

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Avaliação da eficiência de autolimpeza em argamassas  
e pastas contendo  $\text{TiO}_2$  expostas ao microclima urbano**

**João Pedro Marins Treviso**

Porto Alegre  
abril 2016

JOÃO PEDRO MARINS TREVISO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE AUTOLIMPEZA  
EM ARGAMASSAS E PASTAS CONTENDO  $\text{TiO}_2$   
EXPOSTAS AO MICROCLIMA URBANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia

Porto Alegre

abril 2016

## CIP - Catalogação na Publicação

Treviso, João Pedro

Avaliação da eficiência de autolimpeza em argamassas e pastas contendo  $TiO_2$  expostas ao microclima urbano / João Pedro Treviso. -- 2016. 202 f.

Orientadora: Denise Dal Molin.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Argamassa autolimpante. 2. Fotocatálise. 3. Dióxido de Titânio. I. Dal Molin, Denise, orient. II. Título.

**JOÃO PEDRO MARINS TREVISO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE AUTOLIMPEZA  
EM ARGAMASSAS E PASTAS CONTENDO  $TiO_2$   
EXPOSTAS AO MICROCLIMA URBANO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, com ênfase em Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 29 de abril de 2016

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela EPUSP  
Orientadora

Prof. Carlos Torres Formoso  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Ana Paula Kirchheim**  
Dra. pela UFRGS

**Prof. Celso Camilo Moro**  
Dr. pela Universidad Nacional del Sur

**Prof. Hélio Adão Greven**  
Dr. pela Universidade de Hannover

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Pedro e Aglahy, e à minha irmã, Karenine,  
pela compreensão durante o período de seu  
desenvolvimento.

## **AGRADECIMENTOS**

À CNPq e à CAPES, pelo custeio da bolsa de mestrado.

À Profa. Denise Dal Molin, pela orientação do trabalho e o incentivo à pesquisa.

Ao Prof. João Ricardo Masuero, pelo suporte dado na análise estatística da pesquisa.

À bolsista Jéssica Bersch, pelo auxílio prestado ao longo do trabalho.

À CIENTEC/RS, por ceder suas instalações ao longo do estudo.

À SISCOBRAS Sistemas Construtivos S.A., pelo incentivo à pesquisa.

Aos laboratórios CMM, IGEO e LACER, pelos ensaios realizados.

Ao LAMTAC, por ceder suas instalações, equipamentos e demais recursos.

Aos professores do NORIE, em especial à Profa. Ângela Masuero, ao Prof. Miguel Sattler e ao Prof. Eduardo Isatto, pelo incentivo aos estudos e o conhecimento repassado.

Aos colegas de mestrado da turma de 2014, em especial à Muriel, ao Guilherme, ao Jéferson e ao José, que se tornaram grandes amigos.

A todos do NORIE, em especial aos laboratoristas Airton, Gilmar e Demétrius e aos demais bolsistas, pela amizade e solidariedade.

## RESUMO

TREVISO, J.P. Avaliação da eficiência de autolimpeza em argamassas e pastas contendo  $\text{TiO}_2$  expostas ao microclima urbano. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Ao longo do tempo, os revestimentos de fachada permanecem expostos a diversos agentes de degradação, sejam eles associados aos próprios materiais empregados ou a fatores externos. Tal exposição implica em manchas formadas a partir da deposição de partículas poluentes na superfície dos revestimentos, elevando seus custos para limpeza e manutenção. Uma vez que permanecem expostas à radiação solar, as fachadas se mostram atraentes ao uso de materiais fotocatalíticos, os quais catalizam a mineralização de agentes poluentes, transformando-os em produtos inócuos. A adição de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) a argamassas e concretos de cimento branco desenvolve superfícies autolimpantes, reduzindo a formação de manchas e mantendo sua coloração original ao longo do tempo. No entanto, a eficiência e a economia no uso de materiais fotocatalíticos em aplicações reais é fortemente afetada pela disponibilidade da radiação ultravioleta adequada para ativá-los. Portanto, o presente trabalho busca avaliar a capacidade autolimpante de argamassas e coberturas fotocatalíticas de  $\text{TiO}_2$  expostas a diferentes configurações de posicionamento no microclima urbano da cidade de Porto Alegre. Para isto, foram confeccionadas amostras de argamassa e coberturas de pasta ou argamassa contendo diferentes teores de  $\text{TiO}_2$ , as quais foram manchadas com Rodamina B e lodo de cinzas da queima de eucalipto e, a seguir, expostas sob diferentes condições de posicionamento, voltadas para as orientações norte, sul, leste e oeste, à  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ . Ao longo do período de exposição, foram realizadas leituras cromáticas (sistema CIELab) na superfície das amostras, tendo em vista a descoloração dos manchamentos aplicados. Para aquelas manchadas com Rodamina B, a degradação do corante se mostrou mais eficiente nas argamassas com maiores teores de  $\text{TiO}_2$  e nas configurações de posicionamento que recebem maior incidência de radiação solar. As coberturas de pasta apresentaram valores mais elevados de variação de cor ( $\Delta E$ ) e refletância ( $L^*$ ), na comparação à aplicação do  $\text{TiO}_2$  como cobertura de argamassa ou incorporado à mistura – métodos os quais se mostraram resultados equivalentes.

Palavras-chave: autolimpante; fotocatalise; dióxido de titânio.

## ABSTRACT

TREVISO, J.P. Self-cleaning evaluation of TiO<sub>2</sub>-containing mortars and pastes exposed to an urban atmosphere. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Building façades are commonly exposed to polluting agents generated by vehicles and industries exhausts, which cause stains on their surfaces and increase efforts and costs both for cleaning and maintenance. Facades are attractive to photocatalytic materials usage, which transform pollutants to innocuous products. The addition of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) to white cement mortars and concretes develops self-cleaning surfaces which are capable to reduce stains and maintain their original color along the time. However, efficiency and economy in the use of photocatalytic materials in real applications are strongly affected by the availability of suitable ultraviolet radiation to activate them. This thesis aims to evaluate the self-cleaning ability of TiO<sub>2</sub>-containing mortars and coatings (paste or mortar) exposed to controlled positioning settings in the urban environment of Porto Alegre, Brazil. Mortars and coatings were prepared containing different additions of TiO<sub>2</sub> and then were soiled by Rhodamine B (RhB) or burning ashes of eucalyptus sludge. Samples were exposed under outdoor conditions facing north, south, east and west orientations, 0°, 45° or 90° slopes. During the exposure test, discoloration effect on samples' surface was monitored by colorimetric measurements (CIELab color space) using a portable spectrophotometer. A final analysis was performed at the end of the measurements, including statistical tests. Self-cleaning ability was better seen both for higher additions of TiO<sub>2</sub> and settings which receive higher intensities of solar radiation. Cement paste coatings showed higher values both of color change and reflectance when compared to mortar coatings or TiO<sub>2</sub> added to the mixture – which performed equivalent results.

Key-words: self-cleaning; photocatalysis; titanium dioxide.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ábaco do potencial de radiação recebido pelas superfícies em Porto Alegre.	28
Figura 2 – Espectro eletromagnético .....	32
Figura 3 – Componentes da radiação solar em uma superfície inclinada .....	34
Figura 4 – Fluxo de energia .....	34
Figura 5 – Relações entre o Sol e a Terra .....	35
Figura 6 – Trajetória aparente do Sol no globo terrestre .....	36
Figura 7 – Movimento aparente solar .....	37
Figura 8 – Variações na quantidade de energia solar .....	37
Figura 9 – Elevação solar ( $\alpha$ ) do Sol ao meio-dia em Porto Alegre .....	39
Figura 10 – Ângulo azimutal do Sol ( $\gamma_s$ ) nascente em Porto Alegre .....	39
Figura 11 – Duração do dia em Porto Alegre .....	40
Figura 12 – Formas cristalográficas do $TiO_2$ : (a) rutilo; (b) anatase e (c) brooquita .....	41
Figura 13 – Espectro eletromagnético .....	46
Figura 14 – Esquema representativo da partícula de um semicondutor .....	47
Figura 15 – Efeito lótus .....	49
Figura 16 – Molhabilidade de superfícies: (a) hidrofílica; (b) oleofílica e (c) anfifílica .	50
Figura 17 – Imagem de cristal de rutilo: (a) antes da iluminação por raios UV; (b) após iluminação por raios UV; (c) áreas hidrofílicas e oleofílicas e (d) aumento da imagem, a $45^\circ$ .....	51
Figura 18 – Tecnologia autolimpante em construções: (a) igreja Dives in Misericordia e (b) Air France Head Office .....	54
Figura 19 – Túnel com revestimento fotocatalítico em Bruxelas, Bélgica .....	55
Figura 20 – Aplicação de pavers fotocatalíticos em Antuérpia, Bélgica: (a) via pavimentada (estudo-piloto) e (b) blocos utilizados .....	55
Figura 21 – Aplicação de solução aquosa de Rodamina B sobre pasta .....	58
Figura 22 – Aplicação de gota de vinho tinto sobre placas cimentícias .....	59
Figura 23 – Matriz experimental (por manchamento) .....	63
Figura 24 – Fluxograma do programa experimental .....	64
Figura 25 – Composição mineralógica do dióxido de titânio por DRX .....	68
Figura 26 – Análise microestrutural por imagem do dióxido de titânio obtidos com microscópio eletrônico de varredura por elétrons secundários: (a) x1000; (b) x5000; (c) x10000 e (d) x20000 .....	68
Figura 27 – Preparação das argamassas: (a) mistura cimento e areia; (b) adição da água de amassamento; (c) mistura dos materiais e (d) realização do ensaio de consistência .....	71

Figura 28 – Fôrmas utilizadas para moldagem das amostras de argamassa .....	71
Figura 29 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos .....	72
Figura 30 – Preparação das amostras como substrato: (a) escovação; (b) secagem, após lavagem e (c) colocação junto às fôrmas .....	74
Figura 31 – Imersão em solução aquosa de Rodamina B .....	76
Figura 32 – Manchamento das amostras na solução aquosa de Rodamina B .....	76
Figura 33 – Etapas para obtenção das cinzas: (a) lenha de eucalipto em tora; (b) caldeira fumotubular; (c) caldeira em operação; (d) filtro multiciclone e (e) amostra de cinza coletada .....	77
Figura 34 – Imersão em lodo de cinza .....	78
Figura 35 – Suportes metálicos para exposição das amostras de argamassa .....	79
Figura 36 – Amostras expostas nos suportes metálicos voltados para: (a) norte; (b) sul; (c) leste e (d) oeste .....	79
Figura 37 – Espaço de cor CIELab .....	81
Figura 38 – Gabarito para leituras da coloração nas amostras de argamassa .....	82
Figura 39 – Amostras voltadas para norte, inclinadas a 45° .....	87
Figura 40 – Amostras voltadas para norte, inclinadas a 90° .....	88
Figura 41 – Amostras voltadas para leste, inclinadas a 45° .....	88
Figura 42 – Amostras voltadas para leste, inclinadas a 90° .....	89
Figura 43 – Amostras voltadas para sul, inclinadas a 45° .....	89
Figura 44 – Amostras voltadas para sul, inclinadas a 90° .....	90
Figura 45 – Amostras voltadas para oeste, inclinadas a 45° .....	90
Figura 46 – Amostras voltadas para oeste, inclinadas a 90° .....	91
Figura 47 – Amostras expostas à 0° (horizontal) .....	91
Figura 48 – Coberturas de pasta ou argamassa, voltadas para norte à 45° .....	92
Figura 49 – Amostras voltadas para norte, inclinadas a 45°, cinza .....	93
Figura 50 – Amostras voltadas para norte, inclinadas a 90°, cinza .....	93
Figura 51 – Amostras voltadas para leste, inclinadas a 45°, cinza .....	94
Figura 52 – Amostras voltadas para leste, inclinadas a 90°, cinza .....	94
Figura 53 – Amostras voltadas para sul, inclinadas a 45°, cinza .....	95
Figura 54 – Amostras voltadas para sul, inclinadas a 90°, cinza .....	95
Figura 55 – Amostras voltadas para oeste, inclinadas a 45°, cinza .....	96
Figura 56 – Amostras voltadas para oeste, inclinadas a 90°, cinza .....	96
Figura 57 – Amostras expostas à 0° (horizontal), cinza .....	97
Figura 58 – Coberturas de pasta ou argamassa, voltadas para norte à 45°, cinza .....	97
Figura 59 – ANOVA efeito isolado da idade de exposição em $\Delta E$ , RhB .....	100

Figura 60 –ANOVA efeito isolado da inclinação em $\Delta E$ , RhB .....	101
Figura 61 –ANOVA efeito isolado da orientação em $\Delta E$ , RhB .....	102
Figura 62 –ANOVA efeito do teor de $TiO_2$ em $\Delta E$ , RhB .....	104
Figura 63 –ANOVA efeito da interação entre idade e orientação em $\Delta E$ , RhB .....	105
Figura 64 –ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em $\Delta E$ , RhB .....	106
Figura 65 –ANOVA efeito da interação entre orientação e inclinação em $\Delta E$ , RhB .....	107
Figura 66 –ANOVA efeito da interação entre idade e teor em $\Delta E$ , RhB .....	108
Figura 67 –ANOVA efeito da interação entre orientação e teor em $\Delta E$ , RhB .....	109
Figura 68 –ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor em $\Delta E$ , RhB .....	109
Figura 69 – ANOVA efeito da idade de exposição em $L^*$ , RhB .....	111
Figura 70 – ANOVA efeito da inclinação em $L^*$ , RhB .....	112
Figura 71 – ANOVA efeito da orientação em $L^*$ , RhB .....	113
Figura 72 –ANOVA efeito do teor de $TiO_2$ em $L^*$ , RhB .....	114
Figura 73 –ANOVA efeito da interação entre idade e orientação em $L^*$ , RhB .....	115
Figura 74 –ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em $L^*$ , RhB .....	115
Figura 75 –ANOVA efeito da interação entre orientação e inclinação em $L^*$ , RhB .....	116
Figura 76 –ANOVA efeito da interação entre idade e teor em $L^*$ , RhB .....	117
Figura 77 –ANOVA efeito da interação entre orientação e teor em $L^*$ , RhB .....	117
Figura 78 –ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor em $L^*$ , RhB .....	118
Figura 79 –ANOVA efeito da inclinação norte em $\Delta E$ , RhB .....	119
Figura 80 – ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em $\Delta E$ , norte, RhB ...	121
Figura 81 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor em $\Delta E$ , norte, RhB .....	121
Figura 82 –ANOVA efeito da inclinação em $L^*$ , norte, RhB .....	123
Figura 83 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor em $L^*$ , norte, RhB .....	124
Figura 84 – ANOVA efeito da inclinação em $\Delta E$ , leste, RhB .....	125
Figura 85 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor em $\Delta E$ , leste, RhB .....	126
Figura 86 –ANOVA efeito da inclinação em $L^*$ , leste, RhB .....	127
Figura 87 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de $TiO_2$ em $L^*$ , leste, RhB .....	128
Figura 88 –ANOVA efeito da inclinação em $\Delta E$ , sul, RhB .....	129
Figura 89 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de $TiO_2$ em $\Delta E$ , sul, RhB .....	130
Figura 90 –ANOVA efeito da inclinação em $L^*$ , sul, RhB .....	131
Figura 91 – ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em $L^*$ , sul, RhB .....	132
Figura 92 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de $TiO_2$ em $L^*$ , sul, RhB .....	132

Figura 93 –ANOVA efeito da inclinação em $\Delta E$ , oeste, RhB .....	133
Figura 94 – ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em $\Delta E$ , oeste, RhB ...	134
Figura 95 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de TiO <sub>2</sub> em $\Delta E$ , oeste, RhB .....	135
Figura 96 –ANOVA efeito da inclinação em L*, oeste, RhB .....	136
Figura 97 – ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em L*, oeste, RhB ...	137
Figura 98 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de TiO <sub>2</sub> em L*, oeste, RhB .....	137
Figura 99 –ANOVA efeito dos métodos de aplicação em $\Delta E$ , RhB .....	139
Figura 100 – ANOVA efeito da interação entre idade e método de aplicação em $\Delta E$ , RhB .....	140
Figura 101 – ANOVA efeito da interação entre teor de TiO <sub>2</sub> e método de aplicação em $\Delta E$ , RhB .....	140
Figura 102 –ANOVA efeito dos métodos de aplicação em L*, RhB .....	142
Figura 103 – ANOVA efeito da interação entre teor e método de aplicação em L*, RhB .....	143
Figura 104 –ANOVA efeito da idade em $\Delta E$ , cinza .....	144
Figura 105 –ANOVA efeito da orientação solar em $\Delta E$ , cinza .....	144
Figura 106 –ANOVA efeito da inclinação de exposição em $\Delta E$ , cinza .....	146
Figura 107 –ANOVA efeito do teor de TiO <sub>2</sub> em $\Delta E$ , cinza .....	147
Figura 108 – ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em $\Delta E$ , cinza .....	148
Figura 109 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de TiO <sub>2</sub> em $\Delta E$ , cinza .....	148
Figura 110 – ANOVA efeito da interação entre orientação e inclinação em $\Delta E$ , cinza ..	149
Figura 111 –ANOVA efeito da idade de exposição em L*, cinza .....	151
Figura 112 –ANOVA efeito da orientação solar em L*, cinza .....	152
Figura 113 –ANOVA efeito da inclinação em L*, cinza .....	153
Figura 114 –ANOVA efeito do teor de TiO <sub>2</sub> em L*, cinza .....	154
Figura 115 –ANOVA efeito da inclinação em $\Delta E$ , norte, cinza .....	155
Figura 116 –ANOVA efeito da inclinação em L*, norte, cinza .....	157
Figura 117–ANOVA efeito da inclinação em $\Delta E$ , leste, cinza .....	158
Figura 118 –ANOVA efeito da inclinação em L*, leste, cinza .....	159
Figura 119 –ANOVA efeito da inclinação em $\Delta E$ , sul, cinza .....	161
Figura 120 –ANOVA efeito da inclinação em L*, sul, cinza .....	162
Figura 121 –ANOVA efeito da inclinação em $\Delta E$ , oeste, cinza .....	163
Figura 122 –ANOVA efeito da inclinação em L*, oeste, cinza .....	164
Figura 123 –ANOVA efeito dos métodos de aplicação em $\Delta E$ , cinza .....	166

Figura 124 – ANOVA efeito da interação entre teor de TiO <sub>2</sub> e método de aplicação em ΔE, cinza .....	167
Figura 125 – ANOVA efeito dos métodos de aplicação em L*, cinza .....	168
Figura 126 – ANOVA efeito da interação entre teor e método de aplicação em L*, cinza .....	169
Figura 128 – Difração a <i>laser</i> para o dióxido de titânio .....	182
Figura 129 – Difração a <i>laser</i> para o cimento branco .....	184
Figura 130 – Análise FRX para cimento branco e dióxido de titânio .....	190

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Histórico de preços do TiO <sub>2</sub> no mercado mundial, em US\$/tonelada .....	42
Quadro 2 – Produtos comerciais fotocatalíticos disponíveis atualmente.....	44
Quadro 3 – Pesquisas envolvendo a aplicação do TiO <sub>2</sub> à construção civil .....	57
Quadro 4 – Amostras dispostas nos suportes voltados para Sul, Leste e Oeste .....	80
Quadro 5 – Amostras dispostas no suporte voltado para Norte .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de albedo para diferentes condições .....	33
Tabela 2 – Composição química do cimento branco por FRX .....	65
Tabela 3 – Características físico-mecânicas do cimento utilizado .....	65
Tabela 4 – Características físicas do agregado miúdo utilizado .....	66
Tabela 5 – Caracterização física do dióxido de titânio .....	66
Tabela 6 – Composição química do dióxido de titânio por FRX .....	67
Tabela 7 – Argamassas: proporcionamento de materiais .....	70
Tabela 8 – Condições ambientais de moldagem .....	70
Tabela 9 – Coberturas: proporcionamento de materiais .....	73
Tabela 10 – Condições ambientais de moldagem e aplicação .....	73
Tabela 11 – Características químicas da cinza (%) .....	78
Tabela 12 – Características físicas da cinza .....	78
Tabela 13 – Corpos de prova utilizados por ensaio realizado, por argamassa .....	84
Tabela 14 – Caracterização no estado fresco .....	85
Tabela 15 – Resistência à compressão ( $R_c$ ) e à tração ( $R_t$ ), aos 28 dias .....	85
Tabela 16 – Coeficiente de capilaridade médio ( $C_c$ ) das argamassas, aos 28 dias .....	86
Tabela 17 – Densidade de massa aparente das argamassas ( $\rho$ ), aos 28 dias .....	86
Tabela 18 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas ( $E_d$ ), aos 28 dias .....	86
Tabela 19 – Análise de variância geral ( $\Delta E$ ), RhB .....	99
Tabela 20 – Teste de Duncan para a idade de exposição em $\Delta E$ , RhB .....	101
Tabela 21 – Teste de Duncan para a inclinação de exposição em $\Delta E$ , RhB .....	102
Tabela 22 – Teste de Duncan para a orientação solar em $\Delta E$ , RhB .....	103
Tabela 23 – Teste de Duncan para o teor de $TiO_2$ em $\Delta E$ , RhB .....	104
Tabela 24 – Análise de variância geral ( $L^*$ ), RhB .....	110
Tabela 25 – Teste de Duncan para a idade de exposição em $L^*$ , RhB .....	111
Tabela 26 – Teste de Duncan para a inclinação de exposição em $L^*$ , RhB .....	112
Tabela 27 – Teste de Duncan para a orientação solar em $L^*$ , RhB .....	113
Tabela 28 – Teste de Duncan para o teor de $TiO_2$ em $L^*$ , RhB .....	114
Tabela 29 – Análise de variância norte ( $\Delta E$ ), RhB .....	119
Tabela 30 – Teste de Duncan para a inclinação norte em $\Delta E$ , RhB .....	120
Tabela 31 – Análise de variância norte ( $L^*$ ), RhB .....	122
Tabela 32 – Teste de Duncan para a inclinação em $L^*$ , norte, RhB .....	123
Tabela 33 – Análise de variância leste ( $\Delta E$ ), RhB .....	125

Tabela 34 – Teste de Duncan para a inclinação em $\Delta E$ , leste, RhB .....	125
Tabela 35 – Análise de variância leste ( $L^*$ ), RhB .....	126
Tabela 36 – Teste de Duncan para a inclinação em $L^*$ , leste, RhB .....	127
Tabela 37 – Análise de variância sul ( $\Delta E$ ), RhB .....	128
Tabela 38 – Teste de Duncan para a inclinação em $\Delta E$ , sul, RhB .....	129
Tabela 39 – Análise de variância sul ( $L^*$ ), RhB .....	130
Tabela 40 – Teste de Duncan para a inclinação em $L^*$ , sul, RhB.....	131
Tabela 41 – Análise de variância oeste ( $\Delta E$ ), RhB .....	131
Tabela 42 – Teste de Duncan para a inclinação em $\Delta E$ , oeste, RhB .....	134
Tabela 43 – Análise de variância oeste ( $L^*$ ), RhB .....	135
Tabela 44– Teste de Duncan para a inclinação em $L^*$ , oeste, RhB .....	136
Tabela 45 – Análise de variância métodos ( $\Delta E$ ), RhB .....	138
Tabela 46 – Teste de Duncan para o método de aplicação do $TiO_2$ em $\Delta E$ , RhB .....	139
Tabela 47 – Análise de variância métodos ( $L^*$ ), RhB .....	141
Tabela 48 – Teste de Duncan para o método de aplicação do $TiO_2$ em $L^*$ , RhB .....	142
Tabela 49 – Análise de variância geral ( $\Delta E$ ), cinza .....	144
Tabela 50 – Teste de Duncan para a idade de exposição em $\Delta E$ , cinza .....	145
Tabela 51 – Teste de Duncan para a orientação solar em $\Delta E$ , cinza .....	145
Tabela 52 – Teste de Duncan para a inclinação de exposição em $\Delta E$ , cinza .....	146
Tabela 53 – Teste de Duncan para o teor de $TiO_2$ em $\Delta E$ , cinza .....	147
Tabela 54 – Análise de variância geral ( $L^*$ ), cinza .....	150
Tabela 55 – Teste de Duncan para a idade de exposição em $L^*$ , cinza .....	151
Tabela 56 – Teste de Duncan para a orientação solar em $L^*$ , cinza .....	152
Tabela 57 – Teste de Duncan para a inclinação de exposição em $L^*$ , cinza .....	153
Tabela 58 – Teste de Duncan para o teor de $TiO_2$ em $L^*$ , cinza .....	155
Tabela 59 – Análise de variância norte ( $\Delta E$ ), cinza .....	155
Tabela 60 – Teste de Duncan para a inclinação norte em $\Delta E$ , cinza .....	155
Tabela 61 – Análise de variância norte ( $L^*$ ), cinza .....	156
Tabela 62 – Teste de Duncan para a inclinação norte em $L^*$ , cinza .....	157
Tabela 63 – Análise de variância leste ( $\Delta E$ ), cinza .....	158
Tabela 64 – Teste de Duncan para a inclinação leste em $\Delta E$ , cinza .....	158
Tabela 65 – Análise de variância leste ( $L^*$ ), cinza .....	159
Tabela 66 – Teste de Duncan para a inclinação leste em $L^*$ , cinza .....	160
Tabela 67 – Análise de variância sul ( $\Delta E$ ), cinza .....	160
Tabela 68 – Teste de Duncan para a inclinação sul em $\Delta E$ , cinza .....	162



Tabela 69 – Análise de variância sul ( $L^*$ ), cinza .....	161
Tabela 70 – Teste de Duncan para a inclinação sul em $L^*$ , cinza .....	162
Tabela 71 – Análise de variância oeste ( $\Delta E$ ), cinza .....	163
Tabela 72 – Teste de Duncan para a inclinação oeste em $\Delta E$ , cinza .....	163
Tabela 73 – Análise de variância oeste ( $L^*$ ), cinza .....	164
Tabela 74 – Teste de Duncan para a inclinação oeste em $L^*$ , cinza .....	164
Tabela 75 – Análise de variância método ( $\Delta E$ ), cinza .....	165
Tabela 76 – Teste de Duncan para o método de aplicação do $TiO_2$ em $\Delta E$ , cinza .....	166
Tabela 77 – Análise de variância método ( $L^*$ ), cinza .....	167
Tabela 78 – Teste de Duncan para o método de aplicação do $TiO_2$ em $L^*$ , cinza .....	168
Tabela 79 – Resistência à compressão do cimento (MPa), aos 7 dias .....	181
Tabela 80 – Resistência à compressão do cimento (MPa), aos 28 dias .....	181
Tabela 81 – Índice de finura (%) para o cimento .....	181
Tabela 82 – Resistência à tração na flexão e à compressão (MPa), aos 28 dias .....	188
Tabela 83 – Absorção de água por capilaridade ( $g/cm^2$ ), aos 28 dias .....	189
Tabela 84 – Densidade de massa aparente ( $\rho$ ) .....	190
Tabela 85 – Módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) .....	191
Tabela 86 – Dados meteorológicos do período de exposição das amostras .....	193
Tabela 87 – Dados meteorológicos do período de exposição das amostras .....	196
Tabela 88 – Valores médios para $\Delta E$ .....	199
Tabela 89 – Valores médios para $L^*$ .....	201

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de variância

BET (método) – Brunauer, Emmett, Teller

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CIE – Comissão Internacional da Iluminação

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CMM – Centro de Microscopia e Microanálise

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgotos

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

IGEO – Instituto de Geociências

LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos

LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

NM – Asociación Mercosur de Normalización

NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

PICADA – Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment

PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RS – Rio Grande do Sul

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$  – altura ou elevação solar

$\gamma_s$  – ângulo azimutal do Sol

$\theta_z$  – ângulo zenital

$\lambda$  – comprimento de onda

$\delta$  – declinação solar

$\rho$  – densidade de massa aparente

$\mu\text{m}$  – micro metro ( $10^6$  metros)

$\Delta E$  – variação de cor no tempo

$\Delta L^*$  – variação de refletância

$^{\circ}\text{C}$  – grau Celsius

% – porcentagem ou percentagem

1:m – quantidade de cimento:agregados, em massa

$a^*$  – coordenada cromática (verde a vermelho)

$b^*$  – coordenada cromática (azul a amarelo)

a/c – relação água/cimento

cm – centímetro

$f_c$  – resistência à compressão

$f_{tf}$  – resistência à tração na flexão

g – gramas

h – horas

kg – quilograma

km – quilômetro

m – metro

min – minuto

mm – milímetro

nm – nanômetro ( $10^{-9}$  metros)

BC – banda de condução

BV – banda de valência

CdS – sulfeto de cádmio

CO – monóxido de carbono

CPB – cimento Portland branco

$E_d$  – módulo de elasticidade dinâmico

$E_g$  – energia de *bandgap*

$Fe_2O_3$  – óxido de ferro (III)

GPa – giga pascal

$G_{sc}$  – constante solar

HAP – hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

$HO_2^\bullet$  – radical hidroperóxido

L – litro

$L^*$  – refletância

MPa – mega pascal

MP – materiais particulados

NMHC – hidrocarbonetos não metano

NO<sub>x</sub> – óxidos de nitrogênio

O<sub>3</sub> – ozônio

HO<sup>•</sup> – radical hidroxila

O<sub>2</sub><sup>-</sup> – íon superóxido

POA – processos oxidativos avançados

RCHO – aldeídos

RhB – rodamina B

S – sul

SI – solstício de inverno

SV – solstício de verão

SO<sub>2</sub> – dióxido de enxofre

T – temperatura

TiO<sub>2</sub> – dióxido de titânio

UA – unidade astronômica

UR – umidade relativa do ar

UV – ultravioleta

V – volt

W – watt

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
1.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA .....	27
1.2 OBJETIVOS .....	28
<b>1.2.1 Objetivo principal</b> .....	28
<b>1.2.2 Objetivos específicos</b> .....	28
1.3 LIMITAÇÕES.....	29
1.4 DELIMITAÇÕES .....	29
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	29
<b>2 RADIAÇÃO SOLAR</b> .....	31
2.1 RADIAÇÃO SOLAR SOBRE A TERRA.....	31
2.2 GEOMETRIA SOL-TERRA .....	34
<b>2.2.1 Movimento aparente do Sol</b> .....	35
<b>2.2.2 Movimento aparente do Sol em Porto Alegre</b> .....	38
<b>3 DIÓXIDO DE TITÂNIO</b> .....	41
3.1 HISTÓRICO .....	42
3.2 FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA .....	45
3.3 MOLHABILIDADE .....	48
3.4 APLICAÇÕES .....	53
<b>3.2.1 Aplicações a materiais cimentícios</b> .....	53
<b>3.4.2 Formas de avaliação da eficiência de autolimpeza</b> .....	58
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	60
4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	60
<b>4.1.1 Variáveis de resposta</b> .....	60
<b>4.1.2 Parâmetros do processo</b> .....	61
<b>4.1.3 Matriz experimental</b> .....	62
<b>4.1.4 Fluxograma</b> .....	63
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	64
<b>4.2.1 Materiais utilizados</b> .....	64
4.2.1.1 Cimento .....	65
4.2.1.2 Agregado miúdo .....	66
4.2.1.3 Dióxido de titânio .....	66
4.2.1.4 Água .....	69
4.2.1.5 Aditivo .....	69

<b>4.2.2 Confeção das argamassas</b> .....	69
4.2.2.1 Moldagem das amostras de argamassa .....	69
4.2.2.2 Moldagem dos corpos de prova .....	71
4.2.2.3 Aplicação das coberturas .....	72
<b>4.2.3 Ensaio realizados</b> .....	74
<b>4.2.4 Manchamentos</b> .....	75
4.2.4.1 Rodamina B .....	76
<b>4.2.4.2 Cinzas</b> .....	76
<b>4.2.5 Exposição</b> .....	78
<b>4.2.6 Análise colorimétrica</b> .....	80
4.3 DADOS GEOGRÁFICOS .....	82
4.4 DADOS METEOROLÓGICOS .....	83
<b>5 RESULTADOS</b> .....	84
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS .....	84
<b>5.1.1 Caracterização no estado fresco</b> .....	84
<b>5.1.2 Caracterização no estado endurecido</b> .....	85
5.2 REGISTRO FOTOGRÁFICO .....	87
<b>5.2.1 Rodamina B</b> .....	87
<b>5.2.2 Cinza</b> .....	92
5.3 DADOS COLORIMÉTRICOS .....	98
<b>5.3.1 Análise geral – RhB</b> .....	99
<b>5.3.2 Inclinação – RhB</b> .....	118
5.3.2.1 Orientação norte .....	119
5.3.2.2 Orientação leste .....	124
5.3.2.3 Orientação sul .....	128
5.3.2.4 Orientação oeste .....	132
<b>5.3.3 Métodos de aplicação – RhB</b> .....	137
<b>5.3.4 Análise geral – cinzas</b> .....	143
<b>5.3.5 Inclinação – cinzas</b> .....	154
5.3.5.1 Orientação norte .....	154
5.3.5.2 Orientação leste .....	157
5.3.5.3 Orientação sul .....	160
5.3.5.4 Orientação oeste .....	162
<b>5.3.6 Métodos de aplicação – cinzas</b> .....	165
<b>5.3.7. Considerações finais</b> .....	169

<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	171
6.1 CONCLUSÕES .....	171
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	173
<b>REFERENCIAS</b> .....	174
ANEXO A – Caracterização dos materiais .....	180
ANEXO B – Caracterização das argamassas .....	187
ANEXO C – Dados meteorológicos .....	192
ANEXO D – Dados colorimétricos .....	198



## 1 INTRODUÇÃO

Os revestimentos de fachada compõem a envolvente externa das edificações, apresentando funções de proteção e complemento a vedações e elementos estruturais, de forma que sejam contempladas exigências de durabilidade, estanqueidade, isolamento termoacústico e resistência ao fogo. Por outro lado, também atuam como acabamento final da edificação, destacando-se tanto na concepção estética quanto na valorização econômica do imóvel, além de atuarem na composição dos cenários urbanos (CHAVES, 2009).

