 | 93,2087 | 2,9776 | 3,3673 | 4,5443 | 49,3128 | 44,2493 | 4,5897 | 10,37% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| 10T0H | 7 | Sem manchamento | 92,1977 | 0,1718 | 2,7452 | 2,7508 | 86,4574 | 0,2239 | 93,8571 | 0,1697 | 2,7847 | 2,7901 | 86,5570 | 1,4913 | 0,3391 | 22,74% | Diferença de cor não visível | | | | | | |
| | 8 | Sem manchamento | 92,4728 | 0,1318 | 2,5581 | 2,5618 | 87,1826 | 0,1403 | 94,2942 | 0,1302 | 2,5256 | 2,5290 | 87,1152 | 1,9306 | 0,4751 | 24,61% | Diferença de cor não visível | | | | | | |
| | 1 | Fuligem | 24,8708 | 0,9445 | 2,9231 | 3,0721 | 72,1083 | 6,0023 | 26,7192 | 1,6476 | 1,9212 | 2,5334 | 49,1465 | 7,7745 | 0,4878 | 6,27% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 2 | Fuligem | 26,0085 | 1,0233 | 3,5474 | 3,6937 | 73,7741 | 6,2750 | 27,5740 | 1,7079 | 2,6025 | 3,1221 | 56,1950 | 7,7268 | 0,7143 | 9,24% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 3 | Fuligem | 27,2003 | 0,9917 | 3,5416 | 3,6819 | 73,9056 | 6,2663 | 28,7742 | 1,6379 | 2,6627 | 3,1374 | 57,6918 | 7,7862 | 0,9203 | 11,82% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 4 | Rodamina B | 91,3046 | 4,0176 | 2,9945 | 5,1645 | 39,2987 | 46,3306 | 93,2892 | 3,5440 | 2,9593 | 4,6665 | 40,4838 | 47,6338 | 0,6999 | 11,82% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 5 | Rodamina B | 91,2582 | 4,4079 | 3,0394 | 5,3973 | 35,5211 | 40,7035 | 93,2354 | 3,5182 | 2,9901 | 4,6428 | 40,8138 | 42,3227 | 2,7805 | 6,57% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 6 | Rodamina B | 90,5157 | 4,0867 | 3,5817 | 5,6595 | 48,1043 | 44,6887 | 92,6089 | 3,0008 | 3,3689 | 4,6154 | 51,3361 | 46,4191 | 4,4745 | 9,64% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| 10T2H | 7 | Sem manchamento | 93,0841 | 0,0995 | 2,4481 | 2,4504 | 87,7443 | 0,5137 | 94,7911 | 0,0841 | 2,4974 | 2,4992 | 88,1836 | 1,3126 | 0,3870 | 29,48% | Diferença de cor não visível | | | | | | |
| | 8 | Sem manchamento | 92,7366 | 0,1194 | 2,5362 | 2,5394 | 87,3819 | 0,1078 | 94,3407 | 0,1225 | 2,6022 | 2,6058 | 87,4288 | 1,6343 | 0,9143 | 55,95% | Diferença de cor não visível | | | | | | |
| | 1 | Fuligem | 25,8441 | 1,0224 | 3,2077 | 3,3669 | 72,3058 | 5,7287 | 27,4036 | 1,6283 | 2,3877 | 2,8919 | 55,6065 | 7,2070 | 0,4468 | 6,20% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 2 | Fuligem | 26,7381 | 1,0096 | 3,2672 | 3,4269 | 70,8368 | 6,4416 | 28,5236 | 1,5521 | 2,4270 | 2,9484 | 51,8278 | 8,2065 | 0,8185 | 9,97% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 3 | Fuligem | 23,9368 | 0,9503 | 2,8576 | 3,0116 | 71,6127 | 4,6610 | 26,3772 | 1,5717 | 2,1089 | 2,6313 | 53,2460 | 7,0235 | 0,6208 | 8,84% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 4 | Rodamina B | 92,0305 | 1,5671 | 3,1093 | 3,5545 | 64,9081 | 38,4888 | 93,8393 | 1,2939 | 3,0331 | 3,3686 | 68,0756 | 39,5450 | 1,6369 | 4,14% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 5 | Rodamina B | 91,6975 | 0,9207 | 2,9450 | 3,0900 | 72,6909 | 39,6351 | 94,0720 | 0,5875 | 2,8952 | 2,9562 | 78,4912 | 40,9831 | 4,0903 | 9,98% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 6 | Rodamina B | 91,8517 | 1,4334 | 2,9617 | 3,3121 | 64,4678 | 33,2099 | 93,7505 | 1,0548 | 2,8677 | 3,1005 | 69,9337 | 34,3843 | 2,96% | Diferença de cor visível | | | | | | | |
| 10T8H | 7 | Sem manchamento | 93,2052 | 0,0799 | 2,4149 | 2,4166 | 88,2013 | 0,2795 | 94,9853 | 0,0658 | 2,4322 | 2,4337 | 88,5768 | 1,5378 | 0,7418 | 48,24% | Diferença de cor não visível | | | | | | |
| | 8 | Sem manchamento | 92,2561 | 0,0834 | 2,3086 | 2,3108 | 88,0007 | 0,1460 | 94,1046 | 0,0764 | 2,2553 | 2,2574 | 88,1335 | 1,7198 | 0,1917 | 11,15% | Diferença de cor não visível | | | | | | |
| | 1 | Fuligem | 26,1807 | 0,9194 | 2,8868 | 3,0301 | 72,2554 | 6,1680 | 27,9994 | 1,3677 | 2,3245 | 2,6996 | 59,3154 | 7,9553 | 0,7581 | 9,53% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 2 | Fuligem | 26,1819 | 0,9820 | 3,0926 | 3,2450 | 73,3786 | 5,9856 | 27,7832 | 1,4131 | 2,4971 | 2,8719 | 60,2809 | 7,5571 | 0,3381 | 4,47% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 3 | Fuligem | 26,6343 | 0,7770 | 2,8988 | 3,0691 | 133,3586 | 4,9120 | 27,8344 | 1,2196 | 2,0923 | 2,6374 | 116,5644 | 6,1582 | 0,8723 | 14,16% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 4 | Rodamina B | 91,5135 | 3,3256 | 2,5792 | 4,2750 | 39,9721 | 42,5394 | 93,3108 | 3,0304 | 2,5180 | 3,9600 | 40,2272 | 43,6231 | 1,2615 | 2,89% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 5 | Rodamina B | 91,7450 | 0,7497 | 2,5869 | 2,7140 | 74,2096 | 35,1541 | 93,6623 | 0,9574 | 2,5628 | 2,7938 | 70,0178 | 35,9103 | 3,0619 | 8,53% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| | 6 | Rodamina B | 91,4055 | 2,4918 | 3,4392 | 4,4301 | 58,7778 | 40,3778 | 93,2908 | 2,4689 | 3,1735 | 4,2044 | 56,5583 | 41,1923 | 3,1184 | 7,57% | Diferença de cor visível | | | | | | |
| 7 | Sem manchamento | 93,1532 | 0,0922 | 2,2273 | 2,2273 | 87,6479 | 0,0899 | 94,9199 | 0,0812 | 2,2261 | 2,2278 | 87,9349 | 1,7140 | 0,2167 | 12,64% | Diferença de cor não visível | | | | | | | |
| 8 | Sem manchamento | 92,4211 | 0,1328 | 2,5800 | 2,5836 | 87,0954 | 0,6418 | 94,3736 | 0,1147 | 2,5321 | 2,5348 | 87,4215 | 1,4138 | 0,1327 | 9,38% | Diferença de cor não visível | | | | | | | |

Fonte: própria da autora.