Ao longo do tempo, as fachadas permanecem expostas a diversos agentes de degradação, classificados como intrínsecos ou extrínsecos. Conforme Cincotto (1988), o primeiro grupo se refere às propriedades e atributos de materiais, componentes e sistemas que constituem a própria fachada, enquanto que o segundo remete à ação de agentes climáticos, matérias específicas (poeira, fuligem, micro-organismos) e ao movimento da água sobre as superfícies.

A exposição a tais fatores pode implicar em perda de desempenho dos materiais que constituem o revestimento de fachada ou, quando ininterruptamente, até mesmo à ruína da própria edificação. Além disso, resulta na manifestação de manchas e eflorescências, que, por sua vez, desfiguram esteticamente a fachada (PETRUCCI, 2000).

Verhoef (2004) indica que, apesar da possibilidade de danos aos materiais constituintes, o aparecimento de manchas é a consequência mais comumente verificada, o que, em casos extremos, pode afetar negativamente o valor econômico da edificação. Diversos autores creditam a ocorrência das manchas à poluição atmosférica, que atua de forma associada às condições de chuva, vento, porosidade dos materiais empregados e geometria da edificação (PETRUCCI, 2000; CHEW; TAN, 2003; VERHOEF, 2004; VIEIRA, 2005).

A emissão de poluentes atmosféricos é oriunda predominantemente da queima de combustíveis fósseis por motores de veículos, processos industriais e centrais térmicas e elétricas. É mais intensa, portanto, nos grandes centros urbanos.

Estima-se que, somente por meio de veículos automotores, tenham sido emitidas 55,8 mil toneladas de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e 4,2 mil toneladas de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) na Região Metropolitana de São Paulo, no ano de 2013. Aponta-se ainda a emissão de outros poluentes veiculares, como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não metano (NMHC), aldeídos (RCHO) e materiais particulados (MP), que somados totalizam aproximadamente 191 mil toneladas no mesmo ano (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2013).

Conforme Chaves (2009), as partículas lançadas na atmosfera se aderem às camadas superficiais e se integram aos revestimentos das fachadas, sendo eliminadas somente por meio de procedimentos específicos de limpeza. Ao longo do tempo, estas partículas se acumulam e permanecem incrustadas às fachadas, alterando-se sob a influência de agentes climáticos e das próprias características dos materiais.

Por se tratar do componente de maior extensão em uma edificação, Chew et al. (2003) indicam que um sistema de fachada defectivo implica em grande impacto nos custos de manutenção de uma edificação. No entanto, este valor pode ser consideravelmente reduzido caso seja assegurado máximo desempenho da fachada ao longo de sua vida útil.

De maneira semelhante, a NBR 15575-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) considera os revestimentos de fachada, em relação ao custo de manutenção e reposição ao longo da vida útil, como:

- a) alto custo de manutenção e/ou reparação;
- b) custo de reposição superior ao custo inicial;
- c) comprometimento da sua durabilidade afeta outras partes do edifício.

Além disso, a mesma Norma classifica os revestimentos de fachada como manuteníveis, indicando que "São duráveis, mas necessitam de manutenção periódica, e são passíveis de substituição ao longo da vida útil do edifício". Já Chew et al. (2003) apontam a necessidade de *maintainable façades* (ou fachadas manuteníveis), que requeiram mínimos esforços de limpeza, reparo e substituição de elementos em uso.

Uma vez que permanecem expostas à radiação solar por longos períodos, as fachadas das edificações têm se mostrado particularmente atraentes para o uso de **materiais fotocatalíticos**. Estes materiais são compostos que, sob incidência da luz solar, aceleram a

ocorrência de reações químicas e produzem agentes fortemente oxidantes, transformando assim as espécies poluentes em produtos inócuos (CASSAR, 2004).

Tais reações se caracterizam como processos oxidativos avançados (POA), apresentando diversas aplicações ambientais, como purificação do ar, desinfecção da água, remediação de resíduos perigosos e tratamento de efluentes (LACEY; SCHIRMER, 2000). De modo geral, os materiais fotocatalíticos são corantes ou semicondutores, como o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), o óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ) e o sulfeto de cádmio ( $\text{CdS}$ ), amplamente utilizados.

Para Fujishima et al. (2000), o **dióxido de titânio** ( $\text{TiO}_2$ ) é o material fotocatalítico ideal, especialmente em função de sua grande disponibilidade, e por se tratar de um recurso relativamente barato, quimicamente estável e altamente oxidante. Adicionalmente, destaca-se por sua hidrofobicidade – caracterizada por ângulos de contato próximos a  $0^\circ$ , implicando na formação de lâminas d'água (em vez de gotas) que contribuem para a remoção de compostos orgânicos nas superfícies.

Dentre as principais propriedades desenvolvidas por materiais contendo dióxido de titânio, obtidas a partir dos processos oxidativos avançados e da hidrofobicidade, podem ser citadas (FUJISHIMA et al., 2000):

- a) autolimpeza de superfícies;
- b) antiembaçamento (vidros e espelhos);
- b) purificação do ar;
- c) purificação da água;
- d) atividade antitumor (para tratamento de câncer);
- e) autoesterilização (efeito antibactericida).

A partir disto, o emprego de  $\text{TiO}_2$  se mostrou atraente a produtos comerciais, especialmente em materiais não porosos, tais como vidros, espelhos, placas cerâmicas, vasos sanitários, purificadores de ar e de água. Na construção civil, o uso de materiais fotocatalíticos teve início na década de 1990, no Japão, quando foram realizados testes em concretos e materiais cerâmicos por universidades e empresas, avaliando-se a eficiência de autolimpeza de suas superfícies (FUJISHIMA; ZHANG, 2005).

O dióxido de titânio mostra-se compatível aos materiais tradicionalmente utilizados na construção civil, viabilizando sua adição a argamassas, concretos e pinturas cimentícias. Para

Cassar (2004), as matrizes cimentícias são o substrato ideal para a ocorrência da fotocatalise pelo  $\text{TiO}_2$ , uma vez que é um material básico, que permite a fixação tanto dos reagentes poluentes quanto dos produtos foto-oxidantes em sua superfície.

Um dos maiores impulsores para o efetivo emprego do dióxido de titânio na construção civil foi o projeto *Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment* (PICADA), desenvolvido entre os anos de 2002 e 2005. O projeto envolveu esforços de oito organizações (empresas, centros de pesquisa e consultores) de diferentes países europeus, tendo como principais objetivos a melhor compreensão das reações fotocatalíticas e seus efeitos, assim como o desenvolvimento de produtos comerciais autolimpantes contendo  $\text{TiO}_2$  e métodos para aplicá-los.

Na última década, diversos estudos têm abordado o emprego do dióxido de titânio em materiais de construção, especialmente em países europeus – como Itália e Portugal, tendo como foco argamassas e concretos de cimento branco (DIAMANTI et al., 2008; PEREIRA et al., 2009; GRAZIANI et al., 2014). No Brasil, há destaque ainda para outras aplicações, tais quais pavimentos, tintas, superfícies cimentícias e elementos pré-fabricados de concreto (MARANHÃO, 2009; MELO, 2011).

De modo geral, as pesquisas avaliam parâmetros que podem influenciar na capacidade autolimpante das superfícies, como teor de  $\text{TiO}_2$  (em % sobre a massa de cimento), tamanho das partículas de  $\text{TiO}_2$ , substratos, concentração de sujidades, relação água/cimento, inclinação de exposição das amostras, formas de aplicação do  $\text{TiO}_2$ , condições ambientais (temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, vento) e adição de pigmentos. No entanto, ainda existem algumas lacunas de estudo referentes à sensibilidade à luz das partículas de  $\text{TiO}_2$ , aplicabilidade geográfica e influência das condições ambientais em aplicações reais.

O presente trabalho busca avaliar a eficiência de autolimpeza de produtos cimentícios acrescidos de dióxido de titânio, expostos ao ambiente urbano da cidade de Porto Alegre, frente a variadas configurações de inclinação e orientação solar, a partir da confecção de argamassas e coberturas de pasta ou argamassa, com diferentes teores de  $\text{TiO}_2$ .

## 1.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA

A escolha do presente tema baseia-se na bibliografia referente a concretos e argamassas autolimpantes, a partir da qual foram consultados os parâmetros comumente avaliados nas pesquisas e identificados os potenciais tópicos que requerem investigações mais profundas. Nesse sentido, Folli e Macphee (2014) apresentam algumas questões científicas fundamentais que ainda precisam ser respondidas para que os produtos fotocatalíticos sejam amplamente aplicados e seus benefícios principais devidamente explorados.

Os autores destacam os seguintes tópicos:

- a) sensibilidade à luz e aplicabilidade geográfica de soluções fotocatalíticas, ou seja, influência da latitude, estações do ano e hora do dia sobre o desempenho fotocatalítico;
- b) seletividade e impacto de produtos derivados da reação fotocatalítica;
- c) química da superfície e capacidade de dispersão em matrizes de cimento.

No que compete à primeira alínea, Folli et al. (2014) indicam que a eficiência e a economia no uso de materiais fotocatalíticos em aplicações reais, para diferentes localidades do globo terrestre, é bastante afetada pela disponibilidade da radiação ultravioleta adequada para ativá-los. Folli e Macphee (2014) complementam ao apontarem que, além das geográficas, a ativação do dióxido de titânio é dependente das condições sazonais.

Brogren e Green (2003) apresentam que há variação na intensidade de radiação solar incidente para superfícies expostas a diferentes inclinação<sup>1</sup> e azimute<sup>2</sup>, conforme estudo realizado em módulos fotovoltaicos instalados no telhado de edificações. Nesse contexto, destaca-se o trabalho de Santos (2013), que simulou o comportamento da radiação solar frente a diferentes configurações de posicionamento para todas as capitais brasileiras.

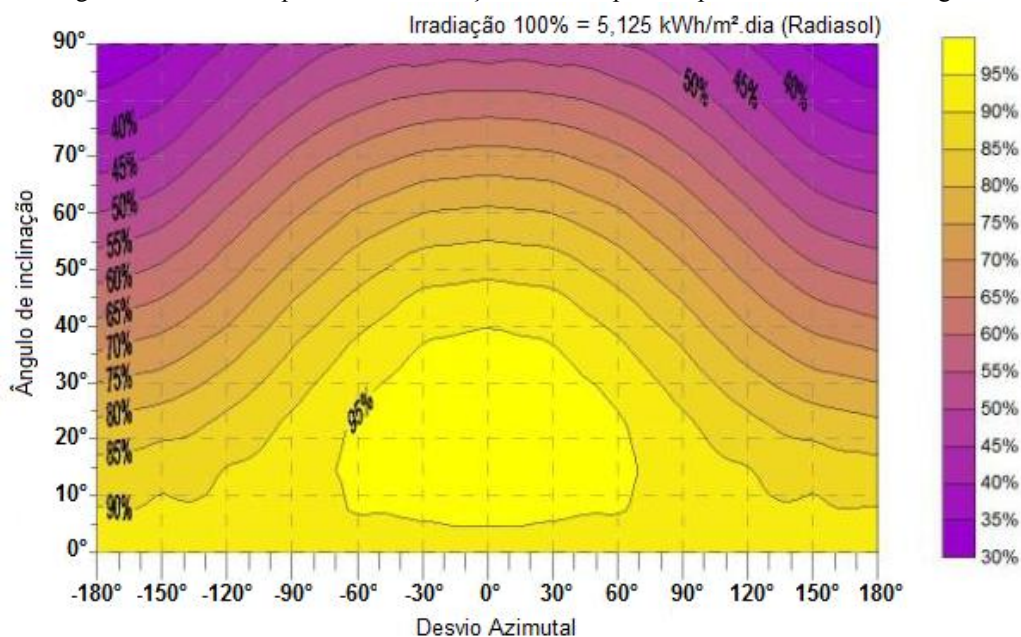
Como resultado, foram obtidos ábacos que relacionam cada posição de inclinação e azimute a um percentual da radiação máxima possível nas cidades. O ábaco para Porto Alegre (figura 1) evidencia valores divergentes de intensidade de radiação para as diferentes configurações de posicionamento, no qual as cores mais claras indicam maior exposição à radiação.

---

<sup>1</sup> ângulo formado entre a superfície e a horizontal; por definição, inclinação 0° indica que a superfície está na posição horizontal, enquanto que 90° referencia a posição vertical (como as fachadas).

<sup>2</sup> orientação da superfície tendo em vista o ângulo desta com o norte (definido este como azimute 0°).

Figura 1 – Ábaco do potencial de radiação recebido pelas superfícies em Porto Alegre



(fonte: SANTOS, 2013)

De acordo com Folli et al. (2014), os estudos envolvendo o TiO<sub>2</sub> são praticados, de forma geral, em ambientes de laboratório, onde as intensidades de radiação UV utilizadas são bastante diferentes das condições ambientais naturais, as quais são dependentes de geografia, estações do ano, duração do dia e, principalmente, das condições climáticas. Portanto, no presente estudo, optou-se pela exposição das amostras produzidas ao ambiente natural, na cidade de Porto Alegre.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa estão classificados em geral e específicos e são descritos a seguir.

### 1.2.1 Objetivo principal

O objetivo geral do trabalho é avaliar a capacidade autolimpante de argamassas e coberturas fotocatalíticas de TiO<sub>2</sub> expostas a diferentes configurações de posicionamento no microclima urbano na cidade de Porto Alegre.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) verificação da capacidade autolimpante de argamassas e coberturas fotocatalíticas na degradação de diferentes manchamentos;
- b) verificação da velocidade de autolimpeza de argamassas e coberturas fotocatalíticas;
- c) avaliação da capacidade autolimpante de argamassas e coberturas fotocatalíticas produzidas com diferentes teores de  $\text{TiO}_2$ ;
- d) avaliação da influência da orientação solar na capacidade autolimpante de argamassas fotocatalíticas;
- e) avaliação da influência da inclinação de superfícies na capacidade autolimpante de argamassas fotocatalíticas.

### 1.3 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se ao microclima urbano referente ao centro da cidade de Porto Alegre.

### 1.4 DELIMITAÇÕES

As delimitações do trabalho são:

- a) utilização do  $\text{TiO}_2$  a partir de três formas: incorporado à mistura de argamassas e aplicado como coberturas de argamassa ou pasta;
- b) avaliação de dois manchamentos: Rodamina B e lodo de cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto;
- c) estudo de quatro teores de  $\text{TiO}_2$ : 0%, 5%, 10% e 15%;
- d) exposição a quatro orientações solares: Norte, Sul, Leste e Oeste;
- e) disposição das amostras segundo três inclinações:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .

### 1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos. No primeiro, são apresentados aspectos introdutórios referentes ao tema escolhido, incluindo justificativas, objetivos, delimitações e limitações do trabalho.

No segundo capítulo, abordam-se conceitos referentes à incidência da radiação solar sobre o globo terrestre, como a sua variação no tempo e no espaço e o movimento aparente do Sol na cidade de Porto Alegre. A seguir, o terceiro capítulo apresenta o dióxido de titânio tendo em vista seus mecanismos de autolimpeza e suas principais aplicações, tanto em escala real quanto em pesquisas científicas.

No quarto capítulo, é detalhado o programa experimental, incluindo as variáveis de resposta e os parâmetros do processo, a matriz experimental, a caracterização dos materiais empregados ao longo do estudo, os ensaios laboratoriais realizados, a descrição das etapas que compõem o trabalho e os dados meteorológicos e geográficos para a cidade de Porto Alegre. No quinto capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios de laboratório, o registro fotográfico das amostras ao longo da exposição e os dados colorimétricos e sua análise estatística.

Por fim, no sexto capítulo, são expostas as conclusões obtidas a partir deste estudo e apontadas sugestões para trabalhos futuros.



## 2 RADIAÇÃO SOLAR

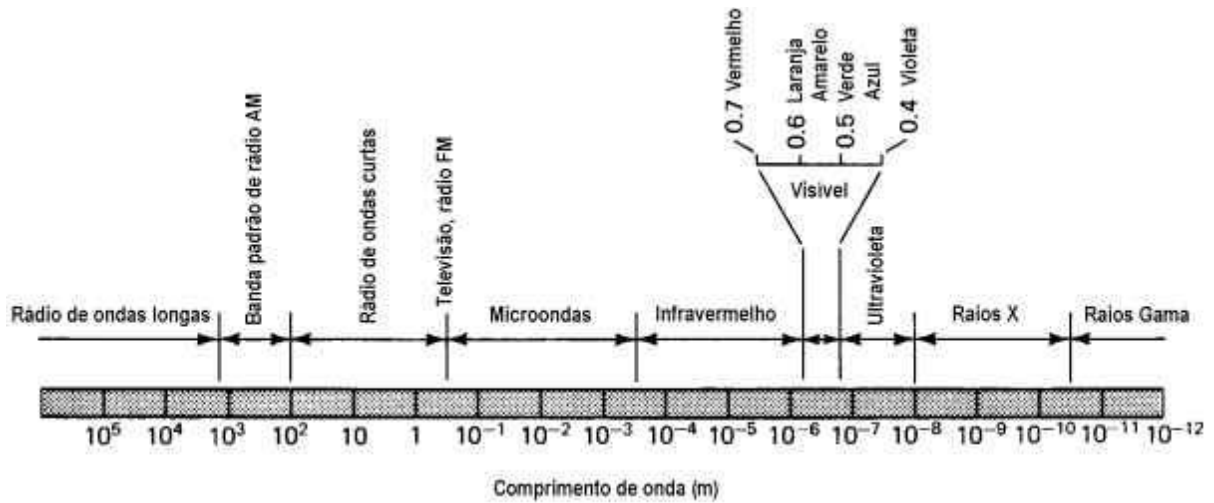
A energia oriunda do Sol é responsável por conduzir o sistema climático da Terra, uma vez que é absorvida pela superfície terrestre e transformada em calor, aquecendo o planeta e tornando-o habitável. No entanto, esta energia é absorvida de maneira desigual no tempo e no espaço, o que implica em padrões e variações sazonais no clima terrestre (KUSHNIR, 2000).

### 2.1 RADIAÇÃO SOLAR SOBRE A TERRA

Conforme Kushnir (2000), a energia criada por fusão nuclear no núcleo solar é transformada em energia térmica (calor), que viaja pelo espaço na forma de ondas eletromagnéticas, permitindo a transferência de calor pelo processo conhecido como **radiação**. As ondas eletromagnéticas se autopropagam por meio da oscilação mútua dos campos elétrico e magnético, podendo atingir regiões distantes daquela em que se originou a energia.

Há dois tipos de fontes de energia de ondas eletromagnéticas: as radiações monocromática e eletromagnética, esta última representada pelo espectro eletromagnético que caracteriza as ondas conforme seu comprimento de onda (figura 2). Apesar de haver uma grande diversidade de ondas eletromagnéticas, Grimm (1999) alerta que a radiação solar não é dividida igualmente entre todos estes diferentes comprimentos de onda: a maior parte é emitida nas radiações infravermelho (49%), visível (luz, 43%) e ultravioleta (**radiação UV**, 7%).

Figura 2 – Espectro eletromagnético



(fonte: GRIMM, 1999)

A intensidade da radiação é expressa em termos de fluxo de energia, caracterizada como a quantidade de energia que incide sobre uma unidade de superfície em uma unidade de tempo (em  $\text{W}/\text{m}^2$ ). Considerando-se a distância média do Sol à Terra ( $1,495 \times 10^{11}$  m), a densidade média anual do fluxo de energia pode ser medida em um plano perpendicular à direção de propagação dos raios solares, no topo da atmosfera terrestre:  $1.367 \text{ W}/\text{m}^2$ , valor ao qual é dado o nome de **constante solar** ( $G_{SC}$ ).

Entretanto, Pidwirny (2010) ressalta que somente em torno de 40% da energia solar interceptada no topo da atmosfera terrestre penetra em direção à superfície, uma vez que a própria atmosfera reflete e dispersa a radiação visível recebida. Mais especificamente, a maior parte da radiação ultravioleta cujo comprimento de onda esteja na faixa de 200 a 300 nm é absorvida pela camada de ozônio ( $\text{O}_3$ ) presente na estratosfera terrestre.

Já Grimm (1999) indica que somente 25% da radiação solar incidente à atmosfera penetra diretamente na superfície terrestre, caracterizando a **radiação direta**. Segundo a autora, gases e aerossóis na atmosfera podem causar o espalhamento dessa radiação para todas as direções, constituindo a **radiação difusa** – responsável pela claridade do céu durante o dia e pela iluminação de áreas que não recebem iluminação do Sol diretamente.

Parte da radiação solar ainda é refletida para o espaço, tanto pelo topo das nuvens quanto pela superfície terrestre. De acordo com Budikova (2013), o **albedo** (parcela de radiação solar que

é refletida por uma superfície) da Terra como um todo, ou seja, incluindo superfície, atmosfera e nuvens, é de 30%.

O mesmo autor também assinala que o albedo é influenciado por uma série de fatores, incluindo tipo e umidade do solo, presença de gelo, tipo e cor de vegetação, topografia e distribuição das nuvens. Na tabela 1 estão apresentados valores de albedo para determinados tipos de solo e vegetação.

Para Pinho e Galdino (2014), o albedo impacta diretamente na radiação recebida por superfícies inclinadas em relação à horizontal, uma vez que esta recebe os raios solares refletidos pelo entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, entre outros). Nesse sentido, Pinho et al. (2008) resumem as três componentes de radiação solar incidentes sobre uma superfície inclinada: a radiação global é o somatório das parcelas das radiações direta, difusa e decorrente do albedo, conforme apresentado na figura 3.

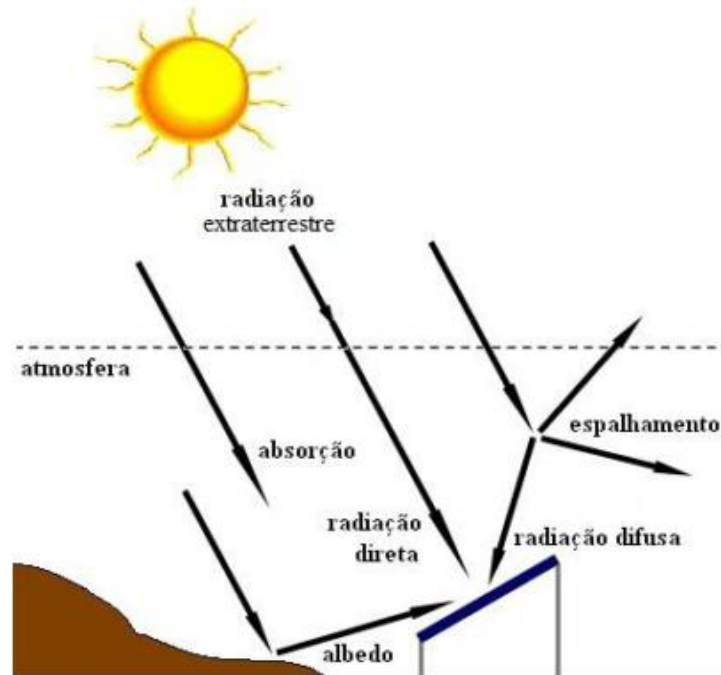
Tabela 1 – Valores típicos de albedo para diferentes condições

Superfície	Detalhes	Albedo
Solo	Escuro e molhado	0,05-0,40
	Claro e seco	
Areia	-	0,15-0,45
Grama	Longa	0,16-0,26
	Curta	
Floresta	Caducifólia	0,15-0,20
	Conífera	0,05-0,15
Água	Zênite baixo	0,03-0,10
	Zênite alto	0,10-1,00
Neve	Velha	0,40-0,95
	Fresca	

(fonte: BUDIKOVA, 2013)

Santos (2014) indica que, para que uma superfície receba a maior radiação possível em uma localidade, a inclinação deve ter igual valor à latitude local, enquanto que o azimute deve ser 0° para regiões no Hemisfério Sul (orientado para o norte, portanto), e de 90° no Hemisfério Norte (orientado para o sul). Burger e Rütther (2006) constataram que, devido à menor altura solar, latitudes maiores (como Porto Alegre) apresentam superfícies verticais mais favoráveis ao recebimento da radiação solar, quando comparada com localidades situadas em latitudes menores.

Figura 3 – Componentes da radiação solar em uma superfície inclinada



(fonte: PINHO et al., 2008)

Kushnir (2000) explica que, apesar de a quantidade de energia solar incidente ser idêntica nas superfícies A e B (ilustradas na figura 4), o fato de a superfície B estar inclinada aumenta a área incidente dos raios solares. Como resultado, tem-se um fluxo de energia menor sobre a segunda superfície, quando comparada com a primeira.

Figura 4 – Fluxo de energia



(fonte: KUSHNIR, 2000)

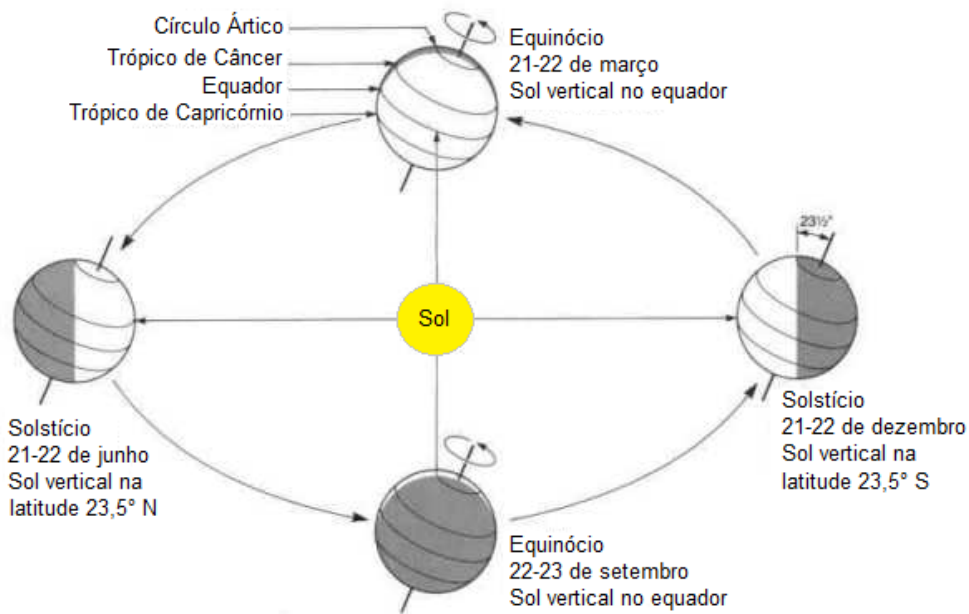
## 2.1 GEOMETRIA SOL-TERRA

A Terra tem dois movimentos principais: translação e rotação. No primeiro, o planeta gira em uma órbita elíptica em torno do Sol, o qual está em um de seus focos. A quantidade de energia solar incidente no globo terrestre é inversamente proporcional ao quadrado da sua distância em relação ao Sol, denominada Unidade Astronômica:  $1 \text{ UA} = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$  (IQBAL, 1983).

A mínima distância entre Sol e Terra ocorre no dia 3 de janeiro, com o valor aproximado de 0,983 AU, enquanto que a máxima distância é verificada em 4 de julho (afélio), a 1,017 AU, e a distância média nos dias 4 de abril e 5 de outubro. Em ciclos de longo prazo, estas distâncias são influenciadas, ainda que pouco, por corpos celestiais e por ciclos de anos bissextos, podendo ser estimadas para qualquer dia, em qualquer ano (IQBAL, 1983).

No movimento de rotação, a Terra gira em torno de seu próprio eixo, denominado eixo polar, o qual está inclinado cerca de  $23,5^\circ$  em relação ao plano elíptico de translação. Conforme Grimm (1999), isto implica nas diferentes estações do ano, já que a inclinação da Terra em relação ao Sol muda continuamente ao longo da translação: o Hemisfério Sul se inclina para longe do Sol durante seu inverno, enquanto que se aproxima no verão (figura 5).

Figura 5 – Relações entre o Sol e a Terra



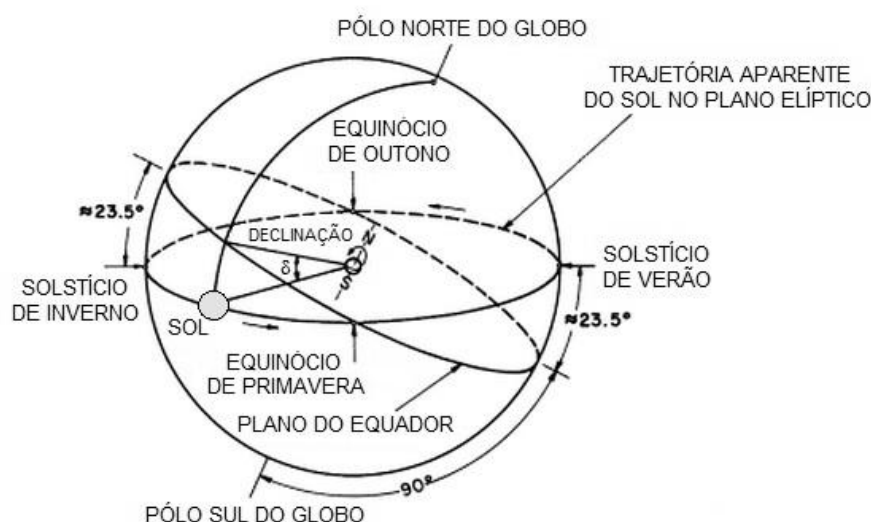
(fonte: GRIMM, 1999)

### 2.1.1 Movimento aparente do Sol

De acordo com Iqbal (1983), a inclinação do eixo polar impacta diretamente no movimento aparente do Sol ao longo de um ano, uma vez que o ângulo entre seus raios e o plano do Equador terrestre, definido como declinação solar ( $\delta$ ), varia a todo instante. Na prática, a Declinação Solar tem o valor de  $-23,5^\circ$  no solstício de verão e  $+23,5^\circ$  no solstício de inverno, enquanto que, nos equinócios de primavera e outono, os raios solares estão alinhados ao plano equatorial e, portanto,  $\delta = 0$  (figura 6).

Oliveira Filho e Saraiva (2012) descrevem o movimento aparente do Sol a partir do uso de um gnômon (haste vertical cravada no solo) em observação: considerando-se leituras à mesma hora do dia, ao longo de um ano, nota-se que a sombra gerada é máxima no solstício de inverno (S. I.) e mínima no solstício de verão (S. V.), conforme apresentado na figura 7. A bissetriz entre o ângulo formado entre ambos corresponde à sombra ocorrida nos equinócios, ou seja, quando o Sol está sobre o equador terrestre.

Figura 6 – Trajetória aparente do Sol no globo terrestre

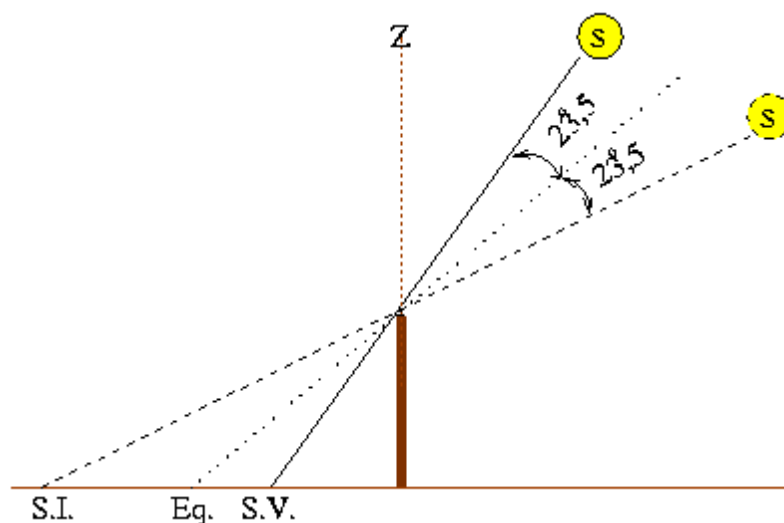


(fonte: adaptado de IQBAL, 1983)

Como resultados, observam-se variações na duração dos dias durante o ano, em uma mesma localidade: no Hemisfério Sul, os dias são mais longos no solstício de verão, ao passo que mais curtos no solstício de inverno. Entretanto, nos equinócios de primavera e outono a duração dos dias é a mesma para qualquer localidade, assim como em zonas próximas ao Equador terrestre em qualquer período do ano<sup>3</sup> (PINHO; GALDINO, 2014).

<sup>3</sup> Pinho e Galdino (2014) indicam que, para o Hemisfério Sul, o solstício de verão ocorre no dia 21 de dezembro, e o de inverno no dia 21 de junho, ao passo que os equinócios de primavera e outono se dão em 21 de setembro e 21 de março respectivamente. Entretanto, Iqbal (1983) alerta que as datas para estes eventos variam levemente de ano para ano, o que implica em diferentes datas encontradas para estas quatro posições solares principais.