**ANEXO A – DADOS METEOROLÓGICOS DO PERÍODO DE EXPOSIÇÃO DOS CORPOS
DE PROVA AO AMBIENTE NATURAL**

Tabela 37 – Dados meteorológicos do período de exposição

| Data | Hora (UTC) | Temperatura (°C) | Umidade (%) | Pressão (hPa) | Velocidade do vento (m/s) | Direção do vento (°) | Nebulosidade (Décimos) | Insolação (h) | Dados Diários | | |
|------------|------------|------------------|-------------|---------------|---------------------------|----------------------|------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| | | | | | | | | | Temperatura Máx. (°C) | Temperatura Min. (°C) | Chuva (mm) |
| 14/10/2021 | 00:00:00 | 23,9 | 75 | 1000,2 | 1,0 | 14,0 | 8,8 | 10,0 | 31,0 | | |
| | 12:00:00 | 25,9 | 64 | 999,1 | 1,0 | 36,0 | 3,8 | | | 20,4 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 30,7 | 51 | 997,0 | 2,1 | 32,0 | 2,5 | | | | |
| 15/10/2021 | 00:00:00 | 25,0 | 74 | 1000,6 | 1,5 | 14,0 | 2,5 | 0,0 | 25,0 | | |
| | 12:00:00 | 21,4 | 91 | 1007,0 | 2,1 | 23,0 | 10,0 | | | 20,4 | 10,0 |
| | 18:00:00 | 19,4 | 86 | 1005,8 | 2,6 | 14,0 | 10,0 | | | | |
| 16/10/2021 | 00:00:00 | 16,7 | 96 | 1009,5 | 2,6 | 14,0 | 10,0 | 0,4 | 19,6 | | |
| | 12:00:00 | 16,6 | 96 | 1014,8 | 0,5 | 14,0 | 10,0 | | | 16,0 | 16,3 |
| | 18:00:00 | 19,1 | 78 | 1013,5 | 1,5 | 18,0 | 10,0 | | | | |
| 17/10/2021 | 00:00:00 | 15,8 | 84 | 1014,8 | 2,1 | 14,0 | 6,3 | 0,0 | 23,2 | | |
| | 12:00:00 | 18,4 | 70 | 1015,9 | 1,0 | 14,0 | 6,3 | | | 14,2 | 3,0 |
| | 18:00:00 | 22,3 | 49 | 1012,8 | 2,1 | 14,0 | 5,0 | | | | |
| 18/10/2021 | 00:00:00 | 16,5 | 78 | 1014,4 | 1,0 | 14,0 | 0,0 | 8,4 | 24,7 | | |
| | 12:00:00 | 19,5 | 77 | 1015,4 | 2,1 | 9,0 | 6,3 | | | 13,5 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 23,1 | 60 | 1013,0 | 2,6 | 14,0 | 7,5 | | | | |
| 19/10/2021 | 00:00:00 | 16,9 | 80 | 1015,6 | 2,1 | 14,0 | 0,0 | 8,2 | 23,3 | | |
| | 12:00:00 | 20,3 | 69 | 1017,9 | 1,5 | 9,0 | 1,3 | | | 12,6 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 22,7 | 47 | 1015,6 | 2,6 | 14,0 | 7,5 | | | | |
| 20/10/2021 | 00:00:00 | 16,5 | 76 | 1017,2 | 2,1 | 9,0 | 0,0 | 10,1 | 23,7 | | |
| | 12:00:00 | 19,7 | 68 | 1016,7 | 1,5 | 9,0 | 3,8 | | | 12,5 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 21,1 | 57 | 1013,4 | 3,6 | 14,0 | 7,5 | | | | |
| 21/10/2021 | 00:00:00 | 16,7 | 76 | 1014,0 | 2,6 | 14,0 | 2,5 | 11,4 | 26,8 | | |
| | 12:00:00 | 20,4 | 64 | 1011,9 | 0,5 | 5,0 | 3,8 | | | 13,4 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 25,6 | 53 | 1007,8 | 1,5 | 18,0 | 2,5 | | | | |
| 22/10/2021 | 00:00:00 | 19,6 | 74 | 1009,1 | 2,1 | 14,0 | 0,0 | 9,2 | 27,2 | | |
| | 12:00:00 | 18,1 | 85 | 1009,8 | 0,5 | 23,0 | 7,5 | | | 14,9 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 27,1 | 54 | 1004,8 | 1,5 | 14,0 | 2,5 | | | | |
| 23/10/2021 | 00:00:00 | 19,3 | 82 | 1004,3 | 1,5 | 14,0 | 0,0 | 3,8 | 27,2 | | |
| | 12:00:00 | 23,6 | 66 | 999,6 | 1,0 | 9,0 | 7,5 | | | 16,2 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 22,9 | 79 | 998,8 | 2,1 | 27,0 | 10,0 | | | | |
| 24/10/2021 | 00:00:00 | 19,8 | 86 | 998,3 | 1,5 | 27,0 | 10,0 | 11,0 | 25,9 | | |
| | 12:00:00 | 18,9 | 74 | 1007,5 | 2,1 | 27,0 | 2,5 | | | 15,0 | 2,6 |
| | 18:00:00 | 25,7 | 33 | 1008,4 | 2,6 | 27,0 | 3,8 | | | | |
| 25/10/2021 | 00:00:00 | 17,4 | 71 | 1011,9 | 1,0 | 9,0 | 0,0 | 11,0 | 28,6 | | |
| | 12:00:00 | 19,8 | 54 | 1013,2 | 1,5 | 32,0 | 0,0 | | | 12,0 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 27,9 | 34 | 1009,8 | 3,1 | 32,0 | 0,0 | | | | |
| 26/10/2021 | 00:00:00 | 21,3 | 69 | 1010,4 | 0,5 | 14,0 | 0,0 | 11,0 | 32,8 | | |
| | 12:00:00 | 22,9 | 52 | 1013,9 | 2,1 | 32,0 | 0,0 | | | 14,9 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 32,5 | 36 | 1011,0 | 1,5 | 27,0 | 0,0 | | | | |
| 27/10/2021 | 00:00:00 | 24,3 | 53 | 1011,9 | 1,5 | 9,0 | 0,0 | 12,0 | 34,3 | | |
| | 12:00:00 | 25,9 | 51 | 1015,8 | 1,5 | 27,0 | 0,0 | | | 16,8 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 33,7 | 33 | 1013,9 | 1,5 | 14,0 | 1,3 | | | | |
| 28/10/2021 | 00:00:00 | 25,3 | 52 | 1015,5 | 1,5 | 14,0 | 0,0 | 12,2 | 29,8 | | |
| | 12:00:00 | 27,3 | 51 | 1018,0 | 1,0 | 18,0 | 0,0 | | | 17,5 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 28,9 | 41 | 1015,0 | 4,1 | 9,0 | 0,0 | | | | |
| 29/10/2021 | 00:00:00 | 21,2 | 65 | 1016,6 | 2,6 | 9,0 | 0,0 | 11,0 | 28,7 | | |
| | 12:00:00 | 24,1 | 70 | 1015,5 | 2,1 | 14,0 | 2,5 | | | 18,4 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 27,3 | 59 | 1011,2 | 4,1 | 14,0 | 2,5 | | | | |
| 30/10/2021 | 00:00:00 | 20,8 | 95 | 1011,5 | 2,6 | 9,0 | 5,0 | 12,1 | 29,0 | | |
| | 12:00:00 | 24,8 | 69 | 1012,2 | 2,6 | 9,0 | 2,5 | | | 19,3 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 28,0 | 59 | 1009,1 | 2,6 | 14,0 | 2,5 | | | | |
| 31/10/2021 | 00:00:00 | 21,6 | 80 | 1009,8 | 1,5 | 14,0 | 2,5 | 10,8 | 31,1 | | |
| | 12:00:00 | 26,0 | 67 | 1011,6 | 2,1 | 9,0 | 1,3 | | | 19,4 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 30,3 | 55 | 1008,0 | 2,6 | 14,0 | 7,5 | | | | |

| Data | Hora (UTC) | Temperatura (°C) | Umidade (%) | Pressão (hPa) | Velocidade do vento (m/s) | Direção do vento (°) | Nebulosidade (Décimos) | Insolação (h) | Dados Diários | | |
|---------------|------------|------------------|-------------|---------------|---------------------------|----------------------|------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| | | | | | | | | | Temperatura Máx. (°C) | Temperatura Min. (°C) | Chuva (mm) |
| 01/11/2021 | 00:00:00 | 22,8 | 81 | 1009,9 | 2,1 | 14,0 | 0,0 | 12,0 | 31,4 | | |