Figura 7 – Movimento aparente solar

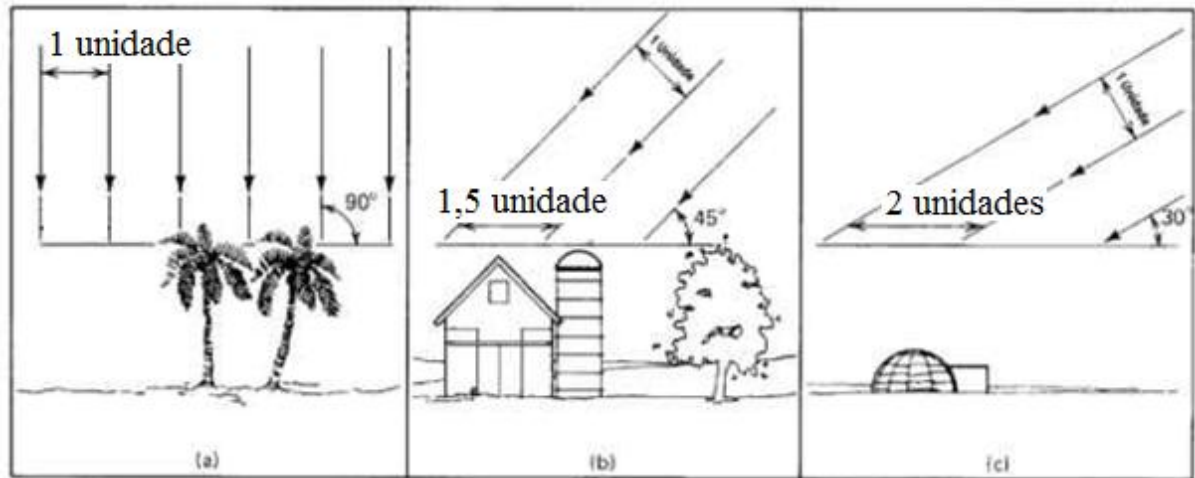


(fonte: OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2012)

Grimm (1999) comenta a radiação solar: "No hemisfério de verão as alturas do Sol são maiores, os dias mais longos e há mais radiação solar. No hemisfério de inverno as alturas do Sol são menores, os dias mais curtos e há menos radiação solar.". A mesma autora ainda indica que a altura do Sol influencia a intensidade de radiação solar (irradiância) por duas maneiras.

Primeiramente, a irradiância é mais intensa quando os raios solares estão mais concentrados (ou seja, quando atingem a Terra verticalmente), fato recorrente quando o Sol está mais alto; já quando o Sol está mais baixo, os raios solares encontram-se mais espalhados e menos intensos (figura 8). O segundo fator é associado às ocasiões em que a altura solar é menor, uma vez que o percurso dos raios solares ao longo da atmosfera é maior, havendo, desta forma, maior absorção, reflexão e espalhamento da radiação, que, por sua vez, atinge a superfície terrestre com menor intensidade.

Figura 8 – Variações na quantidade de energia solar



(fonte: GRIMM, 1991)

### 2.1.2 Movimento aparente do Sol em Porto Alegre

Primeiramente, apresentam-se os ângulos que descrevem as relações geométricas entre os raios solares (a partir do movimento aparente do Sol) e a superfície terrestre, conforme Pinho e Galdino (2014). São eles:

- a) ângulo zenital ( $\theta_z$ ): ângulo entre os raios solares e a vertical local (zênite);
- b) altura ou elevação solar ( $\alpha$ ): ângulo entre os raios solares e a sua projeção sobre o plano horizontal (horizonte do observador);
- c) ângulo azimutal do Sol ( $\gamma_s$ ): ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e direção Norte-Sul (horizonte do observador).

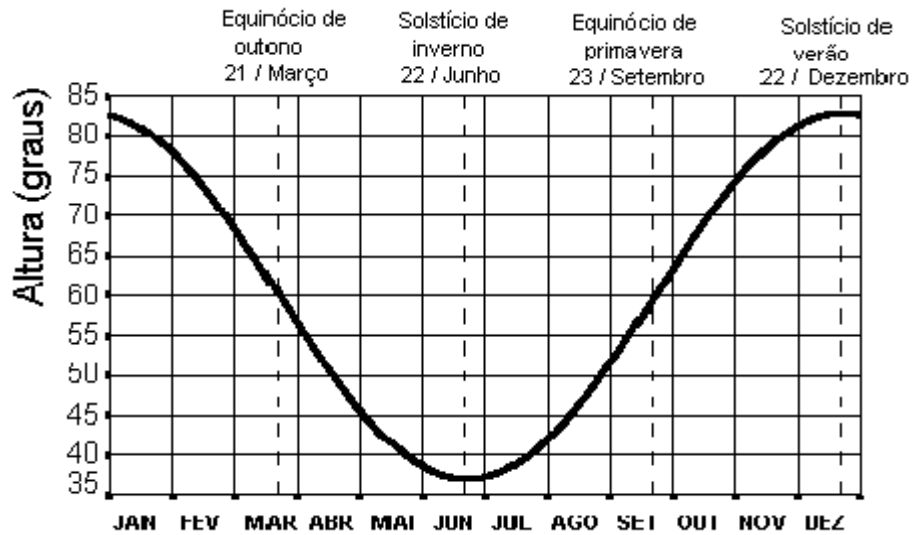
Com isso, é possível prosseguir ao trabalho de Silveira (2000), o qual descreve a movimentação aparente do Sol ao longo do ano para a cidade de Porto Alegre, local onde é realizado o presente estudo. Conforme o autor, estas observações também são válidas para todo o estado do Rio Grande do Sul, uma vez que a cidade de Porto Alegre encontra-se na latitude de  $30^\circ$  S, ao passo que os extremos do estado situam-se aproximadamente a  $27^\circ$  S e  $34^\circ$  S, havendo, portanto, uma diferença máxima de apenas  $4^\circ$  em relação à Capital.

Qualitativamente, Silveira (2000) relata que, para a latitude da cidade, as sombras sempre apontam para o Sul ao meio-dia, apresentando-se muito mais longas durante o Inverno em relação ao Verão. Complementando, indica que o Sol permanece visível por um período menor ao longo do dia no Inverno, estação na qual o nascente e o poente do Sol encontram-se mais ao Norte.



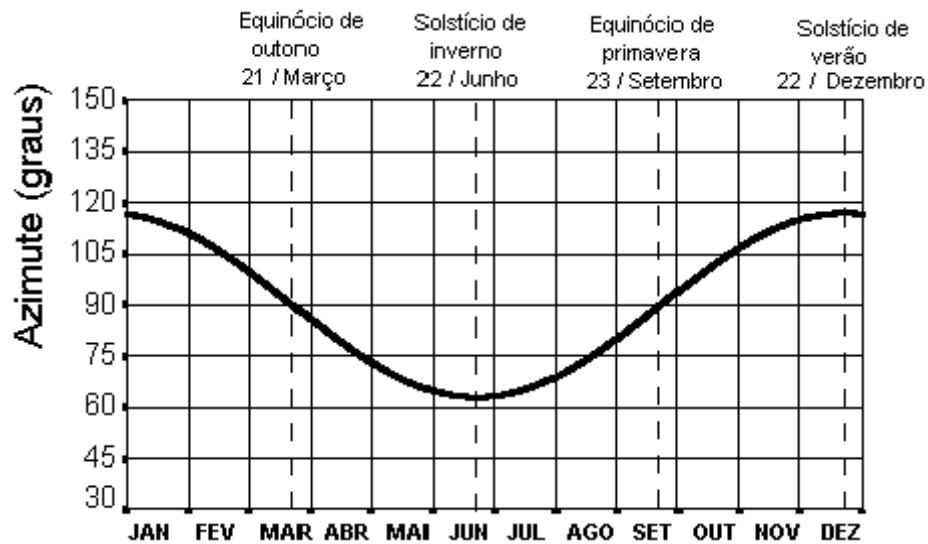
Portanto, tomando-se as definições de ângulos da geometria solar, são apresentados os gráficos elaborados por Silveira (2000), conforme ilustram as figuras 9, 10 e 11.

Figura 9 – Elevação solar ( $\alpha$ ) do Sol ao meio-dia em Porto Alegre



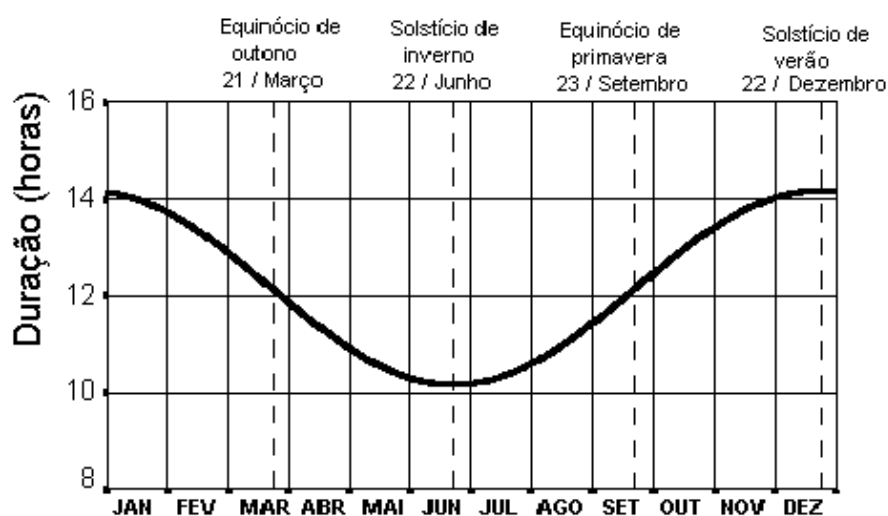
(fonte: SILVEIRA, 2000)

Figura 10 – Ângulo azimutal do Sol ( $\gamma_s$ ) nascente em Porto Alegre



(fonte: SILVEIRA, 2000)

Figura 11 – Duração do dia em Porto Alegre



(fonte: SILVEIRA, 2000)

Assim, tendo em vista os gráficos apresentados por Silveira (2000), o período de exposição das amostras (iniciado no mês de julho) contempla as condições mínimas de insolação para a cidade de Porto Alegre, caracterizando-se, em tese, como o cenário mais adverso para as atividades fotocatalíticas.

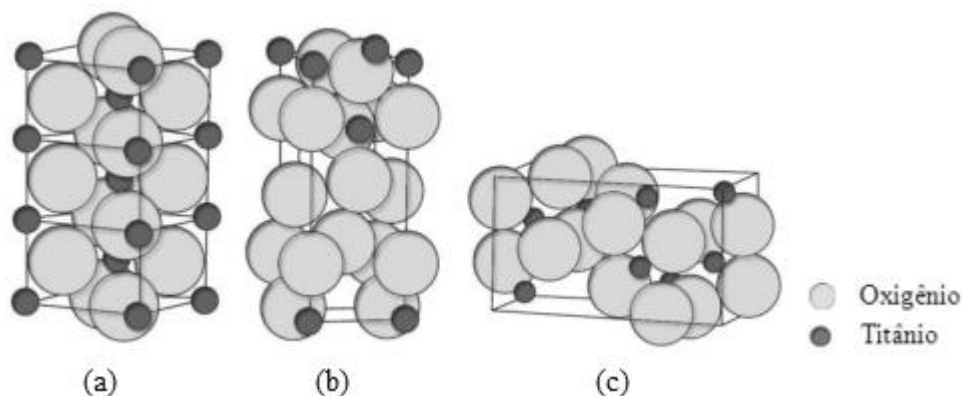
### 3 DIÓXIDO DE TITÂNIO

O dióxido de titânio pode ser cristalizado sob três formas: rutilo, anatase e brooquita, sendo a primeira a mais estável termodinamicamente a temperaturas variadas (até 1825° C, seu ponto de fusão), à pressão atmosférica. No entanto, à temperatura ambiente, a forma mais estável é a anatase, enquanto que a brooquite apresenta estabilidade intermediária (ABDULLAH et al., 2007).

As fases rutilo e anatase são tetragonais, ao passo que a brooquita é ortorrômbica (figura 12). Conforme Pereira et al. (2009), o rutilo é amplamente utilizado como pigmento (por exemplo, tintas), devido ao seu elevado índice de refração – conferindo cor branca, além de possuir ampla disponibilidade (nono material mais abundante da crosta terrestre).

Já a anatase é útil para aplicações fotocatalíticas, devido ao seu forte poder oxidante quando exposta à radiação ultravioleta, à sua estabilidade química e ausência de toxicidade. Por fim, a brooquita não apresenta atividade fotocatalítica e tampouco possui aplicações industriais (PEREIRA et al., 2009).

Figura 12 – Formas cristalográficas do TiO<sub>2</sub>: (a) rutilo; (b) anatase e (c) brooquita



(fonte: MELO, 2011)

Cerca de 88% da produção mundial de titânio é obtida a partir da ilmenita, mineral de titânio de ocorrência mais comum, enquanto que o restante é proveniente do rutilo, mineral com maior teor, porém mais escasso. As reservas mundiais de ilmenita e rutilo totalizam aproximadamente 715 milhões de toneladas, dois terços das quais são encontradas na China, Austrália e Índia (BRASIL, 2013).

No Brasil, as reservas lavráveis são da ordem de 2,6 milhões de toneladas. A principal mina de minério de titânio está localizada na cidade de Mataraca, no litoral da Paraíba (distante cerca de 125 km de João Pessoa), sendo responsável por 75% da produção de concentrados de ilmenita e rutilo no território nacional (BRASIL, 2013).

Já a produção de **dióxido de titânio**, iniciada em 1971 no País, ocorre em fábrica próxima a Arembepe/BA, cuja capacidade de fabricação é de 60 mil toneladas por ano. No entanto, a fábrica atende a somente 55% do mercado brasileiro, enquanto que o restante é importado de produtores chineses e ucranianos (BRASIL, 2010).

A crise econômica que afeta os países desenvolvidos nos últimos anos, bem como o excesso de capacidade produtiva no mundo implicou em queda nos preços do  $TiO_2$  no mercado internacional, tal como apresentado no quadro 1 (BRASIL, 2010).

Quadro 1 – Histórico de preços do  $TiO_2$  no mercado mundial, em US\$/tonelada

Período	Valor	Período	Valor	Período	Valor	Período	Valor
1978	3.005,00	1986	3.477,06	1994	1.936,56	2002	2.136,27
1979	3.188,03	1987	4.057,78	1995	2.744,97	2003	1.991,32
1980	3.767,80	1988	4.619,10	1996	2.353,38	2004	1.942,17
1981	3.275,73	1989	5.156,85	1997	2.204,01	2005	2.020,00
1982	3.041,02	1990	4.754,13	1998	2.654,96	2006	1.847,00
1983	2.890,16	1991	3.065,14	1999	2.547,19	2007	1.879,00
1984	2.791,27	1992	2.436,86	2000	2.315,57		
1985	2.825,35	1993	2.081,51	2001	2.194,39		

(fonte: BRASIL, 2010)

### 3.1 HISTÓRICO

Os estudos envolvendo o  $TiO_2$  tiveram início no final dos anos 1960, por Akira Fujishima, na Universidade de Tóquio, em pesquisas referentes a células solares fotoeletroquímicas. Nas décadas de 1970 e 1980 houve grande desenvolvimento dos estudos referentes à fotocatalise,

descobrimo-se que o dióxido de titânio tinha forte poder de decomposição de compostos orgânicos.

Frank e Bard<sup>4</sup> (1977) publicaram o primeiro trabalho nesse sentido, ao relatarem a decomposição do cianeto na presença de soluções aquosas de TiO<sub>2</sub>. A seguir, outros autores apresentaram a remoção de agentes nocivos tanto na água quanto no ar (HASHIMOTO et al., 2005).

No entanto, apesar dos evidentes benefícios ambientais obtidos com o uso do dióxido de titânio, este material ainda não havia sido explorado em produtos inovadores pela indústria. De acordo com Hashimoto et al. (2005), o TiO<sub>2</sub> era inadequado tanto para obtenção de energia limpa, como para o tratamento de grandes quantidades de água e ar, pois a densidade de energia da luz é considerada baixa e, além disso, o TiO<sub>2</sub> pode absorver apenas uma pequena quantidade de raios UV oriundos da luz solar (cerca de 5%).

Portanto, já na década de 1990, os mesmos autores concluíram que o emprego de dióxido de titânio seria mais atraente para o tratamento de substâncias adsorvidas a superfícies, ou seja, em duas dimensões, contrariamente a três dimensões para os casos da água e do ar. Desta forma, as quantidades absolutas de contaminantes seriam menores e, conseqüentemente, os raios UV presentes no ambiente seriam suficientes para manter uma superfície fotocatalítica limpa.

No entanto, Fujishima et al. (2000) alertam que o efeito degradante obtido é efetivo somente quando o número de fótons incidentes é muito maior que o das moléculas contaminantes estabelecidas na superfície, indicando que o dióxido de titânio não é recomendável para remoção de grandes volumes de contaminantes. Em contraponto, tem-se que a ação fotocatalítica é capaz de impedir o crescimento destas substâncias.

Como aplicações de casos bidimensionais, citam-se a remoção de odores de ambientes internos por meio da incidência de luz artificial (das lâmpadas fluorescentes), bem como a prevenção de manchas oriundas de resíduos de fumaça de cigarro. No Japão, em meados da década de 1990 surgiam produtos fotocatalíticos limpos atribuídos ao uso de filmes de TiO<sub>2</sub>, tais quais vidros, telhas, placas e papéis (FUJISHIMA et al., 2000).

---

<sup>4</sup> Frank, S. N.; Bard, A. J. Heterogeneous photocatalytic oxidation of cyanide and sulfite in aqueous solutions at semiconductor powders. **The Journal of the Physical Chemistry**, n. 15, 1977.

Nos anos 2000, o mercado japonês de produtos fotocatalíticos com base no dióxido de titânio cresceu rapidamente, atingindo a marca de 30 bilhões de ienes em 2003 (ou 300 milhões de dólares). As mais de duas mil empresas japonesas atuantes no setor estavam, de maneira geral, divididas em cinco áreas de atuação: materiais de uso externo (telhas, vidros, tendas), mobiliário, pavimentos, purificadores e artigos domésticos (FUJISHIMA; ZHANG, 2005).

Na Europa, entre os anos de 2002 e 2005, o projeto PICADA desenvolveu produtos com propriedades fotocatalíticas aplicáveis a fachadas de edificações, a partir da adição de nanopartículas de dióxido de titânio. Uma argamassa decorativa à base de cimento branco, cal e areia, e uma cobertura mineral de cimento branco e fíler, são classificados como produtos secos; em outra categoria, têm-se os produtos prontos para uso, os quais são as coberturas translúcidas à base de siloxano, acrílico e silicato, recomendáveis para fachadas porosas de centros urbanos (PICADA PROJECT, 2006).

Atualmente, produtos fotocatalíticos aplicáveis à construção civil já se encontram disponíveis no mercado internacional, especialmente na Europa e no Japão. Nesse sentido, há destaque para o cimento acrescido de  $TiO_2$  do *Italcementi Group* (linha TX Active®) e para os *pavers*<sup>5</sup> fotocatalíticos da *Mitsubishi Materials Company* (linha NOxer®). O quadro 2 apresenta produtos autolimpantes comercializados atualmente.

Quadro 2 – Produtos comerciais fotocatalíticos disponíveis atualmente

Empresa	Linha	Produto fotocatalítico
Global Engineering (Itália) e Millenium Chemicals (Inglaterra)	Ecorivestimento®	Cimento e gesso em pó, para paredes e pavimentos.
	Ecopaint®	Cobertura (base d'água) de usos exterior, interior e túneis.
	Ecostar®	<i>Pavers</i> de concreto.
Toto Ltd. (Japão)	Hydrotec Tile	Placas cerâmicas.
	Hydrotec Color Coat	Cobertura (base d'água) pigmentada.
Eurovia Beton (França)	NOxer® Coating	Cobertura para barreiras antirruído.
Grupo López-Guillén (Espanha)	AplicaRev	Argamassa autolimpante industrializada (utiliza a linha de cimentos TX Active).
Eliane (Brasil)	Hydrotec	Placas cerâmicas.

(fonte: elaborado pelo autor)

<sup>5</sup> blocos de concreto utilizados para pavimentação.

### 3.2 FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA

Um material sólido, sob a ótica de sua condutividade elétrica, pode ser classificado como isolante, condutor ou semicondutor. No primeiro caso, a estrutura eletrônica do material é composta por bandas de valência e de condução separadas por uma descontinuidade (energia de *bandgap*) muito grande, impedindo a troca de elétrons entre as bandas (MARANHÃO, 2009).

Em um material condutor, o *bandgap* é inexistente, ou seja, os níveis de energia são contínuos e os elétrons podem mover-se de uma banda para outra. Já em um semicondutor, tal qual o **dióxido de titânio**, a promoção de um elétron da banda de valência para a de condução é dada somente a partir da absorção de fótons com energia superior à de *bandgap*, o que, por sua vez, traz como efeito a geração de radicais hidroxila ( $\text{HO}^\bullet$ ) com poder de oxidação suficiente para degradar compostos poluentes (MARANHÃO, 2009).

A formação de tais radicais é definida como um processo oxidativo avançado, caracterizado como um mecanismo de descontaminação ambiental. Os POA estão subdivididos em sistemas homogêneos e heterogêneos, nos quais os agentes oxidantes são gerados com ou sem incidência de raios UV.

No sistema homogêneo, o catalisador das reações encontra-se na mesma fase dos compostos a serem degradados. Já no heterogêneo, o catalisador é afixado a um material suporte, sendo colocado no meio a ser tratado (seja este líquido ou gasoso), envolvendo a ativação de um material semicondutor por luz solar ou artificial (LACEY; SCHIRMER, 2008).

A fotocatalise heterogênea tem atraído grande interesse de grupos de pesquisas devido à sua propriedade de destruição de poluentes. Tais processos ocorrem em materiais semicondutores, uma vez que sua estrutura eletrônica é formada por bandas de valência e bandas de condução separadas por uma energia de *bandgap* ( $E_g$ ), correspondente à mínima energia requerida para torná-los condutores de eletricidade (BENEDIX et al., 2000).

Esta energia está associada a um comprimento de onda ( $\lambda$ ), o qual deve ser igual ou inferior ao calculado pela equação de Planck (equação 1):

$$\lambda \leq \frac{h.c}{E_g} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$\lambda$  = comprimento de onda (nm);

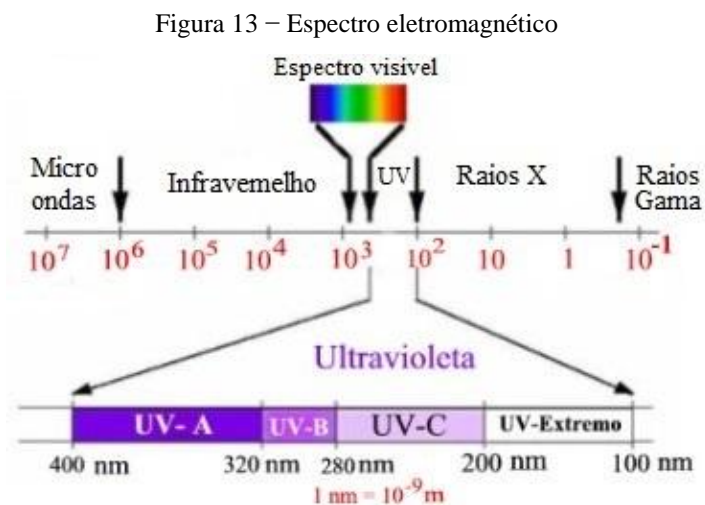
$h$  = constante de Planck,  $4,136 \times 10^{-16}$  (eV.s);

$c$  = velocidade da luz,  $2,998 \times 10^8$  (m/s);

$E_g$  = energia de *bandgap* ( $\text{TiO}_2 = 3,2$  eV);

O  $\lambda$  calculado para o  $\text{TiO}_2$  é de 387 nm. Portanto, a energia requerida para ativação da fotocatalise no dióxido de titânio é compatível à fornecida pela radiação solar na faixa dos raios UV-A, uma vez que estes possuem comprimento de onda entre 320 e 400 nm no espectro eletromagnético, conforme apresentado na figura 13.

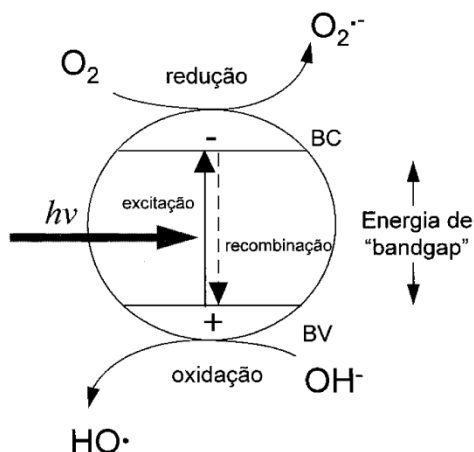
A absorção de fótons de energia ( $h\nu$ ) superior à energia de *bandgap* implica na promoção de um elétron ( $e^-$ ) da banda de valência (BV) para a banda de condução (BC), associado à geração concomitante de uma lacuna ( $h^+$ ) na banda de valência, conforme ilustra a figura 14. Estas lacunas apresentam potenciais bastante positivos, entre +2,0 e +3,5 V, dependendo do semicondutor e do pH (NOGUEIRA; JARDIM, 1998).



(fonte: UNESP, 2014)



Figura 14 – Esquema representativo da partícula de um semiconductor



(fonte: NOGUEIRA; JARDIM, 1998)

Benedix et al. (2000) indicam que as lacunas podem oxidar moléculas doadoras de elétrons, ao passo que as bandas de condução podem reduzir moléculas receptoras de elétrons. Os mesmos autores ainda destacam o forte poder oxidante das lacunas ( $h^+$ ), as quais, na presença de moléculas de água, produzem os radicais hidroxila ( $HO^\bullet$ ), agentes altamente reativos.

Tanto as lacunas quanto os radicais hidroxila são oxidantes muito potentes, podendo degradar contaminantes orgânicos. No entanto, estudos já demonstraram que o mecanismo degradante não ocorre somente em função da formação dos radicais hidroxila, mas também de outras espécies radicalares oriundas do oxigênio, tais como o íon superóxido ( $O_2^-$ ) e o radical hidropéroxido ( $HO_2^\bullet$ ), formados pela captura de elétrons foto-gerados (NOGUEIRA; JARDIM, 1998).

De acordo com Fujishima e Zhang (2005), o potencial oxirredutor das lacunas foto-geradas é de +2,53 V, em comparação ao eletrodo-padrão de hidrogênio em pH 7. O potencial redox dos radicais hidroxila é ligeiramente superior, enquanto que para os elétrons da banda de condução é de -0,52 V, o suficiente para reduzir  $O_2$  em  $O_2^-$  e  $HO_2^-$ .

Maranhão (2009) apresenta as reações do processo fotocatalítico, conforme as equações que seguem. Primeiramente, a incidência de raios UV implica na promoção de elétrons da banda de valência para a banda de condução (equação 2):



A falta de elétrons na camada de valência em contato com a água adsorvida na superfície dissocia a água em  $\text{OH}^-$  e  $\text{H}^+$  e forma o radical hidroxila (equação 3):



Ao mesmo tempo, o elétron que foi deslocado para a banda condutora reduz o oxigênio formando o íon superóxido (equação 4):



Por fim, o íon superóxido reage com o  $\text{H}^+$  dissociado da água para produzir radicais hidroperóxidos ( $\text{HO}_2^\bullet$ ), conforme a equação 5:



### 3.3 MOLHABILIDADE

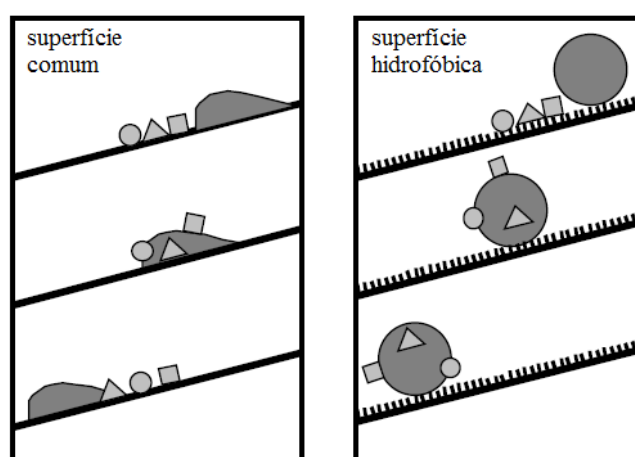
De acordo com Benedix et al. (2000), superfícies autolimpantes podem ser obtidas a partir de duas formas principais de molhabilidade: super-hidrofobicidade ou super-hidrofilicidade. No primeiro, os ângulos de contato permanecem próximos a  $100^\circ$ , compondo-se superfícies de baixa molhabilidade.

Neste caso, a adesão de moléculas de água, bem como de outras partículas, é extremamente reduzida. A este mecanismo dá-se o nome de **efeito lótus**, tendo em vista as características

hidrorrepelente e autolimpante também observadas em algumas plantas, tal como a folha de lótus utilizada nos estudos de Barthlott e Neinhuis (1997) – que apresentaram a interdependência entre rugosidade superficial, redução da adesão de partículas e hidrorrepelência, em superfícies biológicas.

Na super-hidrofobicidade, as moléculas de água que entram em contato com a superfície são imediatamente transformadas em gotas, às quais as partículas contaminantes são aderidas e, desta forma, removidas juntamente ao rolamento destas gotas. A figura 15 ilustra tal mecanismo.

Figura 15 – Efeito lótus



(fonte: BENEDIX et al., 2000)

Yuranova et al. (2007) indicam que já foram realizadas algumas tentativas de simulação das propriedades obtidas pelo efeito lótus em painéis cimentícios aplicados na construção civil. Para isto, tais elementos foram cobertos com cera e parafina, porém os resultados não foram satisfatórios: os polímeros empregados deterioraram-se pela ação de agentes climáticos ao longo do tempo, implicando na ocorrência de fissuras, além de estarem associados a custos elevados.

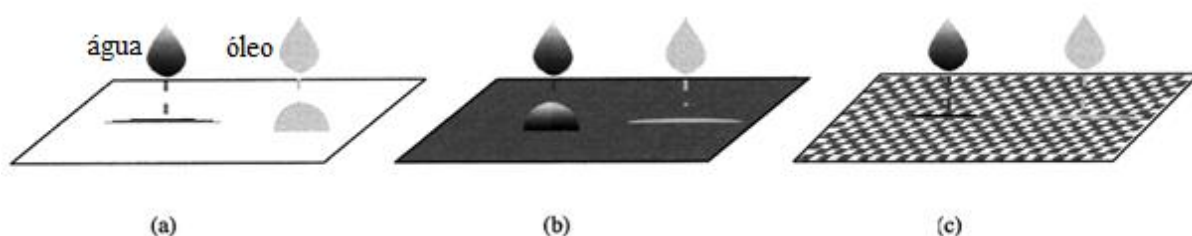
Por outro lado, Benedix et al. (2000) indicam que a limpeza de superfícies também pode ser obtida por ângulos de contato próximos a  $0^\circ$ , como nos casos do sabão e detergentes, que diminuem a tensão superficial da água. Alternativamente, o mesmo efeito pode ser verificado com a aplicação de filmes de materiais fotocatalíticos sobre superfícies, tornando-as super-hidrofílicas.

Fujishima et al. (1998) apontam que, sob incidência da radiação UV, superfícies contendo dióxido de titânio podem atingir ângulos de contato próximos a  $0^\circ$  tanto para a água quanto para óleos. Estas superfícies são denominadas como anfifílicas (ou anfipáticas), apresentando hidrofilicidade e hidrofobicidade de forma simultânea.

Os experimentos de Fujishima et al. (1998) foram realizados em filmes de  $\text{TiO}_2$  na fase anatase: imediatamente após seu preparo, tais filmes apresentaram ângulo de contato médio de  $15^\circ \pm 1^\circ$ , enquanto que, após armazenados em ambiente escuro por dois meses, o ângulo de contato da água medido aumentou para  $72^\circ \pm 1^\circ$ . A seguir, os filmes de anatase foram submetidos à radiação UV, apresentando um ângulo de contato de  $0^\circ \pm 1^\circ$  e o consequente espalhamento da gota de água por toda a superfície, de maneira imediata.

Os mesmos procedimentos foram realizados para o trioleato de glicerol, um óleo: antes da incidência da radiação UV, o ângulo de contato médio foi de  $10^\circ \pm 1^\circ$ , indicando que a superfície de anatase era hidrofóbica e oleofílica (figura 16). No entanto, após a iluminação da radiação UV, as gotas do óleo também se espalharam pela superfície, e os ângulos de contato medidos situaram-se em  $0^\circ \pm 1^\circ$  (FUJISHIMA et al., 1998).

Figura 16 – Molhabilidade de superfícies:  
(a) hidrofílica; (b) oleofílica e (c) anfifílica



(fonte: FUJISHIMA et al., 1998)

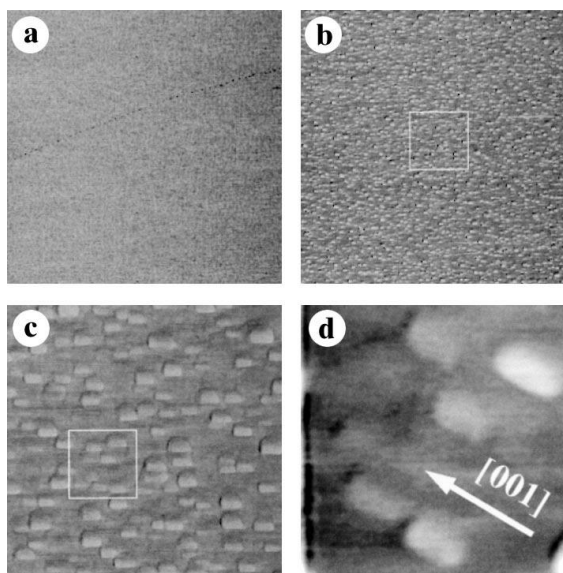
Os estudos foram estendidos para outros líquidos e para a fase rutilo, apresentando resultados semelhantes aos anteriores. Assim, infere-se que a incidência de radiação UV em filmes de  $\text{TiO}_2$  implica em superfícies altamente hidrofílicas e oleofílicas, na forma de filmes policristalinos ou cristais isolados, independentes de suas atividades fotocatalíticas (FUJISHIMA et al., 2000).

A figura 17a ( $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ ) apresenta um cristal isolado de rutilo, antes da incidência da radiação UV: não são observados contrastes na imagem, indicando que, microscopicamente, a

molhabilidade da superfície é homogênea. Após a iluminação por radiação UV, conforme ilustrado na figura 17b, entretanto, é possível notar a distribuição de áreas hidrofílicas (mais claras) e oleofílicas (mais escuras) na superfície em questão (FUJISHIMA et al., 1998).

Aumentando-se esta imagem, tal como apresentado na figura 17c (1000 nm x 1000 nm), é possível visualizar que as partes hidrofílicas possuem um formato retangular, na faixa de 30 a 80 nm de extensão. Um novo aumento da imagem (240 nm x 240 nm, a 45°) demonstra que, topograficamente, as áreas hidrofílicas são mais altas em relação às oleofílicas (FUJISHIMA et al., 1998).

Figura 17 – Imagem de cristal de rutilo:  
(a) antes da iluminação por raios UV; (b) após iluminação por raios UV;  
(c) áreas hidrofílicas e oleofílicas e (d) aumento da imagem, a 45°



(fonte: FUJISHIMA et al., 1998)

Mesmo após o armazenamento dos filmes de anatase e rutilo no escuro durante alguns dias, a característica anfifílica das superfícies de  $\text{TiO}_2$  foi mantida. O armazenamento por um período mais longo resultou em um aumento gradual do ângulo de contato – revelando que a condição estável é hidrofóbica. Porém, a super-hidrofilicidade ressurgiu rapidamente com a reincidência da radiação ultravioleta (FUJISHIMA et al., 2000).

De acordo com Fujishima e Zhang (2005), propriedade super-hidrofílica foi descoberta acidentalmente em uma das pesquisas realizadas no laboratório da TOTO Inc., em 1995. Naquela ocasião, foi verificado que, quando adicionada uma percentagem de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) a um filme de  $\text{TiO}_2$ , o ângulo de contato entre a água e a superfície em questão

tendia a  $0^\circ$  após a incidência de radiação UV. Desta forma, a água escorre sobre a superfície, carreando consigo os compostos degradados e contribuindo para a remoção de sujeira.

No entanto, posteriormente Fujishima e Zhang (2005) descobriram que se tratava de uma característica intrínseca ao  $\text{TiO}_2$ , não havendo a necessidade de adição de  $\text{SiO}_2$ . O mecanismo da super-hidrofilicidade foi ainda justificado pela reconstrução dos grupos de hidroxila após a incidência dos raios UV: elétrons fotoexcitados são capturados por moléculas de oxigênio, enquanto que as lacunas se propagam pela superfície do  $\text{TiO}_2$ , sendo capturadas por cadeias de átomos de oxigênio.

A seguir, as lacunas enfraquecem a energia de ligação entre o átomo de  $\text{TiO}_2$  e a cadeia de oxigênio, ao passo que outras moléculas de água adsorvidas rompem esta ligação, formando novos grupos de hidroxila. Na ausência de luz, os grupos de hidroxila gradualmente perdem adsorção à superfície na forma de  $\text{H}_2\text{O}_2$  ou  $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$  (FUJISHIMA; ZHANG, 2005).

Hashimoto et al. (2005) referem-se à super-hidrofilicidade indicando que "há alterações na molhabilidade da água quando em uma superfície com  $\text{TiO}_2$ ", e que, após a incidência dos raios UV, a água tende a se espalhar pela superfície. Neste estágio, o ângulo de contato entre água e superfície é de  $0^\circ$ , permanecendo próximo a esse valor por mais um ou dois dias, em um ambiente sem incidência de raios UV.

A partir deste período, o ângulo de contato aumenta lentamente, ao passo que a superfície torna-se menos hidrofílica. No entanto, tal processo pode ser revertido simplesmente pela reincidência de luz à superfície, o que confere ao dióxido de titânio a vantagem de ser o único material conhecido de altíssima hidrofilicidade que é estável e possui propriedades semi permanentes (HASHIMOTO et al., 2005).

Fujishima e Zhang (2005) alertam que a super-hidrofilicidade é um processo dissociado da decomposição fotocatalítica de compostos orgânicos. Apesar disso, ambos os fenômenos atuam de forma simultânea, o que confere ao  $\text{TiO}_2$  ampla vantagem em relação aos demais semicondutores, já que comumente estes apresentam somente uma daquelas propriedades (decomposição de poluentes ou hidrofilicidade), tais quais titanato de estrôncio ( $\text{SrTiO}_3$ ) e trióxido de tungstênio ( $\text{WO}_3$ ).

Fujishima et al. (2000) indicam que superfícies hidrofílicas têm ampla aplicabilidade, especialmente em superfícies antiembaçamento e em materiais de construção autolimpantes.

No primeiro caso, têm-se vidros e espelhos, nos quais não há formação de vapor e, tampouco, de gotas de água (forma-se uma lâmina d'água).

Os mesmos autores ainda indicam que o efeito hidrofílico é semipermanente, podendo se estender por alguns anos. Quanto à aplicação na construção, citam-se as fachadas de edificações, nas quais seria possível a remoção de partículas poluentes oriundos da queima de combustíveis fósseis. Deve-se atentar que o mecanismo hidrofílico exige uma quantidade mínima de intensidade de luz para ativação das reações, similarmente à tecnologia fotocatalítica, o que pode afetar seus efeitos em ambientes internos.

### 3.4 APLICAÇÕES

Além do dióxido de titânio, podem ser citados como materiais semicondutores: sulfeto de cádmio (CdS), óxido de zinco (ZnO), trióxido de tungstênio (WO<sub>3</sub>), sulfeto de zinco (ZnS) e óxido de ferro (III) (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). No entanto, dois motivos principais tornam o dióxido de titânio o mais amplamente utilizado: primeiramente, por apresentar características como não toxicidade, fotoestabilidade e estabilidade química em uma ampla faixa de pH, e também pelo fato de que os demais materiais citados não apresentam fotoatividade e fotoestabilidade de forma combinada, o que pode levá-los a sofrer fotocorrosão (NOGUEIRA; JARDIM, 1998).

#### 3.4.1 Aplicações a materiais cimentícios

A utilização do dióxido de titânio junto a materiais cimentícios pode ocorrer, basicamente, sob duas formas: incorporado à mistura de concretos ou argamassas, ou como revestimento (cobertura). No primeiro caso, o TiO<sub>2</sub> pode ser diluído na água de amassamento ou adicionado como pó (combinado com o aglomerante), enquanto que, no segundo, dá-se como tinta, solução aquosa ou cobertura de argamassa.

De acordo com Gurol (2006), a incorporação do TiO<sub>2</sub> às misturas, em especial àquelas de cimento branco, tem como objetivo a manutenção de suas características estéticas (coloração) ao longo do tempo, a partir da remoção de manchas e poeira pela ação dos radicais hidroxila. De fato, esta tecnologia já é empregada em algumas construções inauguradas na década de 2000, como a igreja *Dives in Misericordia*, em Roma, e a sede da *Air France*, no aeroporto Charles de Gaulle, em Paris (figuras 18a e 18b), entre outras.

Figura 18 – Tecnologia autolimpante em construções:  
(a) igreja Dives in Misericordia e (b) Air France Head Office



(fonte: NICHOLSON, 2013)

Para Hüsken e Brouwers (2008), a adição em pó de  $\text{TiO}_2$  tende à formação de aglomerados na superfície do composto cimentício, impedindo uma distribuição mais homogênea do material fotocatalítico e resultando em menores taxas de remoção de poluentes, na comparação com a adição junto à água de amassamento. No entanto, o alto custo<sup>6</sup> associado ao dióxido de titânio – na comparação aos demais materiais empregados em concretos e argamassas, tem levado os pesquisadores a explorarem sua aplicação sob a forma de cobertura (*coating*) ou revestimentos.

Segundo Gurol (2006), tais aplicações podem atuar na descontaminação do ar, envolvendo a decomposição de gases poluentes e compostos orgânicos. Como exemplos de uso, citam-se pavimentos de rodovias, calçadas e paredes de túneis – esta última vinculada ao uso de lâmpadas fluorescentes, das quais emite-se a radiação UV artificialmente (Figura 19).

Para Krishnan et al. (2013), apesar dos resultados promissores obtidos com o  $\text{TiO}_2$  adicionado a misturas de argamassas e concretos, tal emprego pode não ter um custo-benefício adequado naquelas aplicações em que a resistência à abrasão não é fundamental, como telhados e paredes de edificações. Segundo os mesmos autores, uma vez que somente as partículas de  $\text{TiO}_2$  expostas à radiação solar podem ser ativadas, a maior parte do material adicionado permanece inutilizado.

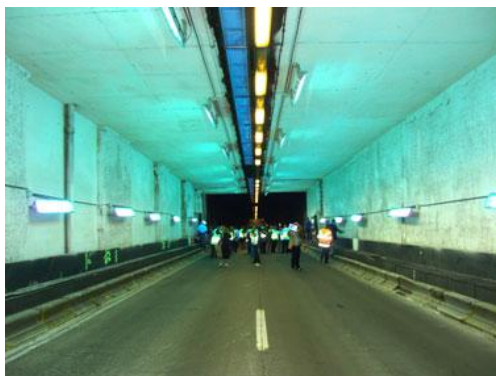
Assim, pesquisas têm buscado o emprego do dióxido de titânio como solução aquosa, conforme apresentado por Abdullah et al. (2007), que propõem 11 métodos para sua aplicação

<sup>6</sup> No ano de 2016, os preços verificados para o dióxido de titânio em pó (anatase e rutilo), no Brasil, foram entre US\$ 1.500 e US\$ 2.000 por tonelada.



sobre substratos. Porém, apesar de proporcionarem grande atividade fotocatalítica na superfície, Diamanti et al. (2008) alertam que há perda de aderência das camadas aplicadas expostas a condições de chuva e vento, o que implica em queda da eficiência autolimpante.

Figura 19 – Túnel com revestimento fotocatalítico em Bruxelas, Bélgica



(fonte: BOONEN; BEELDENS, 2013)

Ainda, é possível aplicar coberturas de argamassa fotocatalítica – espessuras de até 10 mm, sobre *pavers* e substratos de concreto, buscando-se contemplar tanto a autolimpeza de tais superfícies quanto a purificação do ar, conforme ilustrado nas figuras 20a e 20b (MELO, 2011). No entanto, Beeldens (2007) adverte que, para essas aplicações, as partículas de  $\text{TiO}_2$  podem ser removidas pela ação dos pneus dos veículos e por condições severas de uso.

Em relação a pastas de cimento, Ruot et al. (2009) demonstram que a atividade fotocatalítica nestes materiais é maior conforme o aumento do  $\text{TiO}_2$  adicionado à mistura, ao passo que, para as argamassas, há um limite de tal atividade, apesar dos incrementos no teor de  $\text{TiO}_2$  empregado.

Figura 20 – Aplicação de *pavers* fotocatalíticos em Antuérpia, Bélgica:  
(a) via pavimentada (estudo-piloto) e (b) blocos utilizados



(a)

(b)

(fonte: BOONEN; BEELDENS, 2013)

De maneira geral, o quadro 3 apresenta alguns dos trabalhos científicos produzidos a partir do ano 2000, tendo em vista a aplicação do dióxido de titânio na construção civil. É possível observar que tais estudos avaliam os parâmetros que envolvem a obtenção de superfícies cimentícias autolimpantes ou que podem afetar sua eficiência, sejam eles intrínsecos aos materiais empregados ou fatores externos.

Em relação a este último caso, pode-se destacar o trabalho de Trichês e Melo (2011), os quais avaliaram, em ambiente de laboratório, a influência de diferentes condições ambientais (radiação UV, umidade e taxa de fluxo) na degradação de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) por argamassas acrescidas de  $\text{TiO}_2$ . Assim, tem-se que maiores porcentagens de umidade ocasionam decréscimo na atividade fotocatalítica, ao passo que, para maiores taxas de fluxo de  $\text{NO}_x$  (em L/min), menor é a degradação deste poluente – indicando maior efetividade de autolimpeza, portanto, para localidades com pouca movimentação de massa de ar (ventos cuja velocidade é inferior a 5 km/h).

Quadro 3 – Pesquisas envolvendo a aplicação do TiO<sub>2</sub> à construção civil

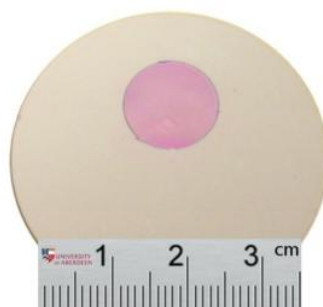
Ano	Autor	Investigação	Principais conclusões
2000	Benedix et al.	Aplicação do TiO <sub>2</sub> sobre vidros, azulejos cerâmicos e plásticos.	Superhidrofilicidade e radicais hidroxila podem combater compostos orgânicos, inorgânicos e bactérias.
2005	Fujishima; Zhang	Aplicação do TiO <sub>2</sub> sobre tenda de PVC.	Autolimpeza em compostos orgânicos resulta da fotocatalise e da superhidrofilicidade.
2006	PICADA Project	Avaliação dos produtos fabricados pelo projeto PICADA em testes de laboratório, macro-escala e <i>in situ</i> ( <i>street canyons</i> )	Películas espessas de sujidade não são removidas rapidamente; eficiência maior dá-se para taxas pequenas de deposição de sujidade.
2007	Abdullah et al.	Formas de aplicação de filmes de TiO <sub>2</sub> em suspensão aquosa em tijolos.	-
2008	Diamanti et al.	Incorporação do TiO <sub>2</sub> em argamassas, sob as formas de pó, solução aquosa e película.	Perda de aderência de partículas de TiO <sub>2</sub> em solução aquosa aplicada como cobertura.
2009	Maranhão	Produção de uma superfície fotocatalítica (pós-tratamento com TiO <sub>2</sub> ) com auxílio de agente promotor de adesão (hidrofugante à base de silicone).	Aplicação de hidrofugante e de película de TiO <sub>2</sub> sequencialmente pode implicar em redução de algumas manchas.
2009	Pereira et al.	Avaliação da ação degradante de TiO <sub>2</sub> à tinta <i>spray</i> , variando-se o traço da argamassa, teor de TiO <sub>2</sub> e ângulo de inclinação das amostras.	Superfícies mais lisas apresentaram menor autolimpeza, assim como aquelas dispostas a 90°.
2009	Ruot et al.	Comparação de desempenho do TiO <sub>2</sub> incorporado a pastas e argamassas de cimento branco.	Autolimpeza em pastas aumenta com maiores teores de TiO <sub>2</sub> , o que não se verifica para argamassas.
2011	Melo	Desenvolvimento de peças pré-moldadas de concreto cobertos com argamassa fotocatalítica.	Melhor eficiência de autolimpeza para películas de argamassa de 3 mm e superfícies mais rugosas.
2012	Folli et al.	Avaliação da degradação de RhB por argamassas com micro e nano partículas de TiO <sub>2</sub> .	Argamassas com micro partículas de TiO <sub>2</sub> têm maior autolimpeza para moléculas maiores de sujidade, enquanto que nano partículas para menores moléculas.
2013	Diamanti et al.	Avaliação da ação de TiO <sub>2</sub> em argamassas com adição de pigmentos.	Presença de pigmentos nas argamassas reduz sua capacidade de autolimpeza.
2013	Graziani et al.	Avaliação da ação inibitória do TiO <sub>2</sub> em fachadas de tijolos frente a algas e fungos.	A ação inibitória de fungos pelo TiO <sub>2</sub> está relacionada à ação da chuva dirigida nas fachadas.
2014	Graziani et al.	Aplicação de TiO <sub>2</sub> em solução aquosa sobre tijolos, por meio de <i>spray</i> .	Aplicação de TiO <sub>2</sub> por <i>spray</i> se mostrou hábil na degradação de azul de metileno, em exposição a lampadas fluorescentes em laboratório.
2014	Smits et al.	Avaliação da variação da concentração de TiO <sub>2</sub> empregada, concentração de sujidade e relação água/cimento do substrato.	Há maior eficiência fotocatalítica para menores valores de relação água/cimento.
2015	Austria	Avaliação da eficiência de autolimpeza frente a diferentes sujidades, variando-se o traço da argamassa e teor de TiO <sub>2</sub> aplicado.	Manchamentos como tinta <i>spray</i> e produtos de corrosão formam barreira que impede a ativação do TiO <sub>2</sub> pelos raios UV.

(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.4.2 Formas de avaliação da eficiência de autolimpeza

Diversos estudos avaliam a atividade autolimpante de compostos cimentícios fotocatalíticos por meio da degradação do corante orgânico Rodamina B. Por exemplo, Folli (2010) aplicou uma solução aquosa de Rodamina B, à concentração de 0,5 g/L, sobre amostras de pasta de cimento branco, tal como apresentado na figura 21.

Figura 21 – Aplicação de solução aquosa de Rodamina B sobre pasta



(fonte: FOLLI, 2010)

Ruot et al. (2009) diluíram o mesmo corante em água natural e em água com cal, sob duas concentrações (4 mg/L e 15 mg/L), aplicando tais soluções sobre amostras de argamassa (cimento Portland) por meio de uma seringa. Já Krishnan et al. (2013) dissolveram Rodamina B em água deionizada à 0,05 g/L, aplicando-a sobre coberturas de silicato, enquanto que Diamanti et al. (2013) submeteram amostras de GRC<sup>7</sup> à imersão de solução aquosa do corante por 14 horas.

Alternativamente, Maranhão (2009) utilizou como manchamento os corantes azul de metileno e anilina vermelha, aplicados sobre amostras de argamassa. Smits et al. (2014) simularam a ação da fuligem urbana diluindo-se negro de carbono (*carbon black*) em água (à 0,08 mg/L), solução a qual fora aplicada em amostras de argamassa de cimento branco por meio de uma pipeta.

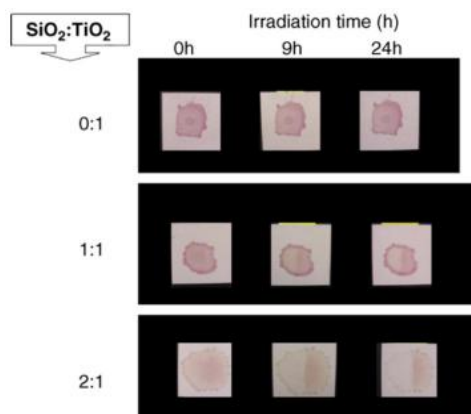
Há ainda outros manchamentos, como a aplicação de tinta *spray* sobre placas de argamassa de cimento branco por Pereira et al. (2009) – simulando pichações. Yuranova et al. (2007) aplicaram uma gota de vinho tinto, o qual contém pigmentos como tanino, caroteno e

---

<sup>7</sup> GRC: *glassfiber reinforced concrete* (concreto reforçado com fibras de vidro)

licopeno, sobre placas cimentícias cobertas com dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) e dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), conforme observado na figura 22.

Figura 22 – Aplicação de gota de vinho tinto sobre placas cimentícias



(fonte: YURANOVA et al., 2007)

Diamanti et al. (2008) expuseram amostras de argamassa (cimento branco) no ambiente urbano de Milão, dispostas no topo de uma edificação. Já Austria (2015) realizou três manchamentos por aspersão, utilizando azul de metileno, produtos de corrosão e solução aquosa contendo cinzas da queima de eucalipto, os quais foram aplicados sobre amostras de argamassa de cimento branco.

Por fim, considera-se cabível a avaliação do comportamento autolimpante de argamassas contendo  $\text{TiO}_2$  expostas ao ambiente natural, frente a condições controladas de orientação solar e inclinação das superfícies, fatores estes que interferem fortemente na intensidade de radiação solar disponível para ativação do mecanismo autolimpante. A aplicação de coberturas de argamassa ou pasta é justificada por apresentarem-se como alternativas mais econômicas e potencialmente mais efetivas em relação às demais formas de aplicação do  $\text{TiO}_2$ .

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental foi elaborado tendo em vista a avaliação da eficiência de autolimpeza a partir de diferentes intensidades de radiação solar incidindo sobre amostras de argamassa. Para isto, buscou-se submeter tais amostras a configurações de posicionamento que se assemelhassem a aplicações práticas em ambientes urbanos, tais como superfícies horizontais e inclinadas e fachadas voltadas para diferentes orientações solares.

Já o planejamento experimental considera duas formas de aplicação do dióxido de titânio: incorporado às argamassas e aplicado como cobertura sobre substratos de argamassa. A primeira forma abrange um escopo maior, no qual são abordados diferentes teores de  $\text{TiO}_2$ , inclinações e orientações solares, caracterizando o planejamento inicial do trabalho.

No entanto, ao longo do estudo, optou-se por avaliar, adicionalmente, o emprego do  $\text{TiO}_2$  em coberturas de pasta e argamassa, com o intuito de comparar seu desempenho frente a diferentes formas de aplicação. A seguir, são apresentados o planejamento experimental, a caracterização dos materiais e a descrição dos métodos utilizados na confecção das argamassas e coberturas fotocatalíticas.

### **4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL**

O embasamento teórico sobre o tema permitiu definir as variáveis do projeto experimental, ou seja, as variáveis de resposta (dependentes) e os parâmetros do processo (variáveis independentes).

#### **4.1.1 Variáveis de resposta**

Estão relacionadas à análise colorimétrica de superfícies, que permitem avaliar a capacidade de autolimpeza das argamassas e coberturas produzidas a partir das coordenadas cromáticas

medidas via espectrofotômetro ao longo do estudo (abordado mais profundamente no item 4.2.6):

- a) variação de cor no tempo ( $\Delta E$ );
- b) refletância ( $L^*$ ).

#### 4.1.2 Parâmetros do processo

As variáveis independentes podem ser agrupadas em fatores controláveis, constantes ou não controláveis (erros ou ruídos experimentais). A seguir, são apresentados os parâmetros relacionados a cada um destes fatores, para o presente estudo:

a) fatores controláveis:

- idade de coleta dos dados
- teor de  $TiO_2$ , em relação à massa de cimento da mistura: 0% (referência), 5%, 10% e 15%;
- orientação solar de exposição: norte, sul, leste e oeste;
- inclinação de exposição:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ;
- métodos de aplicação do  $TiO_2$ : incorporado à mistura, cobertura de pasta ou cobertura de argamassa.

b) fatores constantes:

- argamassadeira utilizada para moldagem das amostras;
- uso de materiais de mesmo lote (para cimento, areia e  $TiO_2$ );
- uso de aditivo superplastificante;
- traço das argamassas (1:3, cimento e areia);
- ordem de aplicação dos materiais na argamassadeira;
- índice de consistência fixo em  $25 \pm 1$  cm;
- amostras curadas em água com cal, por 28 dias;
- espessura das coberturas de pasta ou argamassa: 5 mm
- aplicação de dois manchamentos: rodamina B (RhB) e cinzas da queima de eucalipto;
- uso de espectrofotômetro portátil calibrado imediatamente antes à realização das leituras de cor nas amostras;

c) fatores não controláveis:

- temperatura e umidade relativa do ar durante a produção das misturas de argamassa (as amostras foram moldadas em dias diferentes);
- acabamento superficial das amostras;

- variações no manchamento aplicado em cada placa;
- condições climáticas ao longo do período de exposição (temperatura, umidade, precipitação, insolação e intensidade da radiação UV).

### 4.1.3 Matriz experimental

No que compete ao uso do dióxido de titânio de forma incorporada às argamassas, foram escolhidas como variáveis independentes:

- a) quatro teores de  $\text{TiO}_2$ : 0%, 5%, 10% e 15%;
- b) quatro orientações solares: norte, sul, leste e oeste;
- c) três inclinações de exposição:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .

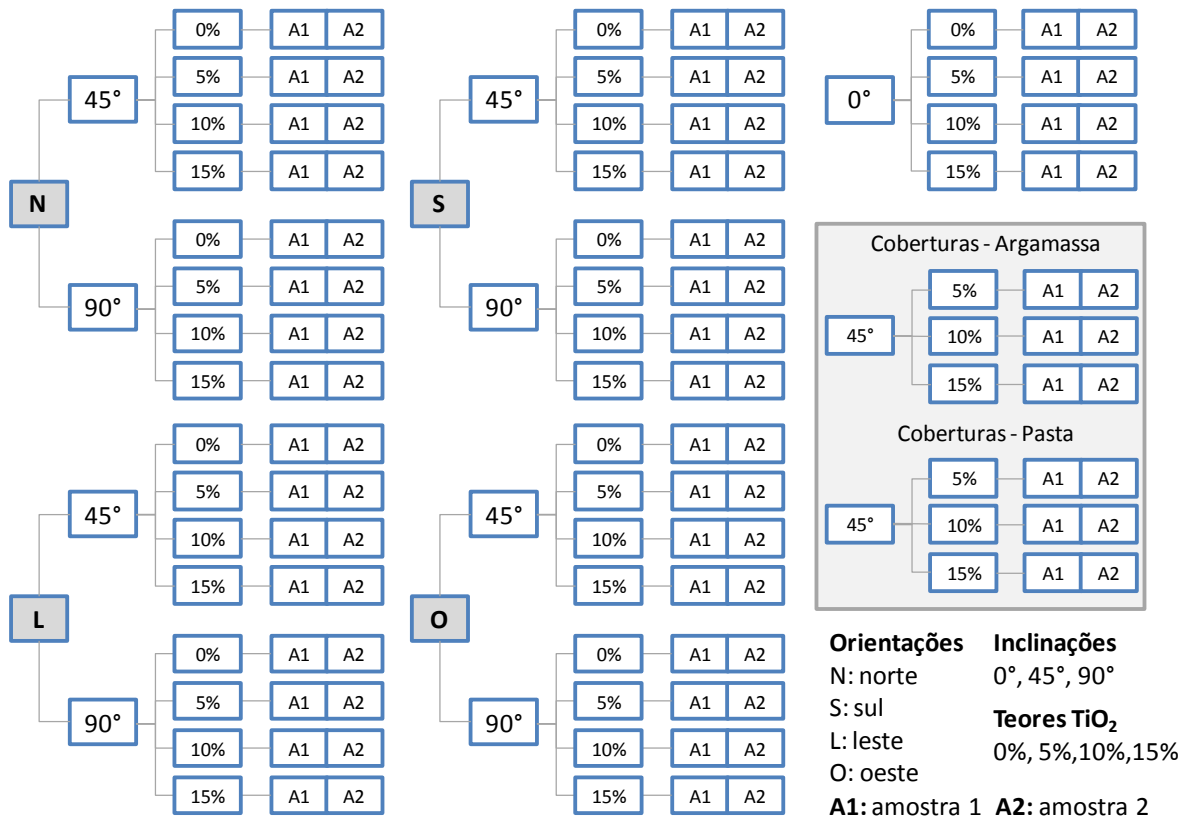
A partir da combinação destas variáveis, tem-se a produção de 72 amostras de argamassa (considerando-se repetição) por manchamento realizado, o que totaliza, portanto, 144 amostras. Para as coberturas de pasta ou argamassa aplicadas sobre substratos de argamassa, as variáveis independentes são as que seguem:

- a) três teores de  $\text{TiO}_2$ : 5%, 10% e 15%;
- b) uma orientação solar: norte;
- c) uma inclinação de exposição:  $45^\circ$ .

Assim, tem-se a aplicação do dióxido de titânio como cobertura em 12 amostras (seis coberturas de pasta e seis de argamassa, com repetição), e, contabilizando-se os dois manchamentos, 24 amostras. Em resumo, para os dois casos de emprego do  $\text{TiO}_2$  (incorporado às argamassas ou utilizado como cobertura), foi utilizado um total de 168 amostras de argamassa. A figura 23 ilustra a matriz experimental resultante, por manchamento.



Figura 23 – Matriz experimental (por manchamento)



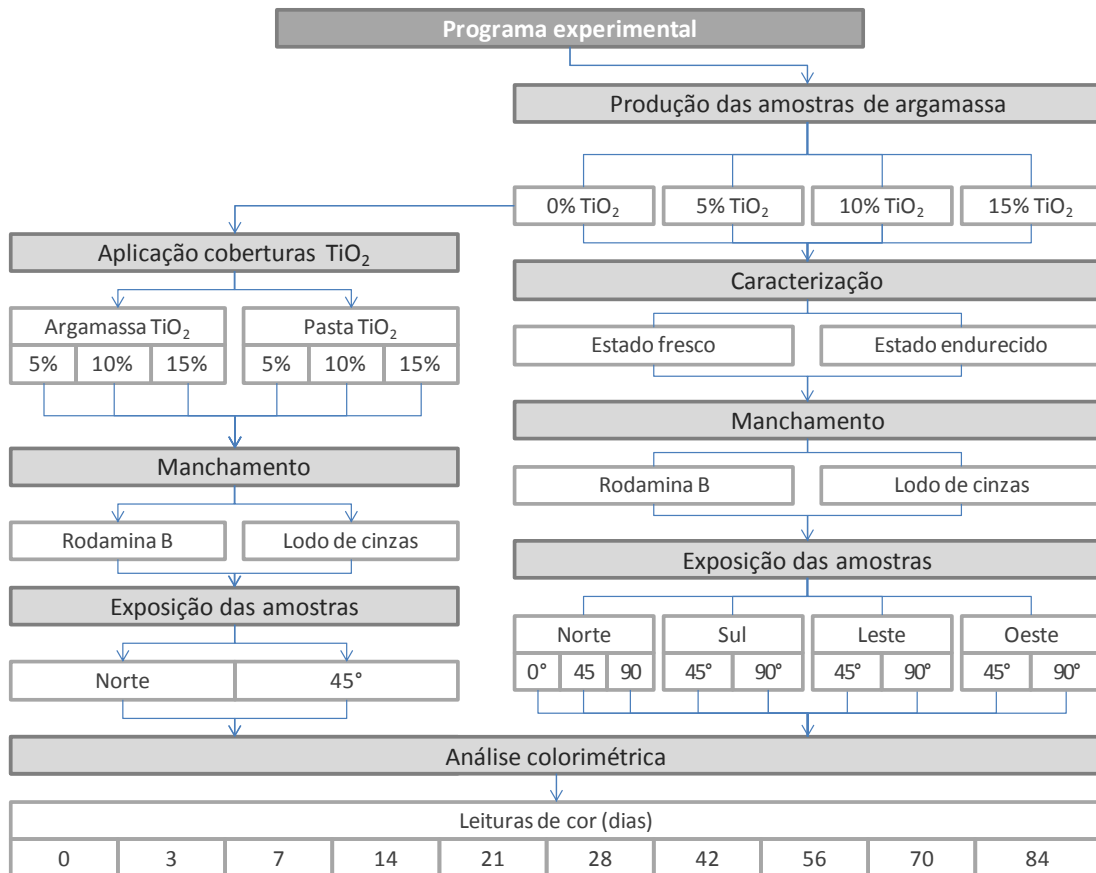
(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.1.4 Fluxograma

O programa experimental pode ser dividido em cinco etapas: produção das amostras de argamassa e aplicação das coberturas de  $\text{TiO}_2$ , caracterização das argamassas, manchamento, exposição e análise colorimétrica. A sequência de realização das etapas pode ser visualizada no fluxograma esquemático da figura 24.

Tendo em vista a elaboração de um escopo de trabalho adequado, optou-se pela avaliação das coberturas de pasta e argamassa a partir de uma única configuração de posicionamento ao longo da exposição (orientação solar norte, à 45° de inclinação), não havendo necessidade de repetir todos os fatores controláveis propostos para o  $\text{TiO}_2$  incorporado à mistura.

Figura 24 – Fluxograma do programa experimental



(fonte: elaborado pelo autor)

## 4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, são caracterizados os materiais empregados no presente estudo e descritas as etapas que compõem o programa experimental.

### 4.2.1 Materiais utilizados

Os materiais empregados na confecção das argamassas e coberturas foram: cimento, agregado miúdo, dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), água e aditivo. Os materiais utilizados como manchamento serão apresentados separadamente no item 5.2.4.

Os relatórios dos ensaios de caracterização dos materiais, realizados em laboratórios especializados, estão expostos no Anexo A.

#### 4.2.1.1 Cimento

Para confecção das argamassas, empregou-se um cimento Portland branco CPB-40 Estrutural, proveniente de fonte internacional. O material é caracterizado a partir de aspectos químicos e físico-mecânicos.

Nesse sentido, a tabela 2 apresenta a composição química do cimento, obtida a partir do ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX), realizado no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IGEO/UFRGS), por meio da técnica em amostra fundida com curva de calibração a partir de padrões de rocha. Já a caracterização físico-mecânica engloba os itens apresentados na tabela 3, na qual os ensaios de BET e difração a *laser* foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS. O ensaio de difração a laser foi realizado em um equipamento CILAS, modelo 1180 Liquid, com faixa de análise entre 0,04 e 2500  $\mu\text{m}$ .

Tabela 2 – Composição química do cimento branco por FRX

Compostos	% em peso
SiO <sub>2</sub>	20,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,20
TiO <sub>2</sub>	0,09
MgO	0,79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00
MnO	0,00
CaO	65,80
Na <sub>2</sub> O	0,00
K <sub>2</sub> O	0,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02
SO <sub>4</sub>	3,79
LOI	5,38

(fonte: IGEO/UFRGS)

Tabela 3 – Características físico-mecânicas do cimento utilizado

Ensaio	Método	Resultado
Massa específica	NM 23:2001	3,02 g/cm <sup>3</sup>
Superfície específica	BET	6,17 m <sup>2</sup> /g
Diâmetro médio das partículas	Difração a <i>laser</i>	11,45 $\mu\text{m}$
Índice de finura	NBR 11579:2001	0,2%
Resistência à compressão, 7 dias	NBR 7215:1996	31,7 MPa
Resistência à compressão, 28 dias	NBR 7215:1996	49,1 MPa

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.2.1.2 Agregado miúdo

Para a produção das argamassas, utilizou-se areia de origem de um mesmo lote, disponível comercialmente e cuja matéria-prima é a rocha calcária. A caracterização física do agregado miúdo empregado é apresentada na tabela 4.

Tabela 4 – Características físicas do agregado miúdo utilizado

Abertura das peneiras (mm)	Amostra	
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
4,8	0	0
2,4	1	1
1,2	3	4
0,6	8	12
0,3	79	91
0,15	5	96
< 0,15	4	100
Módulo de finura	2,04	
Dimensão máxima	1,2 mm	
Massa unitária (NM 45:2006)	1,60 g/cm <sup>3</sup>	
Massa específica (NM 52: 2009)	2,62 g/cm <sup>3</sup>	

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.2.1.3 Dióxido de titânio

Primeiramente, apresenta-se a caracterização física do dióxido de titânio, conforme tabela 5. Os ensaios de BET e de difração a *laser* foram realizados pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER/ UFRGS). O ensaio de difração a *laser* foi realizado em um equipamento CILAS, modelo 1180 Liquid, com faixa de análise entre 0,04 e 2500  $\mu\text{m}$ .