| | 12:00:00 | 25,0 | 65 | 1011,4 | 1,0 | 14,0 | 0,0 | | | 18,6 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 31,0 | 46 | 1007,2 | 1,5 | 18,0 | 3,8 | | | | |
| 02/11/2021 | 00:00:00 | 21,7 | 86 | 1008,0 | 2,6 | 14,0 | 1,3 | 11,5 | 32,0 | | |
| | 12:00:00 | 25,0 | 70 | 1009,0 | 0,5 | 32,0 | 0,0 | | | 19,1 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 31,3 | 56 | 1005,2 | 1,5 | 14,0 | 3,8 | | | | |
| 03/11/2021 | 00:00:00 | 22,5 | 83 | 1006,6 | 2,1 | 9,0 | 0,0 | 2,4 | 24,9 | | |
| | 12:00:00 | 22,1 | 92 | 1005,2 | 0,5 | 23,0 | 10,0 | | | 20,4 | 0,2 |
| | 18:00:00 | 23,9 | 85 | 1003,4 | 1,5 | 5,0 | 8,8 | | | | |
| 04/11/2021 | 00:00:00 | 21,9 | 92 | 1003,2 | 3,6 | 23,0 | 10,0 | 10,3 | 30,1 | | |
| | 12:00:00 | 24,1 | 79 | 1004,6 | 1,5 | 27,0 | 7,5 | | | 19,0 | 17,3 |
| | 18:00:00 | 29,9 | 52 | 1002,6 | 2,6 | 27,0 | 2,5 | | | | |
| 05/11/2021 | 00:00:00 | 23,7 | 78 | 1004,3 | 2,1 | 9,0 | 0,0 | 9,6 | 29,9 | | |
| | 12:00:00 | 23,9 | 80 | 1005,9 | 0,5 | 27,0 | 5,0 | | | 20,1 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 29,7 | 65 | 1004,3 | 2,1 | 14,0 | 8,8 | | | | |
| 06/11/2021 | 00:00:00 | 23,2 | 83 | 1007,6 | 1,5 | 14,0 | 8,8 | 0,0 | 23,8 | | |
| | 12:00:00 | 22,6 | 86 | 1009,2 | 1,5 | 14,0 | 10,0 | | | 21,0 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 20,8 | 93 | 1009,2 | 2,1 | 14,0 | 10,0 | | | | |
| 07/11/2021 | 00:00:00 | 17,4 | 89 | 1012,0 | 3,1 | 14,0 | 10,0 | 10,8 | 24,4 | | |
| | 12:00:00 | 20,8 | 60 | 1012,0 | 1,5 | 9,0 | 5,0 | | | 15,4 | 14,0 |
| | 18:00:00 | 24,2 | 90 | 1009,2 | 2,1 | 14,0 | 5,0 | | | | |
| 08/11/2021 | 00:00:00 | 17,5 | 74 | 1010,3 | 1,0 | 9,0 | 0,0 | 12,5 | 25,3 | | |
| | 12:00:00 | 21,7 | 62 | 1011,1 | 3,1 | 9,0 | 2,5 | | | 13,9 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 24,9 | 54 | 1008,8 | 2,1 | 14,0 | 2,5 | | | | |
| 09/11/2021 | 00:00:00 | 18,9 | 75 | 1011,0 | 1,5 | 14,0 | 0,0 | 12,1 | 26,3 | | |
| | 12:00:00 | 21,7 | 66 | 1012,8 | 1,0 | 18,0 | 6,3 | | | 13,6 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 25,6 | 39 | 1011,1 | 1,5 | 14,0 | 2,5 | | | | |
| 10/11/2021 | 00:00:00 | 19,2 | 72 | 1012,6 | 1,5 | 14,0 | 2,5 | 12,0 | 26,4 | | |
| | 12:00:00 | 21,9 | 58 | 1014,2 | 2,1 | 14,0 | 5,0 | | | 14,5 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 25,2 | 44 | 1011,5 | 3,1 | 14,0 | 6,3 | | | | |
| 11/11/2021 | 00:00:00 | 18,7 | 72 | 1014,4 | 3,1 | 14,0 | 2,5 | 10,4 | 25,1 | | |
| | 12:00:00 | 22,1 | 58 | 1016,6 | 2,1 | 9,0 | 3,8 | | | 16,3 | 0,0 |
| | 18:00:00 | 24,5 | 52 | 1014,6 | 4,1 | 9,0 | 7,5 | | | | |
| TOTAL | | - | - | - | - | - | - | 256,2 | - | - | 63,4 |
| MÉDIAS | | 22,9 | 67,9 | 1010,0 | 1,9 | 16,0 | 4,0 | 8,8 | 27,3 | 16,5 | 2,2 |

Fonte: BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) – Estação Porto Alegre – RS (OMM: 83967), INMET (2021).