Tabela 5 – Caracterização física do dióxido de titânio

Ensaio	Método	Resultado
Massa específica	NM 23:2001	3,81 g/cm <sup>3</sup>
Superfície específica	BET	11,68 m <sup>2</sup> /g
Diâmetro médio das partículas	Difração a laser	0,49 $\mu\text{m}$

(fonte: elaborado pelo autor)

Comparando-se a outros trabalhos, o valor de massa específica apresentado por Austria (2015) foi de 3,81 g/cm<sup>3</sup>, empregando-se o mesmo método de ensaio referenciado na tabela 5.

Já Hüsken et al. (2013) apresentaram valores em torno de 3,90 g/cm<sup>3</sup>. Em relação à superfície específica pelo método de BET, Austria (2015) obteve o valor de 9,44 m<sup>2</sup>/g para a sua amostra de dióxido de titânio (anatase).

Quanto ao diâmetro médio das partículas (fase anatase), tem-se 0,17 µm conforme Folli et al. (2012) e 0,21 para Austria (2015). Ainda, aproximadamente 0,30 µm para Poon e Cheung (2007) e um valor mínimo de 0,65 µm no trabalho de Hüsken et al. (2013).

A caracterização química ocorreu por meio de Fluorescência de Raios-X (FRX), ensaio o qual foi realizado pelo Instituto de Geociências (IGEO) da UFRGS. Os compostos químicos verificados são apresentados na tabela 6, os quais foram obtidos por análise semi-quantitativa utilizando-se uma rotina automática de varredura por WDS.

Tabela 6 – Composição química do dióxido de titânio por FRX

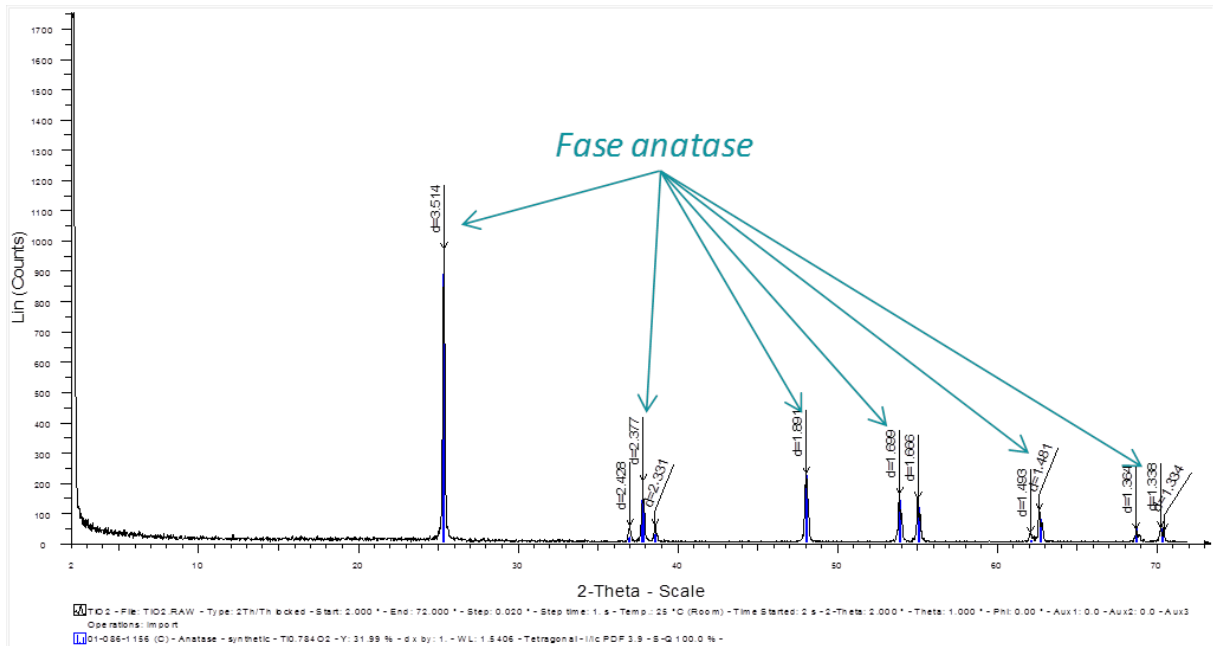
Compostos	% em peso
SiO <sub>2</sub>	0,26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,54
SO <sub>3</sub>	0,14
CaO	0,24
K <sub>2</sub> O	0,54
TiO <sub>2</sub>	98,10

(fonte: IGEO/UFRGS)

Já a caracterização mineralógica do dióxido de titânio foi realizada por Difração de Raios-X (DRX), pelo IGEO/UFRGS, na faixa de intervalo de 2° a 72°, em 2θ, com tamanho de passo de 0,02° e tempo por passo de 1s. Como resultado, tem-se a figura 25, na qual os picos representados indicam a fase anatase.

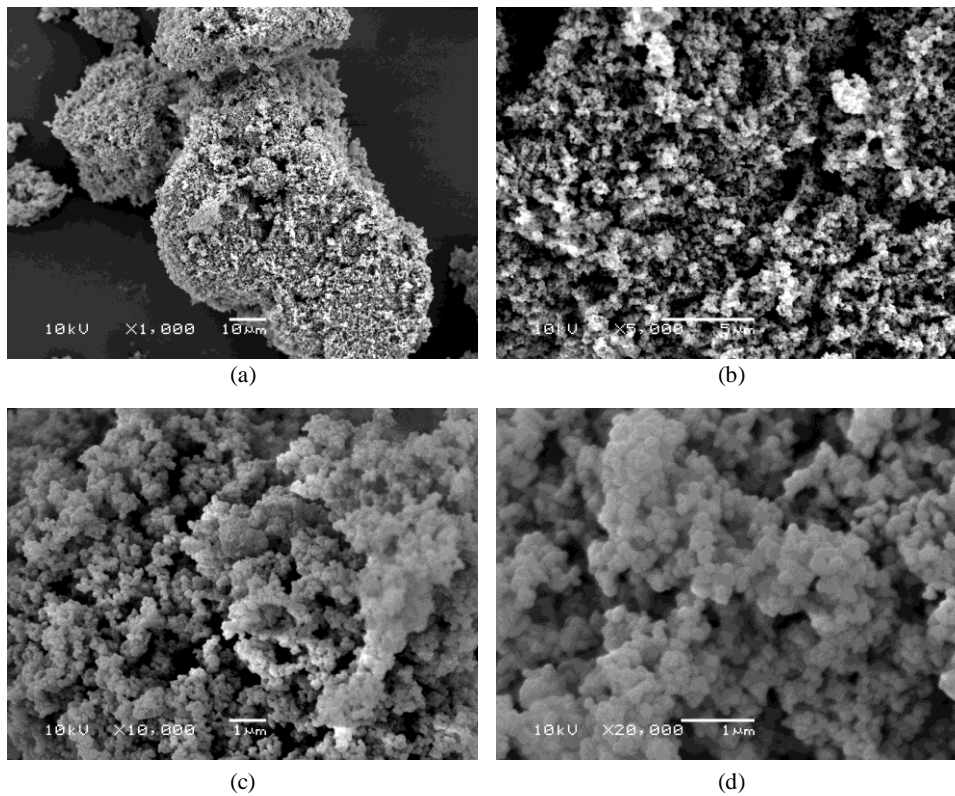
Por fim, é apresentada a caracterização morfológica, caracterizada pela observação e análise microestrutural do material a partir de imagens de alta resolução. As figuras 26a, 26b, 26c e 26d ilustram diferentes magnificações para uma amostra de dióxido de titânio em pó, obtidas por meio do microscópio eletrônico de varredura JSM 6060 (tensão de aceleração: 10 kV) do Centro de Microscopia e Microanálise (CMM) desta Universidade.

Figura 25 – Composição mineralógica do dióxido de titânio por DRX



(fonte: IGEO/UFRGS)

Figura 26 – Análise microestrutural por imagem do dióxido de titânio obtidos com microscópio eletrônico de varredura por elétrons secundários: (a) x1000; (b) x5000; (c) x10000 e (d) x20000.



(fonte: CMM/UFRGS)

#### 4.2.1.4 Água

A água empregada na confecção das argamassas foi a disponível para abastecimento local, fornecido pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) de Porto Alegre.

#### 4.2.1.5 Aditivo

O presente trabalho segue uma das sugestões de Austria (2015), que indica o uso de aditivo superplastificante para tornar a dispersão mais homogênea nas misturas de argamassa. Complementarmente, Folli e Macphee (2014) apontam a capacidade de dispersão do  $\text{TiO}_2$  em matrizes de cimento como um dos focos de pesquisa a ser explorado em novos trabalhos.

Desta forma, adicionou-se às misturas um aditivo superplastificante líquido à base de éter policarboxílico. De acordo com o fabricante, o produto apresenta densidade de 1,067 a 1,107  $\text{g/cm}^3$ , e sua dosagem deve variar entre 0,2 e 1,0% da massa de cimento da mistura.

### 4.2.2 Confecção das argamassas

Primeiramente, foram produzidas as amostras de argamassa, caracterizadas por placas de dimensões 8 cm x 8 cm x 2 cm, para os quatro teores de  $\text{TiO}_2$  avaliados. Os estudos envolvendo a aplicação de coberturas de pasta e argamassa contendo  $\text{TiO}_2$  fizeram uso de parte destas amostras como substrato.

#### 4.2.2.1 Moldagem das amostras de argamassa

Foram produzidas quatro argamassas de traço 1:3 (cimento e areia), correspondentes aos respectivos teores de dióxido de titânio adicionados: 0% (referência), 5%, 10% e 15%, em relação à massa de cimento. Às argamassas foi estabelecido o índice de consistência fixo de  $25 \pm 1$  cm. Para todas as misturas, foram utilizados materiais de mesmo lote.

O proporcionamento dos materiais foi realizado em balança com precisão de 0,1 g. As argamassas foram preparadas em argamassadeira universal com turbilhonador da marca Betomac, modelo MT-40, com capacidade para 40 litros e rotação de 50 rpm, disponível no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Primeiramente, foi realizada a produção da argamassa de referência (0%  $\text{TiO}_2$ ), na qual adicionou-se aditivo superplastificante na quantidade de 0,2% da massa de cimento da

mistura, conforme dosagem mínima recomendada pelo fabricante. A partir disso, foi adicionada água até atingir-se a consistência estabelecida ( $25 \pm 1$  cm), verificada na mesa de consistência conforme a NBR 13276 (ABNT, 2005).

Às demais misturas (5%, 10% e 15%  $\text{TiO}_2$ ), foi adicionada a mesma quantidade de água empregada na argamassa 0%, como forma de permitir a mesma relação água/cimento em todos os casos. O índice de consistência de  $25 \pm 1$  cm foi atingido pela dosagem do aditivo superplastificante e verificado conforme a NBR 13276 (ABNT, 2005).

A tabela 7 apresenta o proporcionamento dos materiais empregados, segundo as argamassas produzidas, enquanto que a tabela 8 exibe as condições ambientais nas datas de moldagem.

Tabela 7 – Argamassas: proporcionamento de materiais

Argamassa	Traço em massa		Quantidade (kg)				aditivo (g)	Propriedades		consumo cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
	c	a	cimento	areia	$\text{TiO}_2$	água		a/c	consistência (cm)	
0%	1,00	3,00	7,00	21,00	-	3,34	14,00	0,48	25,00	223
5%	1,00	3,00	7,00	21,00	0,35	3,34	8,00	0,48	26,00	223
10%	1,00	3,00	7,00	21,00	0,70	3,34	6,00	0,48	25,20	223
15%	1,00	3,00	7,00	21,00	1,05	3,34	9,00	0,48	24,80	223

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 8 – Condições ambientais de moldagem

Argamassa	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Umidade Relativa (%)
0%	$28 \pm 1$	69,00
5%	$25 \pm 1$	64,00
10%	$27 \pm 1$	67,00
15%	$25 \pm 1$	61,00

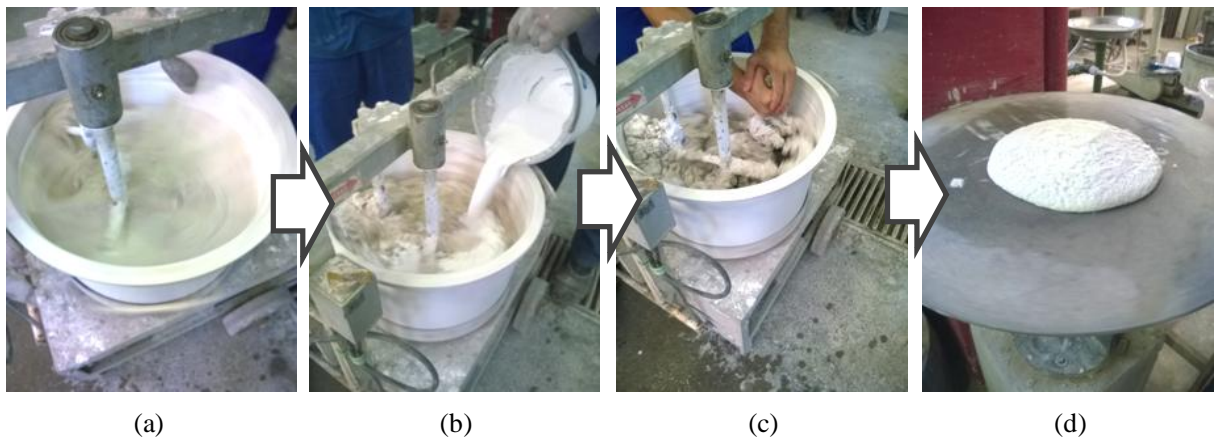
(fonte: INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2015)

Nas argamassas acrescidas de  $\text{TiO}_2$ , este foi disperso manualmente junto à água de amassamento das misturas, imediatamente antes de adicioná-la à argamassadeira. A figura 27 apresenta as etapas de produção das argamassas.

Para cada argamassa produzida, foram moldadas 48 placas (8 cm x 8 cm x 2 cm) em conjuntos compostos por fôrma metálica e fundo e divisórias em madeira, tal como apresentado na figura 28. O adensamento das placas foi realizado por mesa vibratória.



Figura 27 – Preparação das argamassas: (a) mistura cimento e areia; (b) adição da água de amassamento; (c) mistura dos materiais e (d) realização do ensaio de consistência.



(fonte: fotos do autor)

Após a moldagem, as placas ficaram cobertas por saco plástico por 24 horas em ambiente de laboratório e, depois de desformadas, permaneceram em cura imersa de água com cal por 28 dias. Ao fim deste período, as amostras foram levadas à câmara climatizada ( $T: 23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $UR: 60 \pm 5\%$ ), onde permaneceram até a realização dos procedimentos de manchamento.

Figura 28 – Fôrmas utilizadas para moldagem das amostras de argamassa



(fonte: foto do autor)

#### 4.2.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Simultaneamente à confecção das placas de argamassa, foi realizada a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido.

Assim, para cada mistura foram moldados 12 prismas de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm (figura 29), conforme os procedimentos recomendados pela NBR 13279 (ABNT, 2005).

Figura 29 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos



(fonte: foto do autor)

#### 4.2.2.3 Aplicação das coberturas

Foram produzidas três misturas de pasta e outras três de argamassa, empregando-se, para ambas, 5%, 10% e 15% de  $\text{TiO}_2$  como adição. Cada mistura produzida foi aplicada sobre quatro placas de argamassa (amostras excedentes à produção descrita no item 4.2.2.1).

O proporcionamento dos materiais foi realizado em balança com precisão de 0,1 g. As argamassas e coberturas foram preparadas em argamassadeira eletromecânica automática da marca Solocap, com capacidade para 5 litros de mistura e movimento planetário em duas velocidades (baixa e alta), disponível no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A dosagem dos materiais foi proporcional às quantidades empregadas na confecção das placas de argamassa (incluindo aditivo), mantendo-se o traço 1:3 e a mesma relação água/cimento. O  $\text{TiO}_2$  empregado nas coberturas foi disperso manualmente junto à água de amassamento das misturas de argamassa e pasta. A tabela 9 apresenta o quantitativo dos materiais utilizados, para as argamassas e pastas produzidas, enquanto que a tabela 10 exhibe as condições ambientais nas datas de produção e aplicação das coberturas.

Tabela 9 – Coberturas: proporcionamento de materiais

Película	Teor	Traço em massa		Quantidade (kg)				aditivo (g)	a/c	consumo cimento (kg/m <sup>3</sup> )
		c	a	cimento	areia	TiO <sub>2</sub>	água			
Argamassa	5%	1,00	3,00	0,50	1,50	0,025	0,24	0,58	0,48	223
	10%	1,00	3,00	0,50	1,50	0,050	0,24	0,44	0,48	223
	15%	1,00	3,00	0,50	1,50	0,075	0,24	0,64	0,48	223
Pasta	5%	-	-	1,50	-	0,075	0,72	1,72	0,48	-
	10%	-	-	1,50	-	0,150	0,72	1,30	0,48	-
	15%	-	-	1,50	-	0,225	0,72	1,94	0,48	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 10 – Condições ambientais de moldagem e aplicação

Película	Teor TiO <sub>2</sub>	T (°C)	Umidade Relativa (%)
Argamassa	5%	21 ± 1	57,0
	10%		
	15%		
Pasta	5%	17 ± 1	69,0
	10%		
	15%		

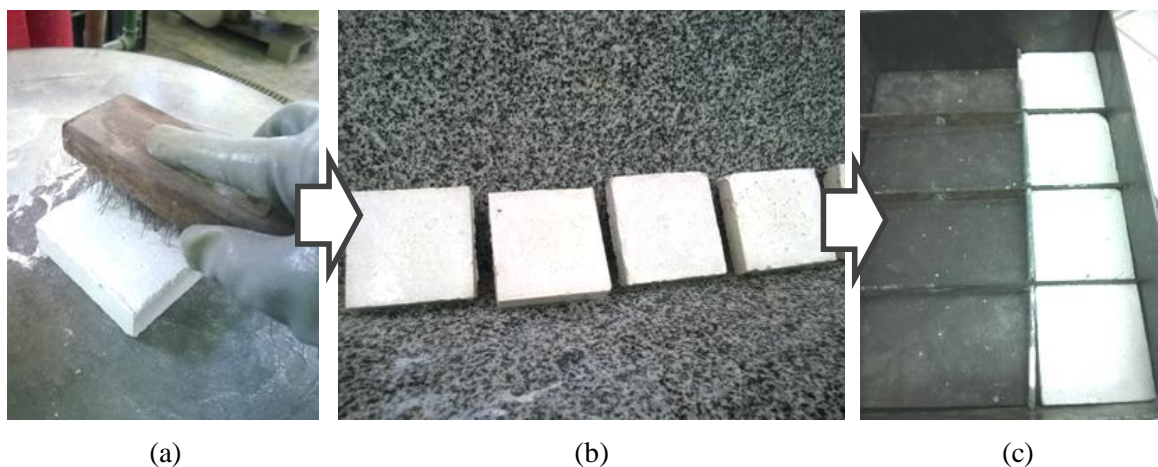
(fonte: adaptado de INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2015)

As placas de argamassa utilizadas como substrato receberam, previamente ao uso, tratamento superficial de escovação (figura 30a) – por escova de cerdas de aço, e posterior lavagem em água corrente. A seguir, permaneceram em ambiente de laboratório para secagem, por 24 horas (figura 30b).

As amostras foram então dispostas sobre o fundo em madeira das fôrmas metálicas, juntamente às divisórias de madeira, estas as quais apresentando altura de 2,5 cm (figura 19c). Uma vez que a espessura média das placas é de 2,0 cm, as coberturas a serem aplicadas teriam, desta forma, a sua espessura em 5 mm.

Assim, procedeu-se à produção das argamassas e pastas na argamassadeira e, logo, à sua aplicação sobre os substratos de argamassa com uma colher plástica. Na sequência, realizou-se o adensamento dos conjuntos em mesa vibratória, por 30 segundos, e o acabamento final das superfícies, rasando-as com uma espátula plástica.

Figura 30 – Preparação das amostras como substrato:  
(a) escovação; (b) secagem, após lavagem e (c) colocação junto às fôrmas



(fonte: fotos do autor)

Após a aplicação das coberturas sobre as placas, estas ficaram cobertas por saco plástico por 24 horas em ambiente de laboratório e, então, levadas à câmara climatizada ( $T: 23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $UR: 60 \pm 5\%$ ), onde permaneceram por 7 dias. A seguir, foram submetidas aos processos de manchamento.

### 4.2.3 Ensaios realizados

Realizaram-se ensaios para caracterização das argamassas produzidas no estado fresco e no estado endurecido. Em relação ao primeiro, foram executados:

- a) índice de consistência (NBR 13276:2002);
- b) densidade de massa (NBR 13278:2005);
- c) teor de ar incorporado (NM 47:2002).

Já para o estado endurecido, foram realizados os ensaios que seguem:

- a) resistência à compressão, aos 28 dias de idade (NBR 13279:2005);
- b) resistência à tração na flexão, aos 28 dias de idade (NBR 13279:2005);
- c) absorção de água por capilaridade (NBR 9779:2012);
- d) densidade de massa aparente (NBR 13280:2005);
- e) módulo de elasticidade dinâmico (NBR 15630:2008);

## 4.2.4 Manchamentos

As amostras de argamassa foram manchadas com duas sujidades: Rodamina B e lodo de cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto. A seguir, ambas serão apresentadas em maiores detalhes, assim como seus respectivos processos de manchamento.

### 4.2.4.1 Rodamina B

Trata-se de um corante orgânico de coloração vermelho forte, comumente empregado pela indústria têxtil. Em normas italianas<sup>8</sup>, é adotado para determinação da atividade fotocatalítica de ligantes hidráulicos (FOLLI et al., 2012).

O Rodamina B é pouco sensível à alcalinidade de materiais cimentícios e bastante solúvel em água, podendo espalhar-se com facilidade e de maneira uniforme sobre superfícies. Desta forma, tem sido amplamente utilizado como manchamento em testes de autolimpeza de produtos cimentícios, conforme observado nos trabalhos de PICADA Project (2006), Ruot et al. (2009), Folli (2010), Folli et al. (2012), Krishnan et al. (2013), Diamanti et al. (2013), entre outros.

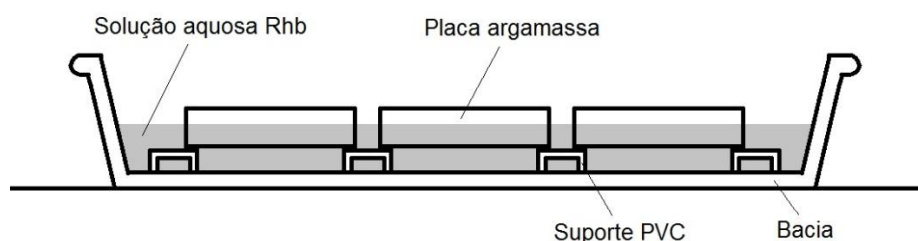
Para o manchamento do presente trabalho, as amostras de argamassa foram imersas em solução aquosa de Rodamina B, à concentração de 0,5 g/L. A escolha pelo manchamento por imersão permite que as amostras sejam expostas à solução aquosa de maneira uniforme em toda a extensão de suas superfícies (DIAMANTI et al., 2013).

Primeiramente, as placas foram dispostas em bacias plásticas, sobre suportes de PVC, com uma de suas faces voltadas para baixo. A seguir, procedeu-se à aplicação de Rodamina B, diluído em água manualmente, por meio de um funil metálico, de forma que as placas permanecessem imersas em aproximadamente 1 cm de sua espessura, conforme ilustrado na figura 31. O período de imersão prolongou-se por 24 horas (figura 32) e, após esta etapa, as amostras foram retiradas das bacias e secas naturalmente em ambiente de laboratório, por 48 horas, de onde seguiram para exposição ao ambiente natural.

---

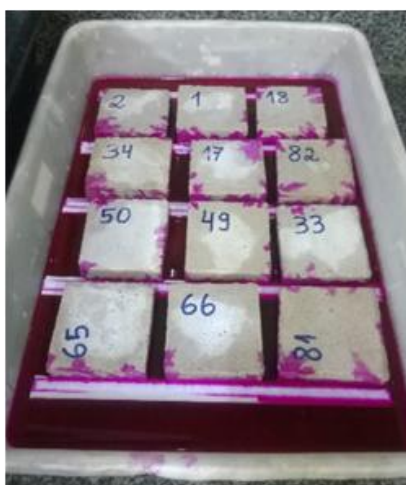
<sup>8</sup> **UNI 11259**: determinazione dell'attività fotocatalitica di leganti idraulici - Metodo della Rodamina B, 2008.

Figura 31 – Imersão em solução aquosa de Rodamina B



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 – Manchamento das amostras na solução aquosa de Rodamina B



(fonte: fotos do autor)

#### 4.2.4.2 Cinzas

A cinza definida como um dos manchamentos do presente trabalho é residuária da queima de lenha de eucalipto. O material é o mesmo utilizado por Vaske (2012), que realizou estudos sobre a sua adição a concretos de cimento Portland.

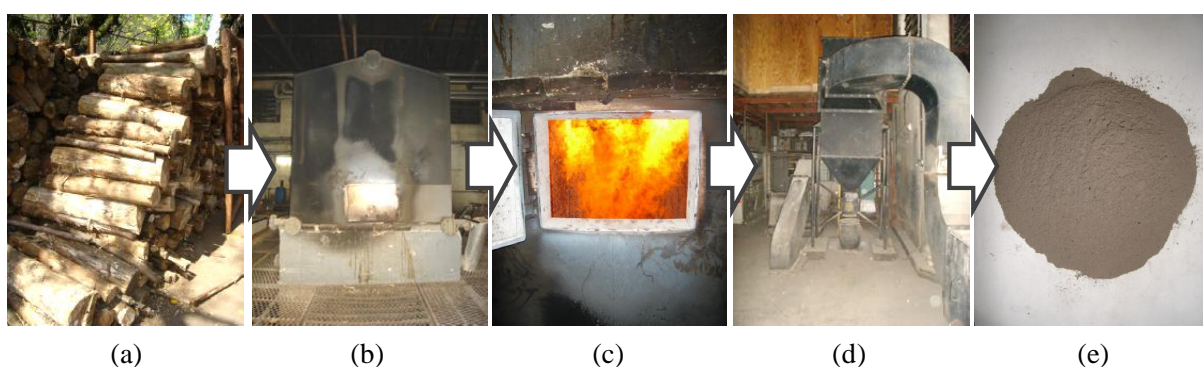
A escolha pelos resíduos de cinza visa simular a ação de particulados de poluição sobre superfícies expostas ao ambiente urbano. De acordo com Vaske (2012), "A combustão de lenha gera milhares de toneladas de cinza, sendo a maior parte deste resíduo descartado sem um mínimo de controle, [...] e parte dispersa na atmosfera poluindo o ar."

O mesmo autor ainda indica que diversas indústrias fazem uso da lenha de eucalipto como fonte de energia: geração de energia elétrica, produção de metais, papéis, celulose, alimentos, bebidas e confecção de artigos têxteis. Assim, não há uma concentração geográfica da geração dos resíduos de cinza, porém uma distribuição em todas as regiões do País.



A cinza utilizada na presente pesquisa, tal como Vaske (2012), é proveniente da captação de particulados da combustão de lenha em toras de eucalipto, por meio de filtro multiciclone em caldeira fumotubular (marca WECO, modelo HL 10/10) do Complexo Hospitalar Santa Casa, na cidade de Porto Alegre. A granulação mais fina das cinzas geradas é suspensa pelos gases da combustão, e, antes de sua dispersão na atmosfera através da chaminé, passa pelo filtro multiciclone, no qual é captada e depositada em baldes metálicos (figura 33).

Figura 33 – Etapas para obtenção das cinzas:  
 (a) lenha de eucalipto em tora; (b) caldeira fumotubular; (c) caldeira em operação;  
 (d) filtro multiciclone e (e) amostra de cinza coletada.



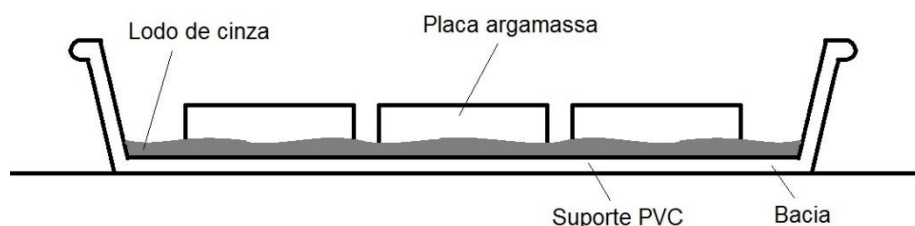
(fonte: adaptado de VASKE, 2012)

Inicialmente, o manchamento por cinza das amostras de argamassa seguiu o mesmo método utilizado para o corante Rodamina B, ou seja, dispersaram-se as cinzas manualmente em água, à concentração de 0,5 g/L, e aplicou-se a solução aquosa formada nas bacias plásticas, com as amostras dispostas sobre suportes de PVC. A imersão perdurou por 24 horas, porém, ao término deste período, verificou-se que as partículas de cinza da solução haviam decantado, não permitindo sua aderência às superfícies das placas de argamassa.

A deposição dos particulados no fundo das bacias promoveu a formação de um lodo de cinza, o qual foi então utilizado para realização dos manchamentos. Optou-se, portanto, pela disposição das amostras diretamente sobre o lodo gerado, tal qual ilustrado na figura 34, pelo período de 24 horas.

A seguir, as placas de argamassa foram retiradas das bacias e secas em ambiente de laboratório, naturalmente, por 72 horas. Após, seguiram para a etapa de exposição ao ambiente urbano.

Figura 34 – Imersão em lodo de cinza



(fonte: elaborado pelo autor)

As características químico-físicas da cinza são apresentadas nas tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Características químicas da cinza (%)

CaO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Cl	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	BaO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZnO	CuO	Br	PF*	pH
48,99	6,11	3,45	3,08	2,88	2,04	2,00	1,92	1,67	1,00	0,65	0,41	0,32	0,15	0,07	0,03	0,02	25,21	12,10

\*Perda ao Fogo

(fonte: VASKE, 2012)

Tabela 12 – Características físicas da cinza

Diâmetro médio	Massa específica	Superfície específica
32,59 µm	2,47 g/cm <sup>3</sup>	10.551 m <sup>2</sup> /kg

(fonte: VASKE, 2012)

#### 4.2.5 Exposição

As placas de argamassa manchadas foram expostas ao ambiente natural urbano da cidade de Porto Alegre, em área da Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC/RS). Neste local, as amostras foram dispostas em quatro suportes metálicos, recebendo incidência da radiação solar ao longo do dia.

Os suportes, desenvolvidos especialmente para o presente trabalho, contemplam três inclinações para disposição das amostras: 0°, 45° e 90°, medidos em relação à horizontal (figura 35). Os ângulos definidos remetem a aplicações práticas de revestimento (pisos, terraços, superfícies inclinadas e fachadas) e às inclinações já utilizadas por Pereira et al. (2009) e Diamanti et al. (2013).



Figura 35 – Suportes metálicos para exposição das amostras de argamassa



(fonte: foto do autor)

Posicionou-se um suporte em cada orientação solar avaliada (norte, sul, leste e oeste), permanecendo nestas condições ao longo de todo o período de exposição, tal como apresentado na figura 36, onde os quatro suportes estão ilustrados. Os quadros 4 e 5 contemplam as amostras de argamassa dispostas nos suportes segundo as orientações solares avaliadas.

Figura 36 – Amostras expostas nos suportes metálicos voltados para:  
(a) norte; (b) sul; (c) leste e (d) oeste.

(a)

(b)

(c)

(d)

(fonte: fotos do autor)

O período de exposição contemplou a estação de inverno no Hemisfério Sul, onde está localizada a cidade de Porto Alegre.

Quadro 4 - Amostras dispostas nos suportes voltados para Sul, Leste e Oeste

		Rodamina B				Cinza			
45°		0%	0%	5%	5%	0%	0%	5%	5%
		10%	10%	15%	15%	10%	10%	15%	15%
90°		0%	0%	5%	5%	0%	0%	5%	5%
		10%	10%	15%	15%	10%	10%	15%	15%

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 5 - Amostras dispostas no suporte voltado para Norte

		Rodamina B				Cinza				
0°		0%	0%	5%	5%	0%	0%	5%	5%	Argamassa
		10%	10%	15%	15%	10%	10%	15%	15%	
45°		0%	0%	5%	5%	0%	0%	5%	5%	Argamassa
		10%	10%	15%	15%	10%	10%	15%	15%	
45°				5%	5%			5%	5%	Película Pasta
		10%	10%	15%	15%	10%	10%	15%	15%	
45°				5%	5%			5%	5%	Película Argamassa
		10%	10%	15%	15%	10%	10%	15%	15%	
90°		0%	0%	5%	5%	0%	0%	5%	5%	Argamassa
		10%	10%	15%	15%	10%	10%	15%	15%	

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.2.6 Análise colorimétrica

Para fins de verificação da degradação dos manchamentos ao longo do período de exposição, as amostras de argamassa foram monitoradas por registro fotográfico e medição da coloração via espectrofotômetro portátil (modelo Konica Minolta CM 2500d). Neste último caso, é possível obter as coordenadas cromáticas da cor medida, conforme o espaço de cor definido pela Comissão Internacional da Iluminação (CIE): o sistema CIELab.

Neste modelo, conforme Passuelo (2003), uma determinada cor é representada por três valores:

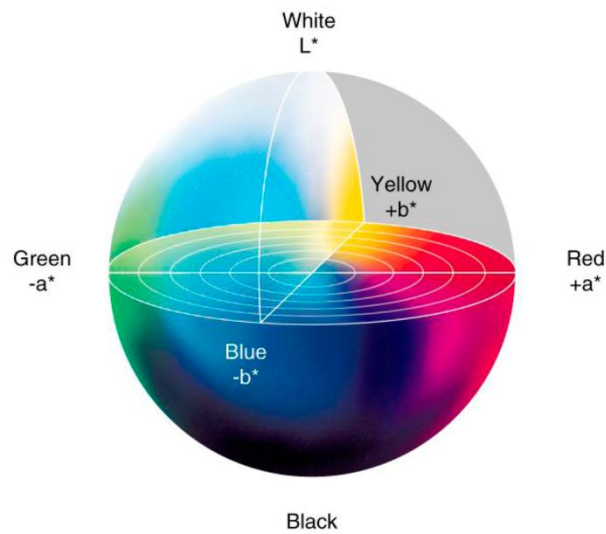
- a) L\*: refletância (ou brilho), variando de 0 (preto) a 100 (branco);

b)  $a^*$  e  $b^*$ : coordenadas cromáticas que indicam a intensidade da cor em um plano bidimensional:

- $a^*$ : verde (-a) a vermelho (+a);
- $b^*$ : azul (-b) a amarelo (+b).

Este sistema pode ser expresso, portanto, como uma esfera sólida, representando o espaço de cor tridimensional, tal qual ilustrado na figura 37.

Figura 37 – Espaço de cor CIELab



(fonte: KRISHNAN et al., 2013)

A variação de cor no tempo,  $\Delta E$ , pode ser medida, portanto, como a distância entre dois pontos correspondentes, respectivamente, à cor no tempo  $t$  e à cor no tempo inicial  $t = 0$  (DIAMANTI et al., 2008). Esta distância pode ser expressa pela equação 7:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

$\Delta E$  = variação da cor no tempo;

$\Delta L^* = L_t^* - L_0^*$ ;

$\Delta a^* = a_t^* - a_0^*$ ;

$$\Delta b^* = b_t^* - b_0^*.$$

O monitoramento não apenas da variação de cor, mas também da refletância ( $L^*$ ) é indicado por Diamanti et al. (2013) tendo em vista a exposição das amostras no ambiente natural urbano. Partículas poluentes presentes na atmosfera das cidades podem aderir-se às superfícies das argamassas, implicando em uma mudança da cor branca para a cinza.

As leituras por espectrofotômetro foram planejadas para as seguintes idades, contadas da data de manchamento: 0, 3, 7, 14, 21, 28, 42, 56, 70 e 84 dias. As coordenadas cromáticas coletadas foram compiladas e armazenadas pelo *software* Cyberchrome OnColor.

Em cada idade, foram lidos cinco pontos por placa, os quais foram padronizados conforme o gabarito de papel apresentada na figura 38, utilizado de forma sobreposta às amostras.

Figura 38 – Gabarito para leituras da coloração nas amostras de argamassa



(fonte: foto do autor)

### 4.3 DADOS GEOGRÁFICOS

A cidade de Porto Alegre, localidade de exposição das amostras do presente estudo, apresenta clima subtropical e tem como coordenadas geográficas:

- a) latitude:  $-30.01^{\circ}59''$ ;
- b) longitude:  $-51^{\circ}13'48''$ .

#### 4.4 DADOS METEOROLÓGICOS

No Anexo C, estão apresentados os dados de precipitação diária, umidade relativa do ar, insolação diária e horários de nascente e poente do Sol, referentes aos períodos de exposição das amostras.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes à caracterização das argamassas produzidas – para os estados fresco e endurecido, o registro fotográfico realizado ao longo do período de exposição das amostras, assim como a análise estatística dos dados colorimétricos obtidos via espectrofotômetro portátil.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS PRODUZIDAS

Os resultados expostos nos itens a seguir remetem a valores médios. Portanto, a tabela 13 apresenta a quantidade de corpos de prova empregados em cada ensaio.

Tabela 13 – Corpos de prova utilizados por ensaio realizado, por argamassa

Ensaio/Argamassa TiO <sub>2</sub>	0%	5%	10%	15%
Resistência à compressão	12	12	12	12
Resistência à tração na flexão	6	6	6	6
Absorção de água por capilaridade	6	6	6	6
Densidade de massa aparente	6	6	6	6
Módulo de elasticidade dinâmico	6	6	6	6

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 5.1.1 Caracterização no estado fresco

Os resultados referentes aos ensaios realizados são apresentados na tabela 14, a partir da qual é possível observar maior tendência para incorporação de ar nas argamassas acrescidas de TiO<sub>2</sub>, na comparação à de referência.

Tabela 14 – Caracterização no estado fresco

Argamassa TiO <sub>2</sub>	Consistência (cm)	$\rho$ médio (kg/m <sup>3</sup> )	Ar incorporado (%)
0%	25,00	2.160	2,30
5%	26,00	2.126	4,20
10%	25,20	2.132	3,20
15%	24,80	2.165	3,60

$\rho$ : densidade de massa

(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.1.2 Caracterização no estado endurecido

A tabela 15 apresenta os resultados de resistência à compressão e resistência à tração na flexão para as argamassas produzidas, realizados aos 28 dias. Observa-se que, apesar de o teor de ar incorporado nas argamassas fotocatalíticas se mostrar superior ao verificado para a argamassa de referência, seus resultados de resistência à compressão e à tração na flexão também se mostraram superiores, sugerindo o preenchimento dos vazios da estrutura pelo TiO<sub>2</sub> (efeito filler) – tal como observado por Austria (2015).

Tabela 15 – Resistência à compressão ( $f_c$ ) e à tração ( $f_{tf}$ ), aos 28 dias

Argamassa TiO <sub>2</sub>	Compressão			Tração		
	$f_c$ média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	$f_{tf}$ média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
0%	37,1	2,6	6,98	5,6	0,2	4,46
5%	45,2	4,3	9,46	5,7	0,3	4,83
10%	40,2	1,9	4,79	6,6	0,6	9,84
15%	41,7	2,8	6,65	6,1	0,3	5,54

DP: Desvio-Padrão | CV: Coef. Variação

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados referentes ao ensaio de absorção de água por capilaridade estão expostos na tabela 16.

Tabela 16 – Coeficiente de capilaridade médio ( $C_c$ ) das argamassas, aos 28 dias

Argamassa $TiO_2$	0%			5%			10%			15%		
	Cc (g/cm <sup>2</sup> )	DP (g/cm <sup>2</sup> )	CV (%)	Cc (g/cm <sup>2</sup> )	DP (g/cm <sup>2</sup> )	CV (%)	Cc (g/cm <sup>2</sup> )	DP (g/cm <sup>2</sup> )	CV (%)	Cc (g/cm <sup>2</sup> )	DP (g/cm <sup>2</sup> )	CV (%)
3h	0,37	0,02	6,13	0,39	0,02	6,23	0,34	0,05	15,23	0,35	0,03	8,04
6h	0,50	0,02	4,24	0,54	0,03	6,04	0,47	0,06	12,51	0,50	0,03	5,67
24h	0,97	0,02	2,48	1,05	0,06	5,93	0,97	0,05	5,32	1,00	0,03	3,45
48h	1,19	0,02	2,00	1,29	0,08	5,87	1,19	0,05	4,16	1,24	0,04	2,98
72h	1,35	0,03	1,88	1,46	0,09	6,34	1,36	0,05	3,83	1,41	0,05	3,30

DP: Desvio-Padrão | CV: Coef. Variação

(fonte: elaborado pelo autor)

Na tabela 17, estão apresentados os dados referentes ao ensaio de densidade de massa aparente.

Tabela 17 – Densidade de massa aparente das argamassas ( $\rho$ ), aos 28 dias

Argamassa $TiO_2$	$\rho$ médio (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
0%	2.076	15	0,73
5%	2.160	20	0,91
10%	2.122	12	0,58
15%	2.149	9	0,40

DP: Desvio-Padrão | CV: Coef. Variação

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados para o módulo de elasticidade dinâmico são expressos na tabela 18.

Tabela 18 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas ( $E_d$ ), aos 28 dias

Argamassa $TiO_2$	$E_d$ médio (GPa)	DP (GPa)	CV (%)
0%	41,89	0,70	1,68
5%	40,00	0,59	1,47
10%	38,52	0,79	2,06
15%	39,41	1,20	3,05

DP: Desvio-Padrão | CV: Coef. Variação

(fonte: elaborado pelo autor)

Os valores verificados em cada ensaio realizado, por corpo de prova moldado, são apresentados no Anexo B.



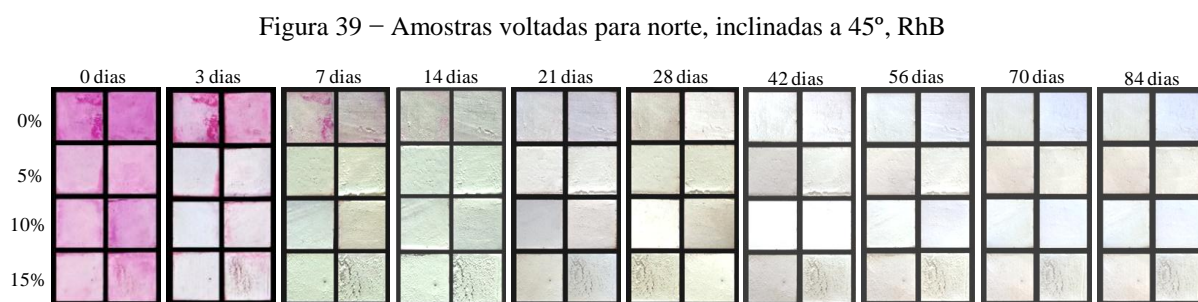
## 5.2 REGISTRO FOTOGRÁFICO

A seguir, é apresentado o registro fotográfico realizado ao longo do período de exposição das amostras de argamassa, conforme seus respectivos manchamentos (Rodamina B ou cinza), teor de  $\text{TiO}_2$  empregado e idade de exposição. Deve-se ressaltar que as fotos foram realizadas no local de exposição das amostras, ao abrigo do sol, sendo afetadas pelas condições de iluminação natural da data em que foram registradas.

### 5.2.1 Rodamina B

Na figura 39, são ilustradas as amostras voltadas para orientação solar norte, inclinadas a  $45^\circ$ . Observa-se que, aos 3 dias de idade, a descoloração do manchamento ocorre de forma bastante evidente para as argamassas fotocatalíticas (5%, 10% e 15%), enquanto que a argamassa de referência apresenta a coloração vermelha do corante aplicado.

Cabe ressaltar que, do início da exposição até esta idade, não foram registradas precipitações pluviométricas (conforme anexo C), indicando que a descoloração observada não é oriunda de uma possível ação de lavagem da água da chuva sobre o corante aplicado. Aos 7 dias, a argamassa 0% ainda indica resquícios do manchamento, o qual tende a ser suprimido nos registros das idades subsequentes. A partir de 14 dias, tais amostras apresentam clareamento de suas superfícies.

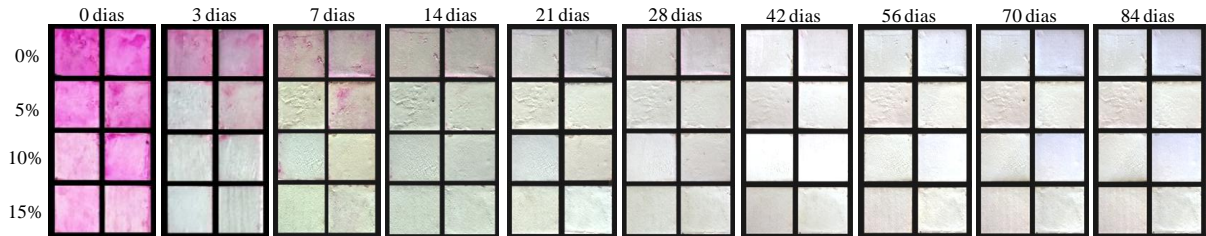


fonte: fotos do autor)

A seguir, a figura 40 apresenta as placas para a orientação norte, porém à  $90^\circ$  de inclinação (vertical). Aos 3 dias de exposição, verifica-se que as argamassas acrescidas de  $\text{TiO}_2$  apresentam, notoriamente, descoloração do corante utilizado, ainda que, para o teor de 5%, existam resquícios de coloração vermelha.

Para a mesma idade, ainda percebe-se a presença da solução de Rodamina B na superfície da argamassa de referência. Comportamento semelhante é observado aos 7 dias de exposição. A partir de 14 dias, todas as amostras apresentam branqueamento superficial.

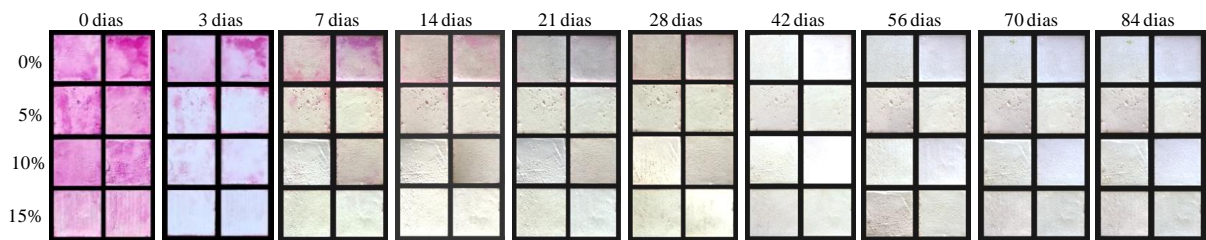
Figura 40 – Amostras voltadas para norte, inclinadas a 90°, RhB



(fonte: fotos do autor)

As amostras voltadas para leste, à 45° em relação à horizontal, estão representadas na figura 41. Para as idades de 3, 7 e 14 dias de exposição, verifica-se a coloração vermelha de forma mais evidente nas amostras que não contêm TiO<sub>2</sub>, enquanto que as demais indicam a descoloração do manchamento aplicado – apesar da presença de tons avermelhados na argamassa 5%. A partir do registro fotográfico de 21 dias, todas as amostras tendem ao clareamento, não sendo possível a visualização de coloração vermelha.

Figura 41 – Amostras voltadas para leste, inclinadas a 45°, RhB

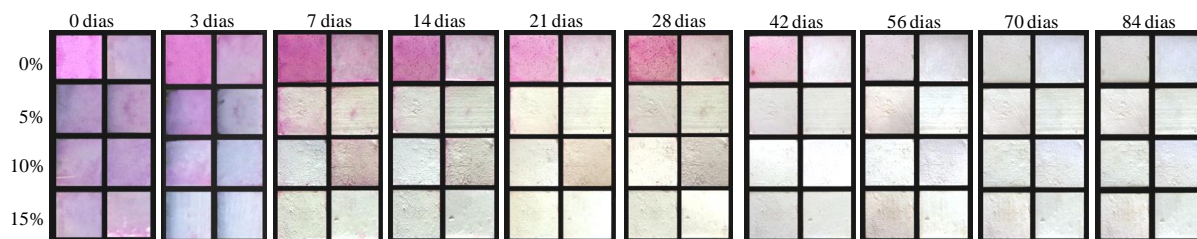


(fonte: fotos do autor)

Para a inclinação 90° (orientação leste), observa-se a figura 42. Com base nesta, notam-se tons avermelhados em todas as amostras expostas aos 3 dias de exposição. Para 7 dias, a argamassa 15% apresenta maior descoloração em relação às demais.

Nos registros de 14 a 42 dias, é possível visualizar a coloração vermelha na argamassa de referência, em contraponto ao branqueamento das argamassas fotocatalíticas. A partir de 56 dias, não se observam tons avermelhados nas superfícies registradas.

Figura 42 – Amostras voltadas para leste, inclinadas a 90°, RhB

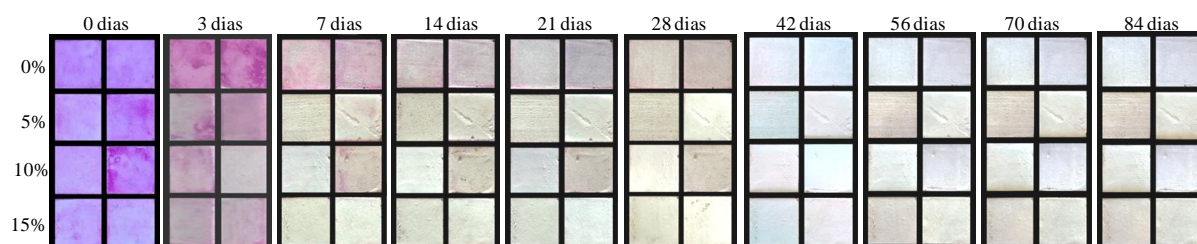


(fonte: fotos do autor)

A figura 43 apresenta as placas de argamassa dispostas nos suportes voltados para orientação solar sul, à inclinação de 45°. Aos 3 dias de exposição, verifica-se a coloração do corante aplicado em todas as amostras.

Até o registro referente a 28 dias, a coloração vermelha é observada de forma mais evidente para a argamassa 0%. Entre 42 e 84 dias, todas as amostras expostas apresentam branqueamento de suas superfícies.

Figura 43 – Amostras voltadas para sul, inclinadas a 45°, RhB

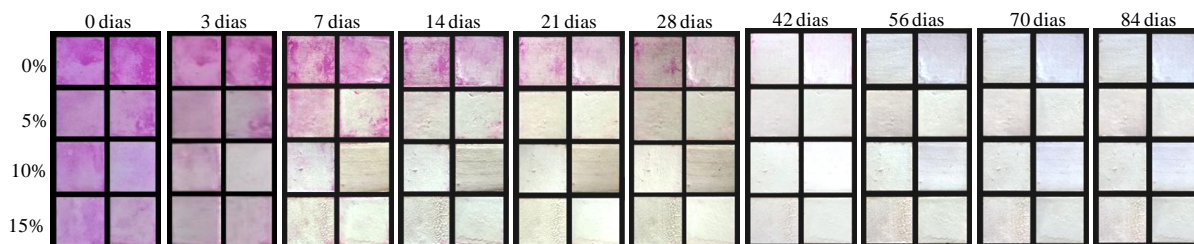


(fonte: fotos do autor)

Já a figura 44 ilustra a mesma orientação, à 90° de inclinação. Nota-se a coloração da solução aplicada (Rodamina B) na superfície de todas as amostras expostas, aos 3 dias de idade. Para 7 dias de exposição, são observados tons avermelhados – de forma evidente, a olho nu – nas amostras cujos teores de adição de  $\text{TiO}_2$  são de 0% e 5%.

No registro fotográfico referente ao período de 14 a 28 dias, é possível verificar a descoloração do corante utilizado para as argamassas fotocatalíticas, enquanto que a de referência ainda indica resquícios do produto. Entretanto, todas as amostras tendem ao branqueamento no período de 42 a 84 dias.

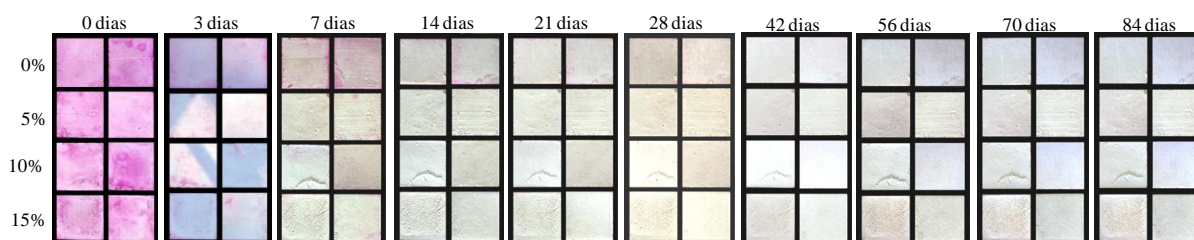
Figura 44 – Amostras voltadas para sul, inclinadas a 90°, RhB



(fonte: fotos do autor)

As amostras dispostas na orientação oeste, à 45°, são apresentadas na figura 45. Para as idades de 3 e 7 dias, observa-se, de maneira mais evidente, a coloração vermelha argamassa 0%, enquanto que aquelas acrescidas de  $\text{TiO}_2$  apresentam coloração mais clara. Entretanto, a partir dos 14 dias, tanto a argamassa de referência quanto as fotocatalíticas manifestam a descoloração do corante aplicado às suas superfícies.

Figura 45 – Amostras voltadas para oeste, inclinadas a 45°, RhB

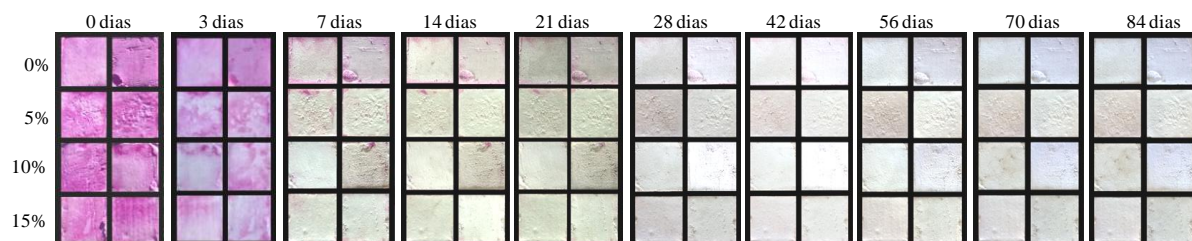


(fonte: fotos do autor)

Já as amostras dispostas à 90° de inclinação (orientação oeste), constam na figura 46. No registro fotográfico referente a 3 dias de exposição, verifica-se a coloração avermelhada do manchamento aplicado à superfície de todas as amostras. No entanto, aos 7 dias já é possível observar a descoloração do corante, o que se mantém até o registro final de 84 dias.



Figura 46 – Amostras voltadas para oeste, inclinadas a 90°, RhB

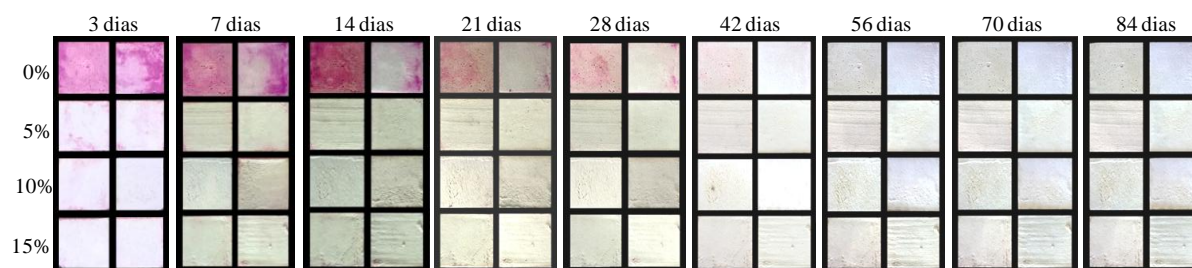


(fonte: fotos do autor)

As placas expostas à 0° de inclinação (horizontal) são observadas na figura 47. Aos 3 dias de exposição, é possível observar a coloração vermelha do corante aplicado de forma mais evidente apenas para a argamassa de referência. A partir dos 28 dias, as amostras sem adição de  $\text{TiO}_2$  tendem à descoloração. Para as argamassas fotocatalíticas, a descoloração da solução de Rodamina B já é evidente aos 3 dias, mantendo o branqueamento até a idade final de 84 dias.

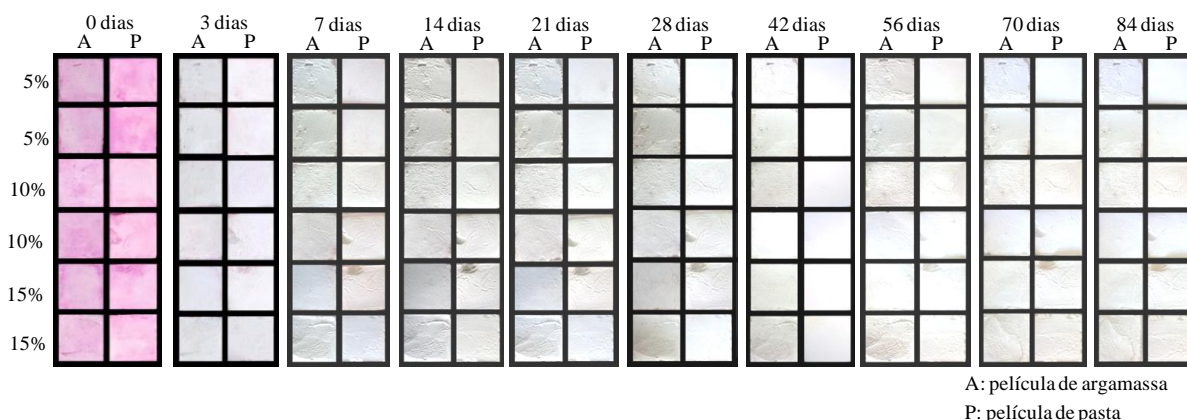
Por fim, a figura 48 expressa as coberturas de pasta e argamassa, dispostas voltadas para norte à 45°. A descoloração do manchamento empregado ocorre de forma bastante evidente já aos 3 dias de exposição – até esta data, ressalta-se, não foram verificados eventos de chuva, os quais poderiam justificar uma ação de lavagem sobre o manchamento aplicado. Nas idades subsequentes, o branqueamento das superfícies se mantém praticamente constante.

Figura 47 – Amostras expostas à 0° (horizontal), RhB



(fonte: fotos do autor)

Figura 48 – Coberturas de pasta ou argamassa, voltadas para norte à 45°, RhB



(fonte: fotos do autor)

Apesar da evidente descoloração das amostras ao longo da exposição, tal comportamento pode ser aferido e melhor discutido a partir dos dados colorimétricos coletados nas idades de leitura, os quais foram submetidos a um tratamento estatístico por análise de variância, a apresentar-se no item 5.3.

### 5.2.1 Cinza

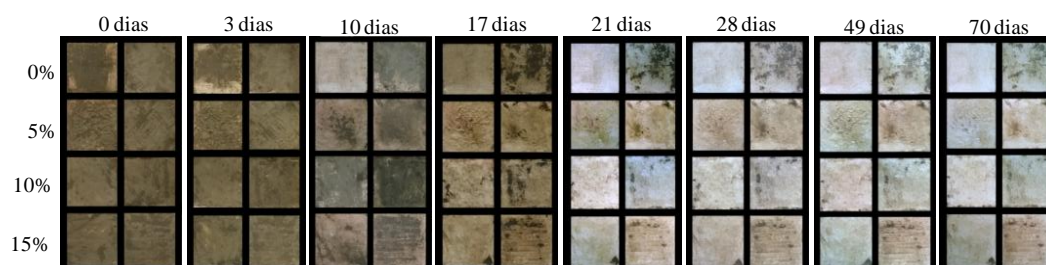
Na figura 49, está ilustrado o registro fotográfico para as amostras expostas voltadas ao norte, à inclinação de 45°. Aos 3 dias de exposição, não há indicações de remoção do lodo de cinzas aplicado sobre as amostras. Para as idades de 10 e 17 dias, entretanto, observa-se um branqueamento das superfícies, ainda que de forma sutil. A partir dos 21 dias, é possível visualizar uma maior remoção do manchamento, o que se mantém a um nível constante entre 28 e 70 dias, conforme registro fotográfico.

Pode-se considerar que este comportamento se manifestou de forma uniforme para todas os teores de  $TiO_2$  empregados nas misturas. Ressalta-se que os tons mais escuros verificados aos 17 dias, tanto para este quanto para os demais registros fotográficos, estão relacionados ao fato de que as amostras ainda se encontravam um pouco molhadas no momento do registro, devido às frequentes precipitações pluviométricas ocorridas naquele período de exposição (conforme dados apresentados no Anexo C).

Ainda referente às precipitações, a maior descoloração verificada na idade de 21 dias pode ser creditada à ação de lavagem da água da chuva sobre o manchamento aplicado, dado que o volume precipitado no vigésimo dia de exposição corresponde a quase 83% da precipitação

pluviométrica prevista para todo o mês – tendo como referência a média histórica da cidade de Porto Alegre (PORTO ALEGRE, 2016).

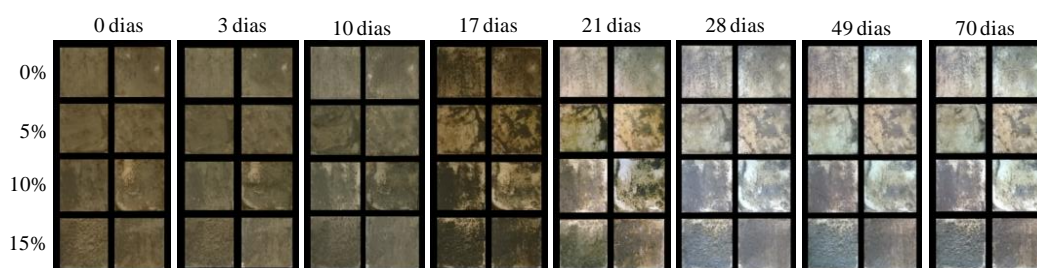
Figura 49 – Amostras voltadas para norte, inclinadas a 45°, cinza



(fonte: fotos do autor)

A figura 50 expõe o registro fotográfico realizado para a inclinação de 90° (orientação norte). Verifica-se, aos 3 dias, que não houve alteração da coloração do manchamento aplicado, em relação à idade inicial. Aos 10 e aos 17 dias, é possível observar leve remoção do lodo de cinzas, para todas as amostras. A partir dos 21 dias, a descoloração pode ser visualizada de maneira mais evidente, especialmente para os teores de 5% e 10% de  $\text{TiO}_2$ , havendo pouca alteração de comportamento até a idade final.

Figura 50 – Amostras voltadas para norte, inclinadas a 90°, cinza



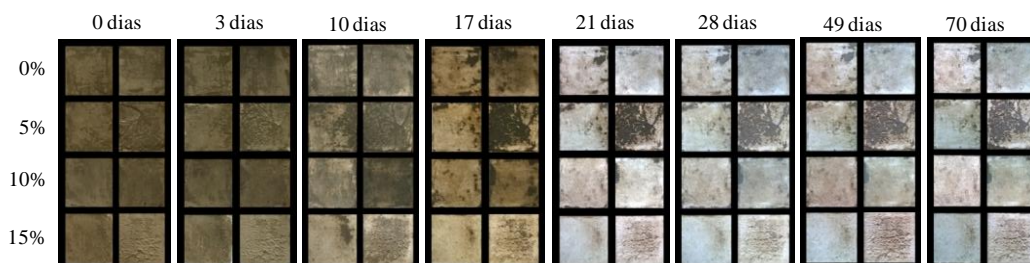
(fonte: fotos do autor)

A figura 51 apresenta o registro fotográfico das amostras voltadas para leste, à inclinação de 45°. Somente a partir dos 10 dias de exposição, torna-se possível observar remoção do lodo de cinzas aplicado, ainda que sutilmente. Tal comportamento é verificado para todos os teores de adição, mantendo-se constante até o registro referente a 17 dias de idade.

No registro de 21 dias de idade, visualiza-se evidente alteração da coloração superficial das amostras – em relação à idade anterior, o que está relacionado à ação de lavagem da água da

chuva. Entretanto, até o último registro fotográfico, não é possível perceber grandes variações na superfície das amostras.

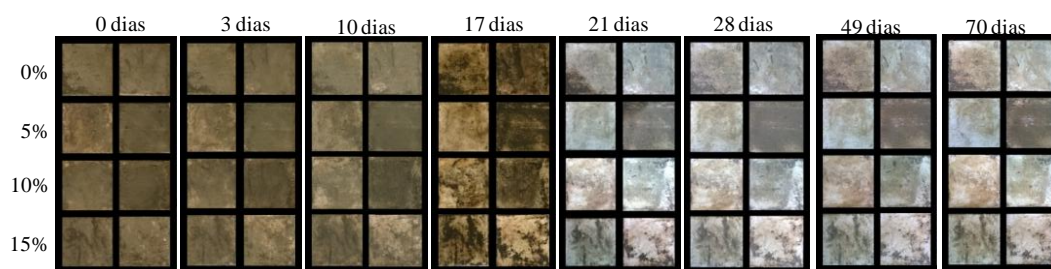
Figura 51 – Amostras voltadas para leste, inclinadas a 45°, cinza



(fonte: fotos do autor)

Na figura 52, expõe-se o registro fotográfico para as amostras dispostas à 90° na orientação leste. Aos 10 e 17 dias, é verificada sutil remoção do lodo de cinzas aplicado, para todas as amostras. A partir do registro de 21 dias, há indicações mais evidentes de descoloração das superfícies das argamassas, o que pode estar relacionada à precipitação pluviométrica de grande magnitude ocorrida aos 20 dias de exposição. No período entre 21 e 70 dias, nota-se pouca variação na remoção superficial do manchamento.

Figura 52 – Amostras voltadas para leste, inclinadas a 90°, cinza



(fonte: fotos do autor)

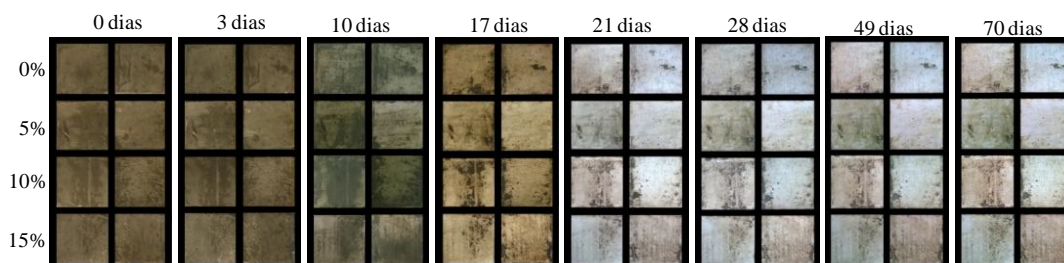
Na figura 53, expõe-se o registro fotográfico realizado para as amostras voltadas para sul, à inclinação de 45°. Tem-se que até os 10 dias de exposição, pouca alteração da coloração superficial das amostras é observada. A partir dos 17 dias, nota-se um branqueamento na superfície das placas, para todos os teores de adição de TiO<sub>2</sub>.

No registro de 21 dias, tal comportamento é visualizado de maneira ainda mais evidente, o que pode estar fortemente associado à precipitação pluviométrica ocorrida aos 20 dias e o seu consequente efeito de lavagem das superfícies. Entretanto, na comparação entre as



observações realizadas nesta idade e aquela de 70 dias, pouca ou nenhuma alteração de coloração é verificada, para todas as amostras.

Figura 53 – Amostras voltadas para sul, inclinadas a 45°, cinza

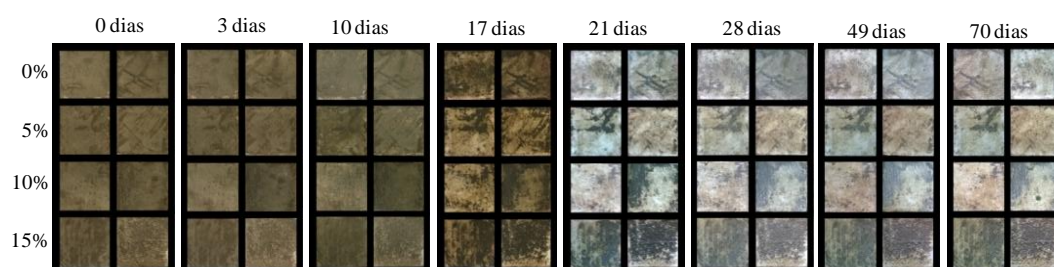


(fonte: fotos do autor)

Na figura 54, tem-se o registro fotográfico das amostras voltadas para sul, à inclinação de 90°. A remoção do lodo de cinzas aplicado é visualizada, de maneira mais evidente, no registro de 17 dias, em relação às leituras iniciais.

No registro subsequente, é possível observar, mais claramente, um branqueamento das superfícies das amostras – à exceção daquelas cujo teor de  $\text{TiO}_2$  é de 15%. O comportamento verificado aos 21 dias não se altera (ou tem pouca alteração) para as idades de leitura que seguem, não sendo possível constatar, visualmente, uma habilidade autolimpante nas amostras de forma evidente.

Figura 54 – Amostras voltadas para sul, inclinadas a 90°, cinza

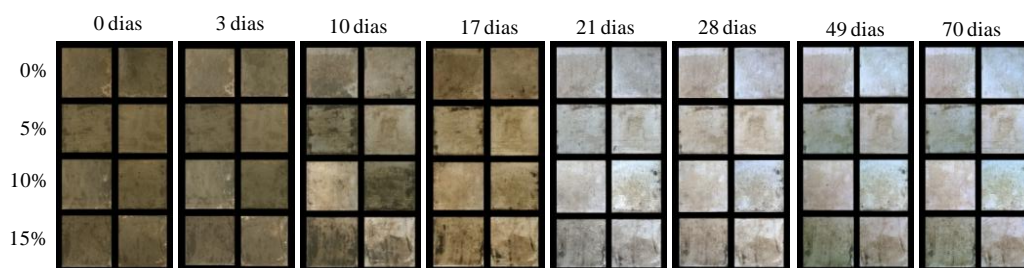


(fonte: fotos do autor)

Conforme a figura 55, verifica-se que as amostras dispostas à leste, inclinadas à 45°, apresentaram leve descoloração superficial aos 10 dias de idade, em relação ao manchamento inicial. Para 17 dias de exposição, a remoção apresenta-se um pouco mais evidente, enquanto que, entre 21 e 70 dias, um branqueamento das superfícies é observado de maneira geral.

A exceção compete às amostras referentes a 15% de  $\text{TiO}_2$ , as quais apresentam fortemente a presença do lodo de cinzas aplicado. Tal fato pode estar relacionado a uma maior rugosidade superficial nestas amostras, contribuindo para a aderência do manchamento. Entretanto, dentre as demais adições propostas de  $\text{TiO}_2$ , tampouco é possível notar uma tendência evidente de comportamento autolimpante.

Figura 55 – Amostras voltadas para oeste, inclinadas a 45°, cinza

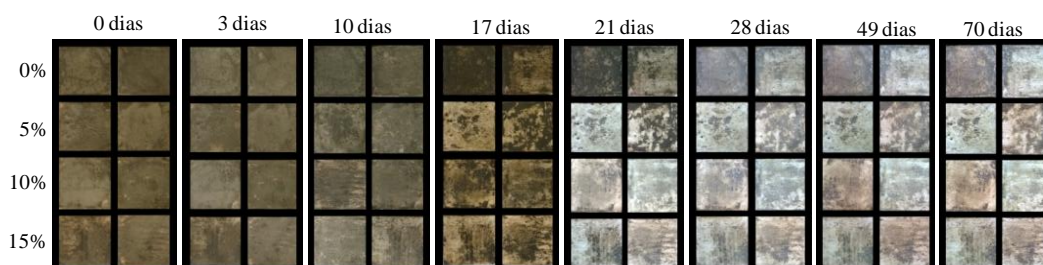


(fonte: fotos do autor)

Tem-se o registro fotográfico das amostras expostas à inclinação de 90° (orientação oeste) na figura 56. Nesta, é possível observar que a descoloração superficial das amostras se inicia, de maneira mais notória, na idade de 17 dias. Apesar disto, a presença do manchamento aplicado é ainda bastante evidente.

Na idade de 21 dias, visualiza-se uma menor quantidade de lodo de cinzas aderida às superfícies, o que pode ser justificado pela ação de lavagem da água da chuva. Não é possível observar, ao longo da exposição, uma tendência clara de comportamento dentre os teores de  $\text{TiO}_2$  empregados como adição.

Figura 56 – Amostras voltadas para oeste, inclinadas a 90°, cinza

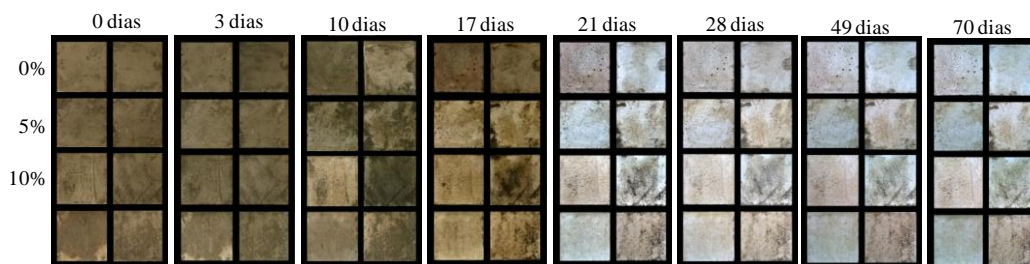


(fonte: fotos do autor)

A figura 57 apresenta o registro fotográfico das amostras expostas à 0° de inclinação. A remoção do lodo de cinzas aplicado é observada de forma gradual entre 10 e 17 dias, para

todas as argamassas moldadas, ocorrendo de maneira mais evidente a partir dos 21 dias. A descoloração superficial observada nas amostras mantém-se até o registro final, referente a 70 dias de exposição.

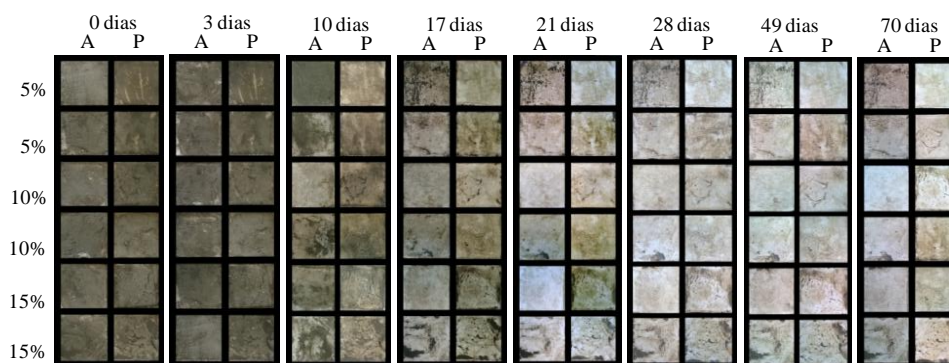
Figura 57 – Amostras expostas à 0° (horizontal), cinza



(fonte: fotos do autor)

Na figura 58, tem-se o registro fotográfico para as coberturas de pasta e argamassa. A primeira manifestação mais evidente de remoção do manchamento é vista aos 10 dias exposição, havendo pouca variação para o registro de 17 dias. A partir de 21 dias, verifica-se maior branqueamento superficial das amostras, porém ainda são observados, notoriamente, resquícios do lodo de cinzas aplicado, para todos os teores de  $TiO_2$  propostos. Tal comportamento se manifesta até o registro final de 70 dias.

Figura 58 – Coberturas de pasta ou argamassa, voltadas para norte à 45°, cinza



A: película de argamassa  
P: película de pasta

(fonte: fotos do autor)

Na comparação entre os manchamentos aplicados, verifica-se que a descoloração das amostras ocorreu de forma mais evidente naquelas manchadas com Rodamina B, as quais apresentaram, de maneira geral, maior branqueamento superficial e maior brilho ao longo de todo o período de exposição. Para aquelas em que foram aplicadas o lodo de cinza, observou-

se maior remoção do manchamento principalmente após os eventos de chuva de grande magnitude, tal como verificado ao vigésimo dia de exposição. No item que segue (5.3), o comportamento das amostras ao longo da exposição é abordado de forma mais apropriada, estando fundamentada em dados estatísticos e associada à bibliografia consultada.

### 5.3 DADOS COLORIMÉTRICOS

Para cada idade de leitura, tomou-se a média aritmética das coordenadas cromáticas  $L^*a^*b^*$  dos cinco pontos de leitura por amostra, obtendo-se, a partir disso, os dados de refletância ( $L^*$ ) e variação de cor ( $\Delta E$ ) – este último calculado conforme a equação 7, item 4.2.6. Os valores obtidos estão expostos no Anexo D e têm como referência inicial as amostras manchadas (tempo  $t = 0$ ), indicando, portanto, a degradação de sua coloração ao longo do tempo.

A seguir, tais dados receberam tratamento estatístico por análise de variância (ANOVA), utilizando-se o *software* Statística 7, a um nível de confiança de 95%. Complementarmente, analisou-se o efeito dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta (isoladamente ou associado a outros) e foi realizada a comparação múltipla de médias pelo teste de Duncan.

A fim de proporcionar uma análise estatística mais adequada para os dados, optou-se por agrupá-los segundo três abordagens distintas:

- a) análise geral, a qual contempla os seguintes fatores e níveis:
  - idade de exposição: conforme manchamento;
  - orientação solar: norte, leste, sul e oeste;
  - inclinação: 45° e 90°;
  - teor de  $TiO_2$ : 0%, 5%, 10% e 15%.
- b) análise de inclinação, para as orientações norte, leste, sul e oeste (separadamente):
  - idade de exposição: conforme manchamento;
  - inclinação: 0°, 45° e 90°;
  - teor de  $TiO_2$ : 0%, 5%, 10% e 15%.
- c) análise dos métodos de aplicação do  $TiO_2$ :
  - idade de exposição: conforme manchamento;
  - teor de  $TiO_2$ : 5%, 10% e 15%;

- método de aplicação: incorporado às argamassas, aplicação como cobertura de pasta e aplicação sob a forma de cobertura de argamassa.

Assim, foram geradas três análises estatísticas distintas e independentes entre si – para cada manchamento aplicado, apresentadas a seguir.

### 5.3.1 Análise geral – RhB

Inicialmente, apresenta-se o resumo do tratamento estatístico realizado por análise de variância para a variação de cor ( $\Delta E$ ), conforme tabela 19.

É possível verificar que todos os fatores controláveis propostos exerceram influência significativa sobre esta variável de resposta. Em relação às interações entre tais fatores, a única exceção é referente à interação de quarta ordem, que não se apresentou estatisticamente significativa.

Tabela 19 – Análise de variância geral ( $\Delta E$ ), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
{1}Idade	9.982,55	8,00	1.247,82	223,97	0,00%	S
{2}Orientação	758,28	3,00	252,76	45,37	0,00%	S
{3}Inclinação	1.130,63	1,00	1.130,63	202,94	0,00%	S
{4}Teor	6.037,55	3,00	2.012,52	361,23	0,00%	S
Idade*Orientação	912,13	24,00	38,01	6,82	0,00%	S
Idade*Inclinação	1.234,11	8,00	154,26	27,69	0,00%	S
Orientação*Inclinação	225,20	3,00	75,07	13,47	0,00%	S
Idade*Teor	2.660,01	24,00	110,83	19,89	0,00%	S
Orientação*Teor	842,93	9,00	93,66	16,81	0,00%	S
Inclinação*Teor	423,09	3,00	141,03	25,31	0,00%	S
Idade*Orientação*Inclinação	335,28	24,00	13,97	2,51	0,02%	S
Idade*Orientação*Teor	559,38	72,00	7,77	1,39	3,03%	S
Idade*Inclinação*Teor	303,54	24,00	12,65	2,27	0,08%	S
Orientação*Inclinação*Teor	322,07	9,00	35,79	6,42	0,00%	S
1*2*3*4	218,42	72,00	3,03	0,54	99,87%	NS
Erro	1.604,55	288,00	5,57	-	-	-

SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG.: significância

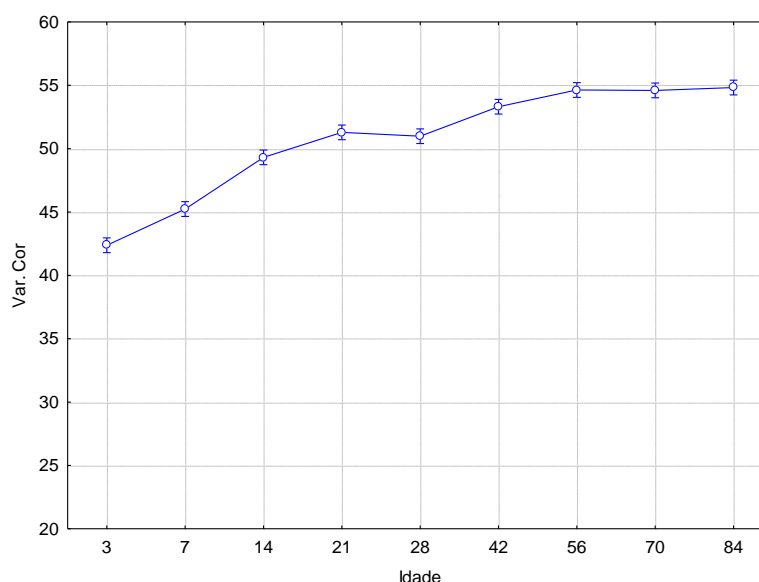
(fonte: elaborado pelo autor)

Tendo em vista o efeito isolado do fator idade de exposição (figura 59), é possível observar que, em geral, a variação de cor aumenta com o avanço das idades – salvo a pequena redução verificada entre 21 e 28 dias. O mesmo comportamento foi verificado por Diamanti et al. (2008), no qual amostras de argamassa foram expostas por 70 dias ao ambiente natural.

Neste ponto, verificou-se que a maior parte dos trabalhos encontrados submeteram suas amostras fotocatalíticas à radiação UV produzida artificialmente (lâmpadas), em ambiente de laboratório. Entretanto, tem-se que a radiação solar é muito mais intensa que as simulações em laboratório, além de abranger outros comprimentos de onda que, mesmo sutilmente, podem colaborar com a atividade fotocatalítica – como a luz visível (GRIMM, 1999; PEREIRA et al., 2009; HÜSKEN et al., 2009).

Verifica-se ainda que a maior parte da alteração de cor observada (em torno de 71,5%) se dá no período entre 3 e 21 dias, sendo o restante referente ao intervalo de 21 a 84 dias.

Figura 59 –ANOVA efeito isolado da idade de exposição em  $\Delta E$ , RhB



(fonte: STATISTICA 7)

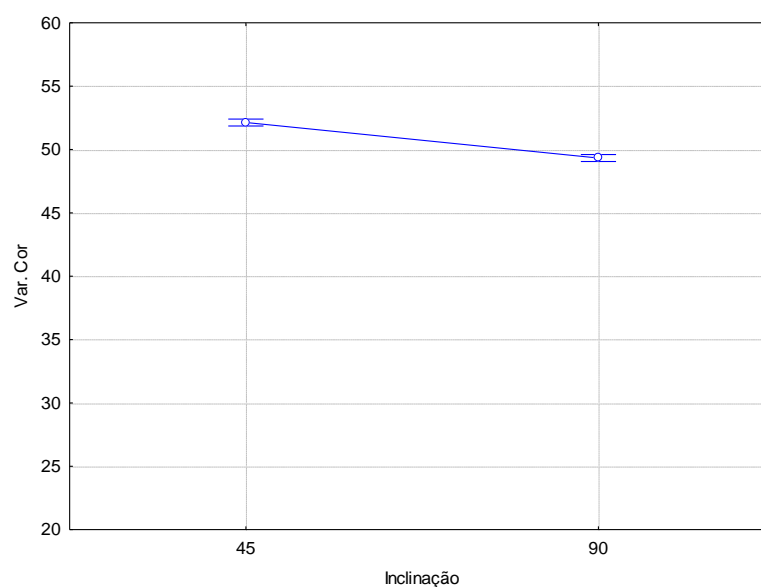
O teste de Duncan (tabela 20) revela que a variação de cor aos 3 dias é estatisticamente diferente de todas as demais, ocorrendo o mesmo para  $\Delta E$  referente à 7 dias exposição. Não há diferença no comportamento estatístico entre as idades de 14, 21 e 28 dias, assim como para o período de 42 a 84 dias.

Em relação ao efeito isolado da inclinação, apresentado na figura 60, há maior alteração de cor para a inclinação de 45°, quando comparada à de 90°. O valor médio de  $\Delta E$  para a primeira inclinação se apresentou, aproximadamente, 5,7% superior ao da segunda, fato o qual – pelo teste de Duncan (tabela 21), indica comportamentos estatisticamente diferentes entre si.

Tabela 20 – Teste de Duncan para a idade de exposição em  $\Delta E$ , RhB

	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	56 dias	70 dias	84 dias
3 dias		S	S	S	S	S	S	S	S
7 dias	S		S	S	S	S	S	S	S
14 dias	S	S		NS	NS	S	S	S	S
21 dias	S	S	NS		NS	S	S	S	S
28 dias	S	S	NS	NS		S	S	S	S
42 dias	S	S	S	S	S		NS	NS	NS
56 dias	S	S	S	S	S	NS		NS	NS
70 dias	S	S	S	S	S	NS	NS		NS
84 dias	S	S	S	S	S	NS	NS	NS	

(fonte: STATISTICA 7)

Figura 60 –ANOVA efeito isolado da inclinação em  $\Delta E$ , RhB

(fonte: STATISTICA 7)

A maior variação de cor observada para 45° pode ser fundamentada pelo fato de que a radiação solar incide de maneira mais intensa nesta inclinação, na comparação à 90°. De acordo com Santos (2014), a maior incidência possível em uma localidade ocorre para uma superfície cuja inclinação é igual à latitude local – para a cidade de Porto Alegre, a latitude é de 30°. Portanto, neste caso, a radiação é mais intensa para a inclinação de 45°.

Nesse sentido, corroboram os trabalhos de Hüsken et al. (2009), Melo (2011) e Casagrande (2012), os quais indicam que maiores intensidades de radiação UV-A incidentes sobre argamassas fotocatalíticas implicam em maiores taxas de degradação de poluentes. Conforme exposto por Melo (2011), a degradação de poluentes é crescente com o aumento da radiação



incidente, já que maiores quantidades de partículas de  $\text{TiO}_2$  são ativadas na superfície das amostras.

A mesma justificativa é cabível aos resultados observados para as diferentes orientações solares, das quais a orientação norte recebe a maior incidência de radiação solar. Assim, conforme a figura 61, verificou-se a maior variação de coloração nas placas voltadas para norte, enquanto que as demais orientações (leste, sul e oeste) apresentaram valores médios para  $\Delta E$  bastante próximos.

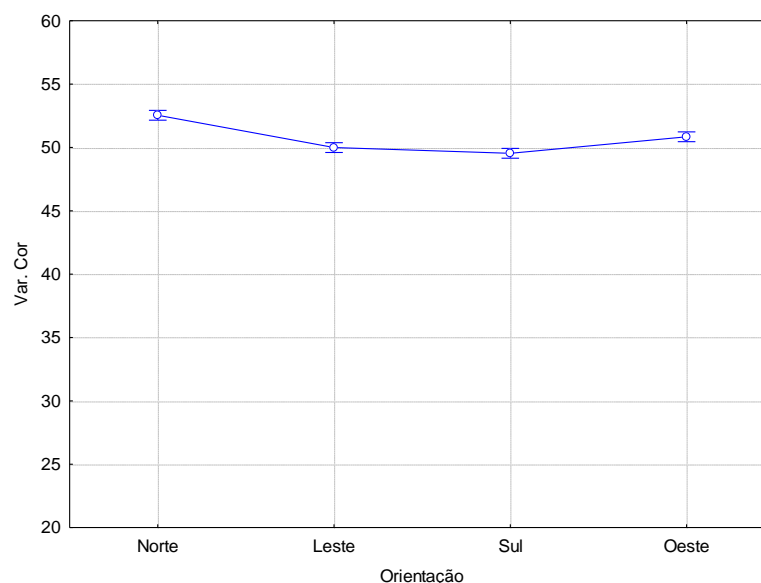
Nesse sentido, tem-se que, dentre as orientações solares estudadas, aquela que recebe maior intensidade de radiação solar no inverno do Hemisfério Sul (período de exposição deste estudo) é a norte, uma vez que a trajetória aparente do Sol encontra-se mais baixa no horizonte. A orientação sul, para o mesmo período, não recebe a componente direta da radiação solar, já que o nascente e o poente do Sol ocorrem mais ao norte das direções leste e oeste, respectivamente. A orientação sul, entretanto, recebe a radiação solar difusa (LOW ENERGY ARCHITECTURE RESEARCH UNIT, 2004).

Tabela 21 – Teste de Duncan para a inclinação de exposição em  $\Delta E$ , RhB

	45°	90°
45°		S
90°	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 61 – ANOVA efeito isolado da orientação em  $\Delta E$ , RhB





(fonte: STATISTICA 7)

O teste de Duncan (tabela 22) indica que a orientação norte é estatisticamente diferente das demais, as quais, por sua vez, podem ser consideradas estatisticamente iguais.

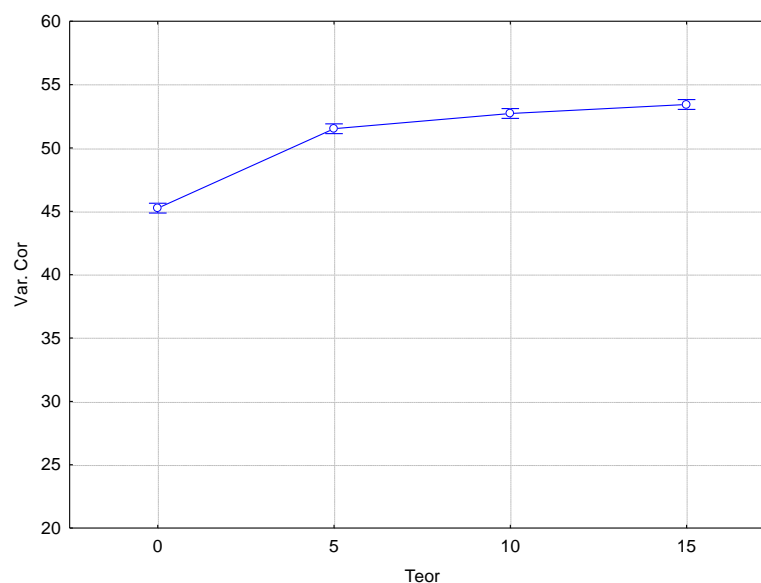
Tabela 22 – Teste de Duncan para a orientação solar em  $\Delta E$ , RhB

	Norte	Leste	Sul	Oeste
Norte		S	S	S
Leste	S		NS	NS
Sul	S	NS		NS
Oeste	S	NS	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

Por fim, as três argamassas fotocatalíticas produzidas apontam maiores valores médios de alteração de cor quando comparadas à de referência (0%), conforme ilustrado na figura 62. Na comparação entre os três teores empregados (5%, 10% e 15%), observa-se maior variação de cor para maiores quantidades de adição de  $\text{TiO}_2$ .

Tem-se ainda que a médias de  $\Delta E$  obtidas para o teor de 5% supera em aproximadamente 14% as médias da argamassas de referência, enquanto que, no outro extremo, o teor de 15% é apenas 3,7% superior à argamassa 5%. Portanto, a adição de 5% de  $\text{TiO}_2$  pode ser considerada como a quantidade mais adequada em termos de custos e eficiência de autolimpeza, na comparação com as demais percentuais propostos neste estudo.

Figura 62 –ANOVA efeito do teor de  $\text{TiO}_2$  em  $\Delta E$ , RhB

(fonte: STATISTICA 7)

De certa forma, esta observação vai ao encontro do que fora apresentado nos trabalhos de Poon e Cheung (2007) e Azevedo et al. (2012), nos quais menores teores de adição de  $\text{TiO}_2$  apresentaram melhores relações de custo/benefício para a atividade de remoção de poluentes.

Conforme teste de Duncan realizado (tabela 23), a argamassa 0% apresenta comportamento estatístico diferente das demais; é possível observar ainda, que podem ser consideradas estatisticamente iguais as argamassas 5% e 10%, assim como aquelas com 10% e 15% de dióxido de titânio.

Tabela 23 – Teste de Duncan para o teor de  $\text{TiO}_2$  em  $\Delta E$ , RhB

	0%	5%	10%	15%
0%		S	S	S
5%	S		NS	S
10%	S	NS		NS
15%	S	S	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

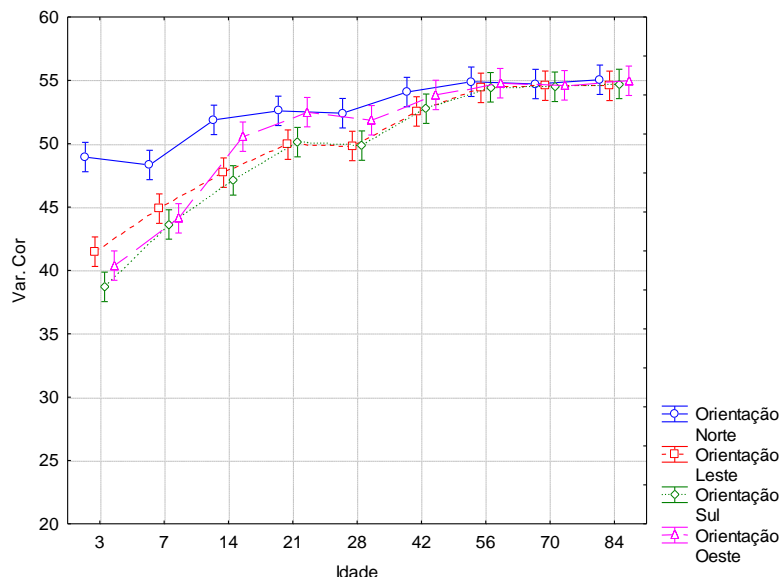
O efeito da interação entre os fatores idade e orientação sobre  $\Delta E$  é apresentado na figura 63. Nesta, é possível observar que a variação de cor para a orientação norte ocorre de forma mais acelerada em relação às demais – uma vez que, nas primeiras idades, já são observados valores elevados de  $\Delta E$ . As orientações leste, sul e oeste demandam maior período de

exposição para obtenção de valores de variação de cor semelhantes aos verificados para a orientação norte, os quais tendem a atingir o mesmo valor de variação de cor aos 84 dias.

Dentre os trabalhos consultados, a avaliação de  $\Delta E$  ao longo do tempo frente a diferentes orientações solares fora abordada no trabalho de Guerrini<sup>9</sup> (2007) apud Maury e De Belie (2010), no qual são apresentados dados referentes ao monitoramento de um dos prédios do *Cité des Arts* – em Chambéry (França), situado este entre dois outros (ao norte e ao sul). Avaliou-se a alteração de cor para as fachadas da referida edificação, tendo em vista a contaminação por poluentes atmosféricos ao longo do tempo.

Da mesma forma ao que foi verificado no presente estudo – porém em uma escala muito maior, ao final do período de 56 meses de avaliação, todas as fachadas apresentaram variações de cor similares. Entretanto, nota-se que os valores de  $\Delta E$  por Guerrini (2007) variaram entre 0,2 e 1,5 ao longo do monitoramento, enquanto que, neste trabalho, foram verificados valores muito maiores, dado a descoloração do corante aplicado.

Figura 63 –ANOVA efeito da interação entre idade e orientação em  $\Delta E$ , RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Outra diferença observada reside no fato de que, no *Cité des Arts*, a fachada voltada para a maior intensidade de radiação solar (orientação sul, para o Hemisfério Norte) não apresentou

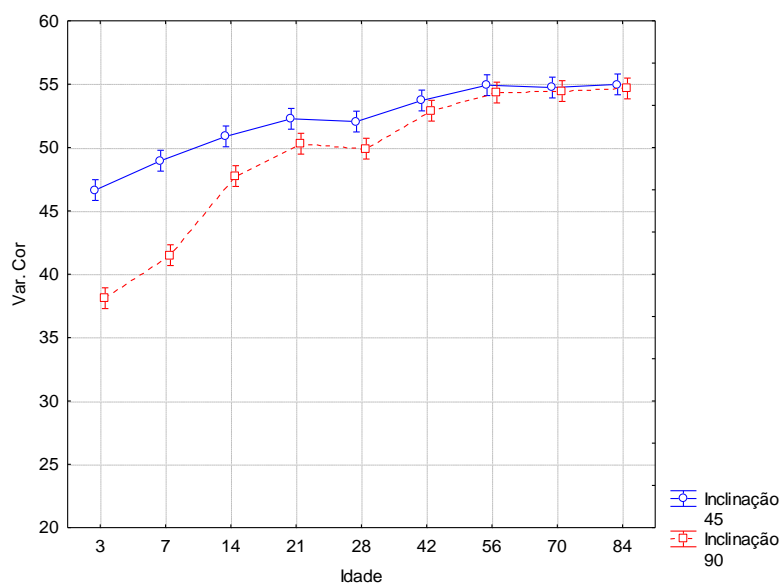
<sup>9</sup> GUERRINI, G. L., PLASSAIS, A.; PEPE, C.; CASSAR, L. Use of photocatalytic cementitious materials for self-cleaning applications. **RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials**, p. 219-226, 2007.

necessariamente a maior variação de cor ao longo do período analisado, em contraponto ao verificado neste trabalho; da mesma forma, para a orientação norte (menor insolação, para o hemisfério Norte) não foi verificada a menor variação de cor. Nesse ponto, Maury e De Belie (2010) indicam que, para aplicações reais, os valores de  $\Delta E$  podem ser afetados pela combinação das condições ambientais (direção da chuva e do vento no local, por exemplo) e dos planos arquitetônicos da edificação.

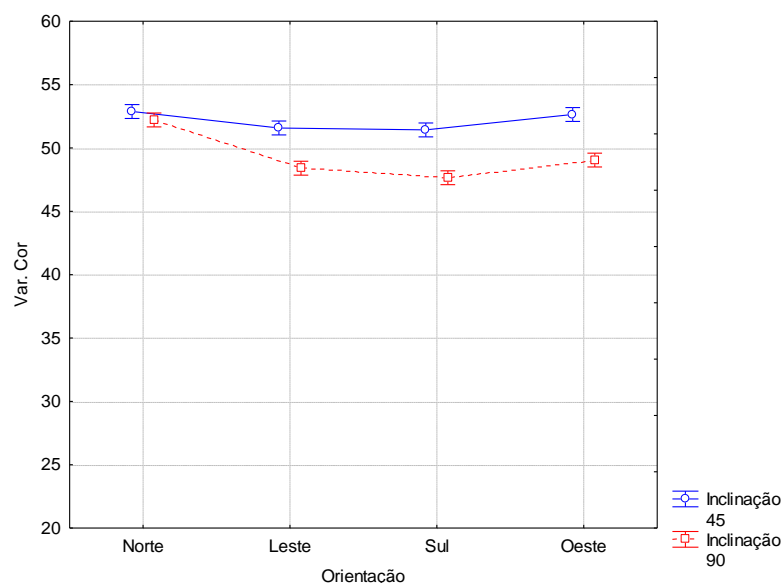
A figura 64, por sua vez, ilustra o efeito associado entre idade e inclinação, indicando que as amostras expostas à 90° necessitam de maior tempo para atingir um valor de  $\Delta E$  verificado para 45°, apontando que, nesta última, o efeito de autolimpeza já ocorre logo nas primeiras idades. Já na figura 65, é apresentado o efeito conjunto da orientação e da inclinação sobre a variável de resposta, indicando que as amostras inclinadas à 45° apresentaram valores de  $\Delta E$  muito próximo para todas as orientações estudadas, ao passo que aquelas à 90° demonstraram maior alteração de coloração na orientação norte – para as demais orientações, apresentaram-se valores semelhantes de  $\Delta E$ .

Em comum às figuras 64 e 65, tem-se que aquelas configurações de posicionamento expostas a maiores intensidades de radiação UV – tais como a orientação norte e a inclinação de 45°, apresentam menor variação nos dados dos valores médios de  $\Delta E$ .

Figura 64 –ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em  $\Delta E$ , RhB



(fonte: STATISTICA 7)

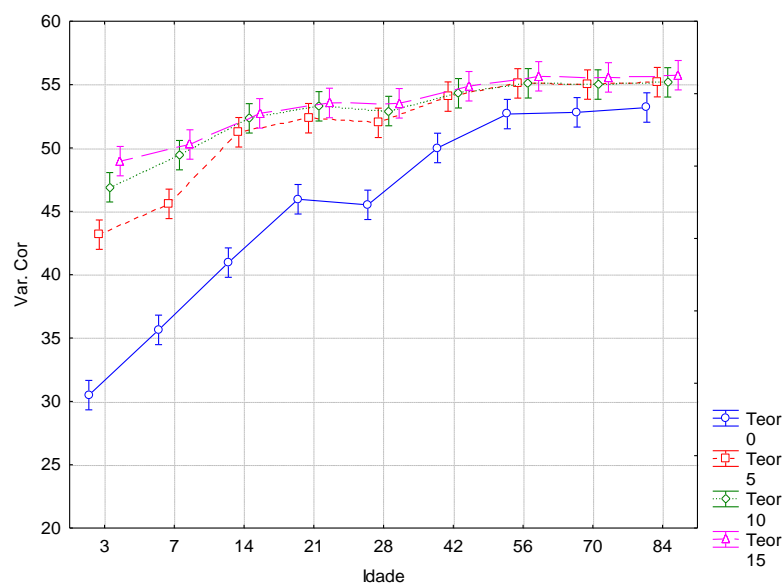
Figura 65 –ANOVA efeito da interação entre orientação e inclinação em  $\Delta E$ , RhB

(fonte: STATISTICA 7)

Na figura 66, expõe-se o efeito da interação entre idade e teor de  $\text{TiO}_2$  sobre  $\Delta E$ . Em geral, observa-se que as argamassas fotocatalíticas (5%, 10% e 15%) apresentam médias de variação de cor muito próximas entre si ao longo da exposição, as quais mostraram-se superiores à variação da argamassa de referência em todas as idades de leitura.

Para as primeiras idades, o  $\Delta E$  verificado é maior para quantidades mais elevadas de  $\text{TiO}_2$ , sendo que, aos 3 dias, o maior teor (15%) apresentou o maior valor de variação de cor, seguidamente dos teores de 10% e 5%. No entanto, ao longo do tempo, os teores propostos tendem a atingir o mesmo valor para  $\Delta E$  aos 84 dias, incluindo a argamassa de referência.

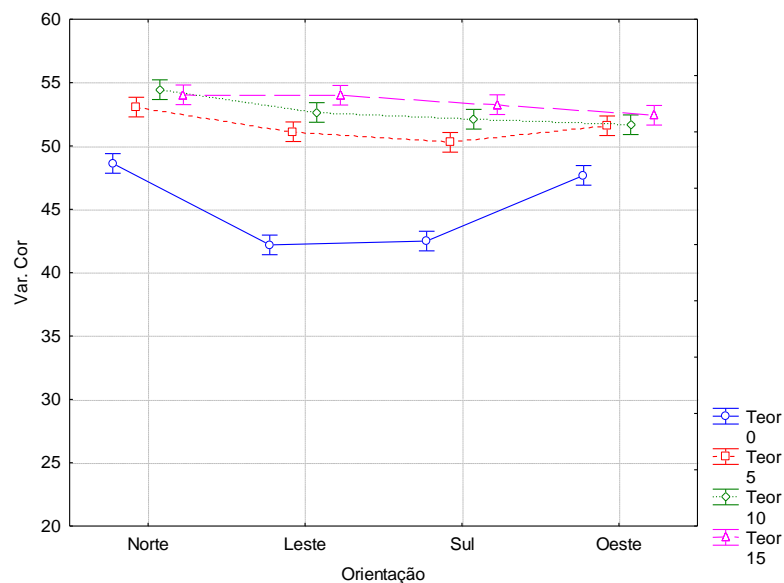
De acordo com Folli et al. (2012), tal fato pode ser creditado ao uso do Rodamina B como manchamento, uma vez que a descoloração do corante mesmo em argamassas que não contêm  $\text{TiO}_2$  é tido como um efeito bastante comum. No entanto, em superfícies cimentícias, é notória a degradação do corante de forma mais acelerada nas superfícies que contêm  $\text{TiO}_2$ , tal como observado no presente trabalho.

Figura 66 –ANOVA efeito da interação entre idade e teor de  $\text{TiO}_2$  em  $\Delta E$ , RhB

(fonte: STATISTICA 7)

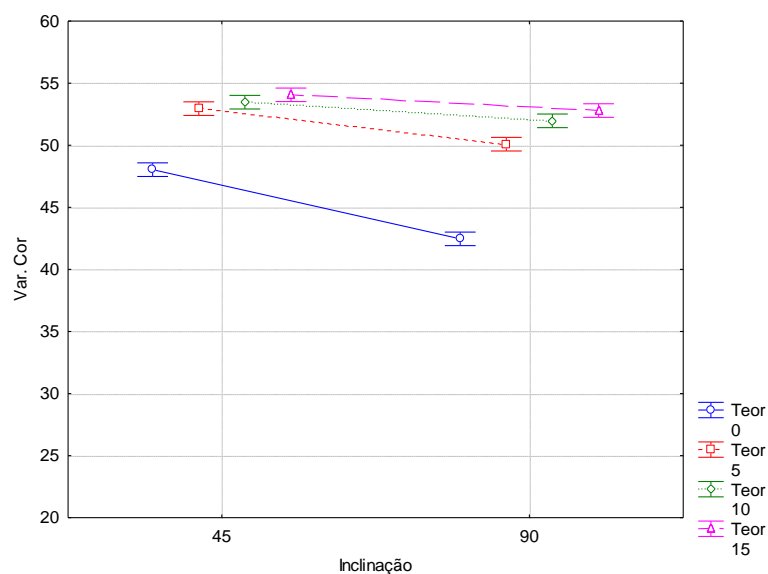
O efeito associado entre orientação solar e teor de dióxido de titânio na variação de cor (figura 67) indica que, para as argamassas acrescidas de  $\text{TiO}_2$ , há baixa variação entre os valores de  $\Delta E$  dentre orientações em estudo. Já a figura 68 apresenta a interação entre inclinação e teor sobre  $\Delta E$ , apontando que, para maiores teores de  $\text{TiO}_2$ , há menor variação de  $\Delta E$  dentre as inclinações de  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .

Pode-se inferir que aquelas configurações de posicionamento que recebem menores intensidades de radiação solar – como a orientação sul ou a inclinação  $90^\circ$ , demandam maiores teores de  $\text{TiO}_2$  para atingirem valores de  $\Delta E$  mais elevados. Nesse sentido, tem-se o que fora exposto por Melo (2011): "a eficiência da fotocatalise heterogênea na degradação dos poluentes está intimamente relacionada com a geração de radicais hidroxila. [...] quanto mais rápido e maiores forem as quantidades de radicais gerados, maior será o poder oxidativo.". Assim, tem-se que maiores teores de adição de  $\text{TiO}_2$  permitem maiores quantidades de radicais hidroxila nas superfícies das amostras, implicando em uma atividade autolimpante mais eficaz.

Figura 67 –ANOVA efeito da interação entre orientação e teor de TiO<sub>2</sub> em ΔE, RhB

(fonte: STATISTICA 7)

A tabela 24 apresenta o resumo da análise de variância realizada para a refletância ( $L^*$ ), a qual aponta que todos os fatores controláveis estudados influenciam significativamente sobre tal variável de resposta. Da mesma forma, todas as interações de segunda ordem entre os fatores são significativas. Para as interações de terceira ordem, apenas uma se mostrou significativamente influente, enquanto que a de quarta ordem não apresentou significativa interferência sobre a refletância.

Figura 68 –ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de TiO<sub>2</sub> em ΔE, RhB

(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 24 – Análise de variância geral (L\*), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
{1}Idade	14.777,34	9,00	1.641,93	271,28	0,00%	S
{2}Orientação	308,52	3,00	102,84	16,99	0,00%	S
{3}Inclinação	73,09	1,00	73,09	12,08	0,06%	S
{4}Teor	5.777,82	3,00	1.925,94	318,21	0,00%	S
Idade*Orientação	444,82	27,00	16,47	2,72	0,00%	S
Idade*Inclinação	428,25	9,00	47,58	7,86	0,00%	S
Orientação*Inclinação	150,03	3,00	50,01	8,26	0,00%	S
Idade*Teor	905,72	27,00	33,55	5,54	0,00%	S
Orientação*Teor	681,78	9,00	75,75	12,52	0,00%	S
Inclinação*Teor	117,00	3,00	39,00	6,44	0,03%	S
Idade*Orientação*Inclinação	227,41	27,00	8,42	1,39	9,71%	NS
Idade*Orientação*Teor	441,13	81,00	5,45	0,90	71,16%	NS
Idade*Inclinação*Teor	82,60	27,00	3,06	0,51	98,24%	NS
Orientação*Inclinação*Teor	272,62	9,00	30,29	5,00	0,00%	S
1*2*3*4	351,19	81,00	4,34	0,72	96,37%	NS
Erro	1.936,79	320,00	6,05	-	-	-

SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

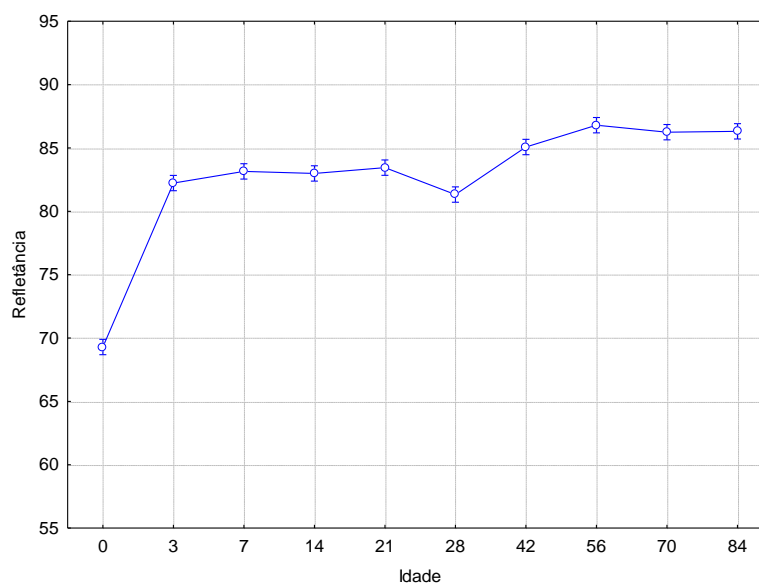
(fonte: elaborado pelo autor)

Na sequência, é exposto o efeito isolado de cada um dos fatores controláveis sobre os valores de refletância obtidos. A partir da figura 69, é possível verificar um forte aumento na luminosidade média das amostras no período de 0 a 3 dias de exposição – aproximadamente 76% do aumento total da refletância. Já entre 3 e 84 dias, o aumento ocorreu de maneira mais lenta.

O aumento da coordenada L\* durante o período de exposição é um comportamento também observado no trabalho de Diamanti et al. (2013), no qual amostras de argamassa fotocatalítica (cimento branco) foram expostas por 7 meses no ambiente urbano de Milão. Na comparação à argamassa de referência, aquelas acrescidas de TiO<sub>2</sub> apresentaram menor variação nos valores de L\* observados ao longo do tempo.



Figura 69 – ANOVA efeito da idade de exposição em L\*, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Pelo teste de Duncan, apresentado na tabela 25, a idade de 3 dias de exposição tem comportamento estatístico idêntico às idades de 7, 21 e 28 dias. Já as idades de 56, 70 e 84 dias são consideradas estatisticamente iguais.

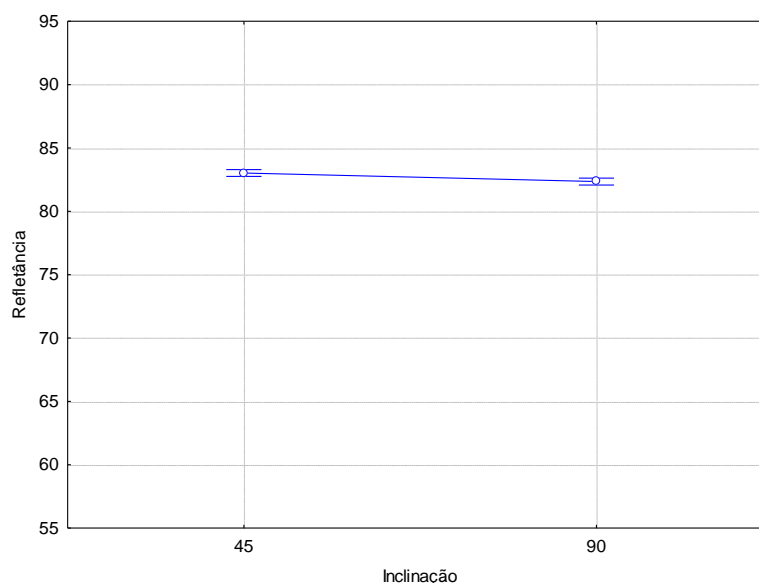
Tabela 25 – Teste de Duncan para a idade de exposição em L\*, RhB

	0 dias	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	56 dias	70 dias	84 dias
0 dias		S	S	S	S	S	S	S	S	S
3 dias	S		NS	NS	NS	NS	S	S	S	S
7 dias	S	NS		NS	NS	S	S	S	S	S
14 dias	S	NS	NS		NS	S	S	S	S	S
21 dias	S	NS	NS	NS		S	S	S	S	S
28 dias	S	NS	S	S	S		S	S	S	S
42 dias	S	S	S	S	S	S		S	NS	NS
56 dias	S	S	S	S	S	S	S		NS	NS
70 dias	S	S	S	S	S	S	NS	NS		NS
84 dias	S	S	S	S	S	S	NS	NS	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

Em relação à inclinação de exposição, apesar de este efeito ter sido apontado como significativo na análise de variância, a figura 70 indica valores muito próximos de refletância para as inclinações de 45° e 90°. Tais valores são considerados como estatisticamente iguais pelo teste de Duncan, exposto na tabela 26.

Figura 70 – ANOVA efeito da inclinação em L\*, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 26 – Teste de Duncan para a inclinação de exposição em L\*, RhB

	45°	90°
45°		NS
90°	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

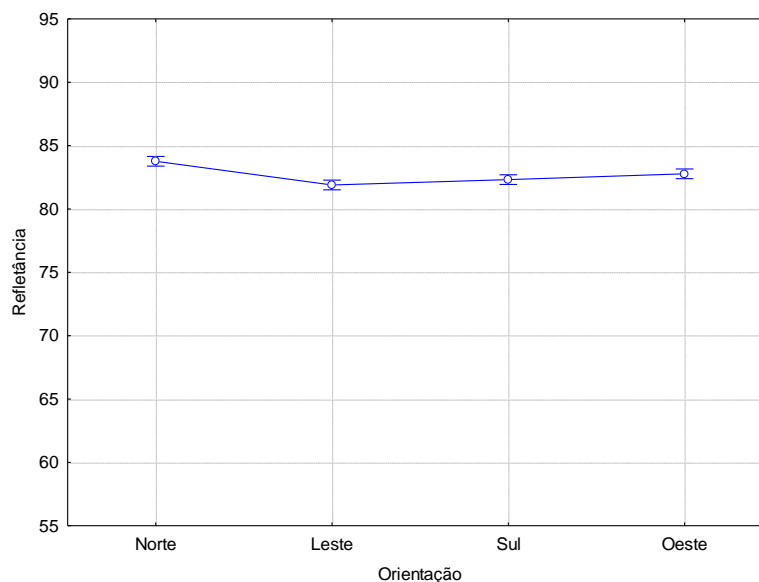
Já as orientações solares leste, sul e oeste (figura 71) apresentaram valores de luminosidade muito próximos, enquanto que, para a orientação norte, foram verificados valores levemente superiores. Analisando-os pelo teste de Duncan (tabela 27), a orientação norte é estatisticamente diferente à leste, o que não é verificado para as orientações sul e oeste. Ainda, é possível observar que não há diferença significativa entre as orientações leste, sul e oeste.

Em relação aos teores de  $\text{TiO}_2$  aplicados, a argamassa 0% apresentou  $L^*$  inferior às demais, conforme representado na figura 72, a qual indicou ainda valores de refletância muito próximos para os teores de 5%, 10% e 15%. A refletância para o teor de 5% se mostrou 8% superior à de 0%, enquanto que, no outro extremo, foi verificado um aumento de apenas 1,7% para a refletância do teor de 15%, em relação ao teor de 5%.

Tais efeitos, de acordo com Diamanti et al. (2013), são típicos da presença do dióxido de titânio nas argamassas: claramente manifesta-se um aumento no brilho das argamassas

fotocatalíticas, dado o elevado grau de refração do pó empregado. Nesse ponto, o presente trabalho apresenta resultados em conformidade aos obtidos por Austria (2015), em que maiores teores de  $\text{TiO}_2$  implicaram em maior refletância (brilho) às argamassas.

Figura 71 – ANOVA efeito da orientação em  $L^*$ , RhB



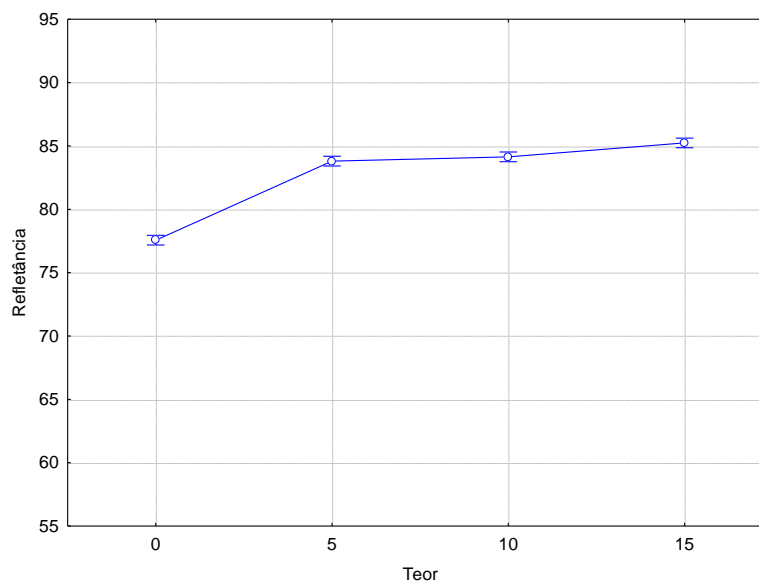
(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 27 – Teste de Duncan para a orientação solar em  $L^*$ , RhB

	Norte	Leste	Sul	Oeste
Norte		S	NS	NS
Leste	S		NS	NS
Sul	NS	NS		NS
Oeste	NS	NS	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

Segundo o teste de Duncan da tabela 28, a argamassa de referência apresenta comportamento estatisticamente diferente de todas as demais; dentre as argamassas fotocatalíticas, argamassa cujo teor de  $\text{TiO}_2$  é de 5% é estatisticamente igual à de 10%, a qual, por sua vez, pode ser considerada igual à de 15%.

Figura 72 –ANOVA efeito do teor de TiO<sub>2</sub> em L\*, RhB

(fonte: STATISTICA 7)

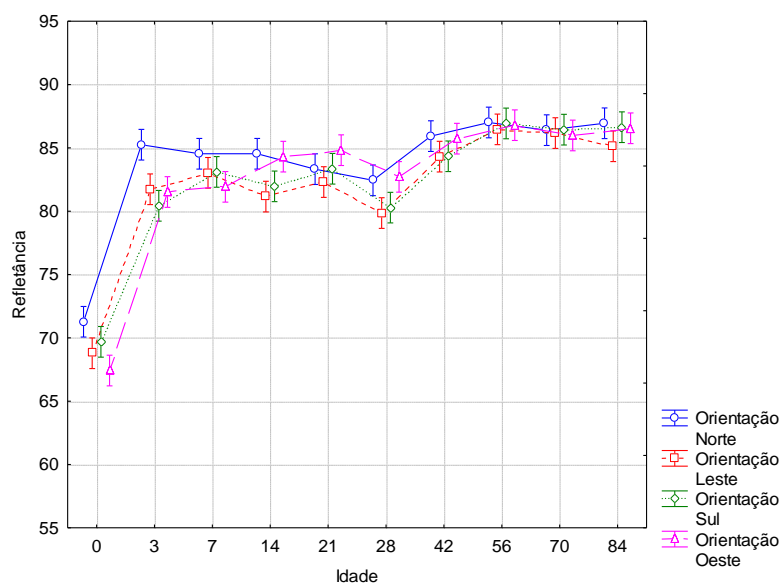
Tabela 28 – Teste de Duncan para o teor de TiO<sub>2</sub> em L\*, RhB

	0%	5%	10%	15%
0%		S	S	S
5%	S		NS	S
10%	S	NS		NS
15%	S	S	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 73 ilustra o efeito associado entre idade de exposição e orientação solar, a partir da qual é possível verificar que, apesar de a análise de variância indicar que há interferência significativa desta fonte sobre L\*, os níveis estudados apresentam comportamentos muito semelhantes ao longo do tempo. Da mesma forma ocorre para a interação da idade com as inclinações analisadas (conforme figura 74), mesmo que nas primeiras idades a inclinação de 45° apresente valores médios de refletância maiores, em relação à 90°.

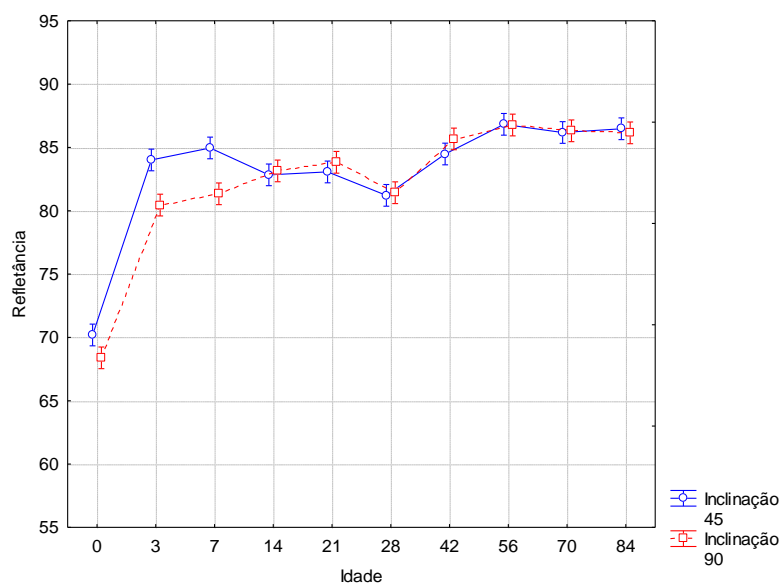
Figura 73 –ANOVA efeito da interação entre idade e orientação em L\*, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

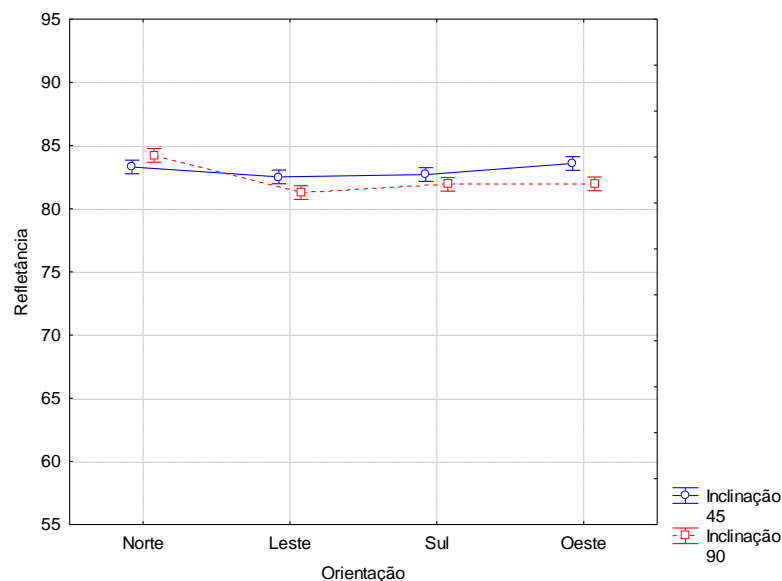
Já para a interação dos efeitos da orientação solar e da inclinação (figura 75), tem-se que, para as amostras expostas à 45°, há pouca variação na refletância dentre as orientações de exposição, enquanto que para aquelas à 90°, a orientação norte apresenta valores médios de L\* superiores às demais orientações – que, por sua vez, indicam valores muito semelhantes.

Figura 74 –ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em L\*, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Figura 75 –ANOVA efeito da interação entre orientação e inclinação em L\*, RhB

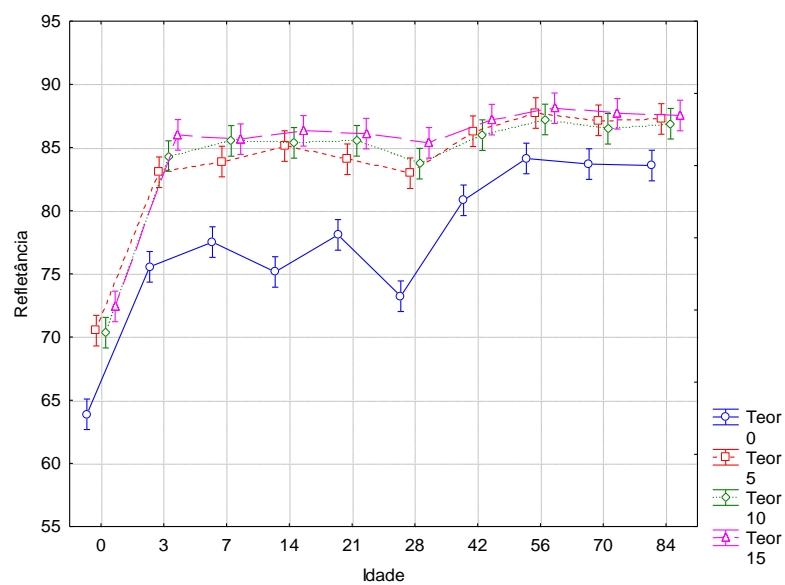


(fonte: STATISTICA 7)

Analisando-se a figura 76, é possível verificar que as argamassas fotocatalíticas apresentaram menor variação dentre os valores observados de refletância ao longo do período de exposição, quando comparadas àquelas que não possuem adição de  $\text{TiO}_2$ . Da mesma forma, tal comportamento fora observado anteriormente por Diamanti et al. (2013).

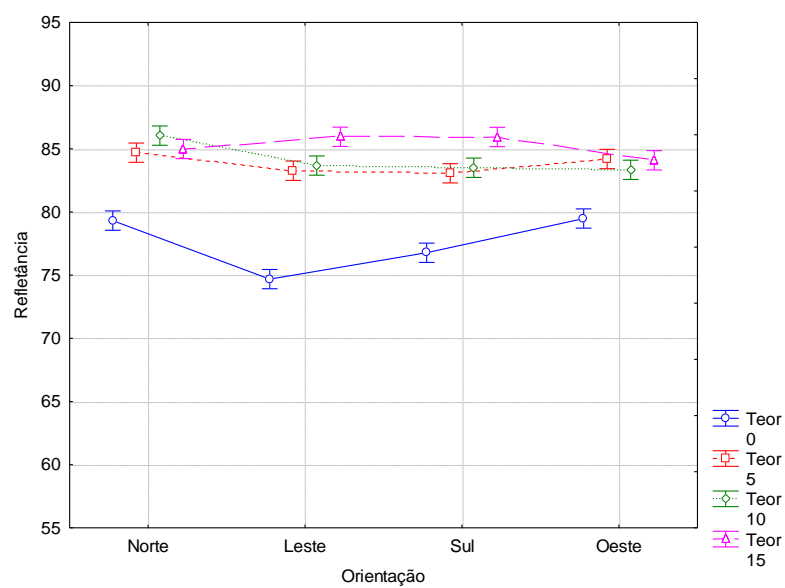
Ainda, nota-se um aumento no brilho mesmo para a argamassa 0% ao longo da exposição, tal como fora observado para a sua respectiva variação de cor (figura 66). De acordo com Folli et al. (2012), em artigos têxteis – nos quais o Rodamina B é amplamente utilizado, é também observado um branqueamento dos tecidos coloridos quando expostos à luz solar.

Figura 76 –ANOVA efeito da interação entre idade e teor em L\*, RhB

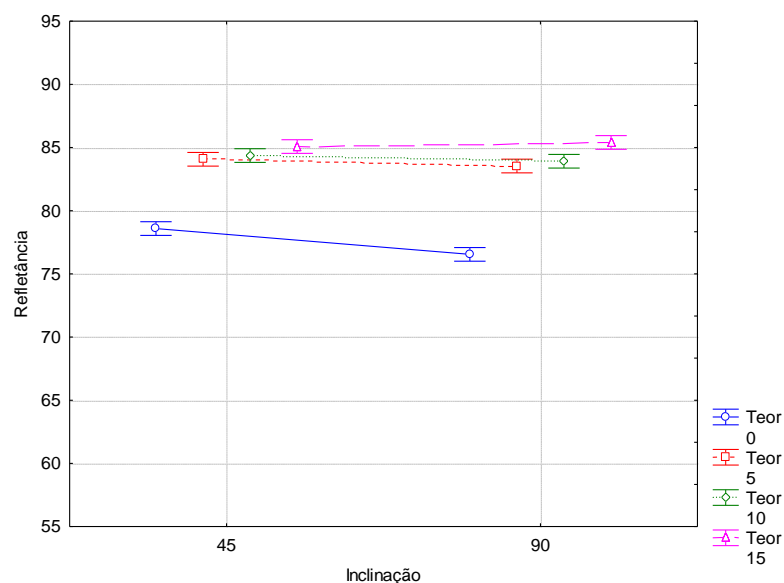


(fonte: STATISTICA 7)

Figura 77 –ANOVA efeito da interação entre orientação e teor em L\*, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Figura 78 –ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de TiO<sub>2</sub> em L\*, RhB

(fonte: STATISTICA 7)

### 5.3.2 Inclinação – RhB

Apresentam-se as análises de variância para as inclinações de exposição 0°, 45° e 90°, segundo as orientações solares propostas para este estudo (norte, leste, sul e oeste). Para efeito de comparação aos resultados obtidos, tem-se o trabalho de Pereira et al. (2009), o qual avaliou a inclinação de argamassas fotocatalíticas em ambiente de laboratório.

Segundo os autores, as amostras que apresentaram a maior eficácia de autolimpeza foram as dispostas entre 0° e 90° de inclinação, seguidamente daquelas colocadas na vertical e na horizontal, respectivamente. A menor atividade autolimpante verificada para a inclinação de 90° foi justificada pelo fato de que a água, neste caso, "escorre muito rapidamente sobre a superfície da argamassa, não permitindo uma ligação iônica tão efetiva quanto nos demais casos."

Ainda, tais inclinações de exposição implicam em diferentes fluxos de energia solar sobre as superfícies (conforme apresentado no item 2.1), o que conseqüentemente pode afetar a ativação das partículas de TiO<sub>2</sub> em função da quantidade de fótons incidentes.



### 5.3.2.1 Orientação norte

A tabela 29 resume a análise de variância para tal orientação, a qual indica que todos os fatores controláveis exercem influência significativa sobre  $\Delta E$ , ocorrendo o mesmo para as suas interações de segunda e terceira ordens.

Já o efeito isolado da inclinação sobre a variável de resposta em questão é observado na figura 79, a qual apresenta maiores valores de variação de cor para a inclinação de  $45^\circ$ , ao passo que as demais inclinações ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ) indicam valores bastante semelhantes. O teste de Duncan (tabela 30) indica que o comportamento das amostras expostas à  $45^\circ$  é estatisticamente igual às expostas à  $90^\circ$  e diferente às  $0^\circ$ .

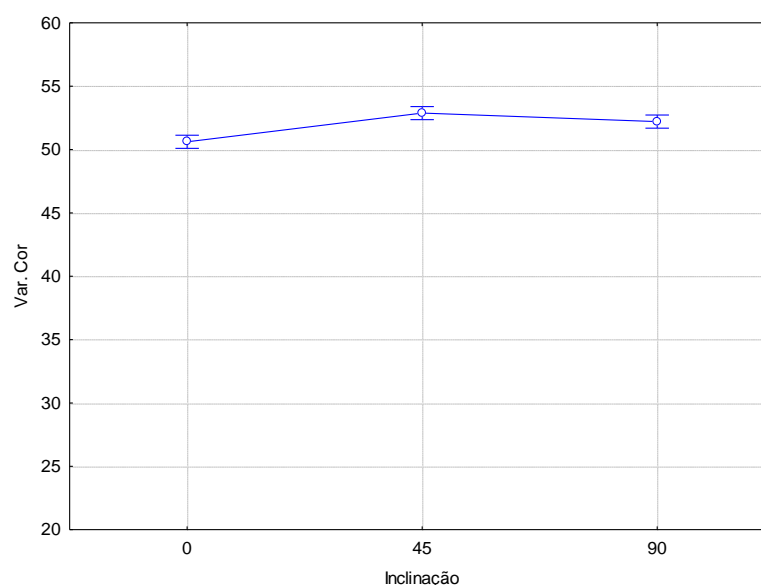
Tabela 29 – Análise de variância norte ( $\Delta E$ ), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	1.787,92	8,00	223,49	45,89	0,00%	S
Inclinação	194,88	2,00	97,44	20,01	0,00%	S
Teor	2.394,23	3,00	798,08	163,86	0,00%	S
Idade*Inclinação	240,65	16,00	15,04	3,09	0,03%	S
Idade*Teor	1.253,87	24,00	52,24	10,73	0,00%	S
Inclinação*Teor	496,57	6,00	82,76	16,99	0,00%	S
Idade*Inclinação*Teor	366,67	48,00	7,64	1,57	2,83%	S
Erro	526,03	108,00	4,87	-	-	-

SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 79 –ANOVA efeito da inclinação norte em  $\Delta E$ , RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Apesar de a quantidade de energia solar incidente ser idêntica sobre todas as superfícies, aquelas expostas horizontal ou verticalmente apresentam maior área efetiva para projeção dos raios solares. Desta forma, tais superfícies apresentam um fluxo de energia menor, na comparação às superfícies dispostas perpendicularmente à incidência da radiação solar, como às expostas à 45°.

Tabela 30 – Teste de Duncan para a inclinação norte em  $\Delta E$ , RhB

	0°	45°	90°
0°		S	NS
45°	S		NS
90°	NS	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

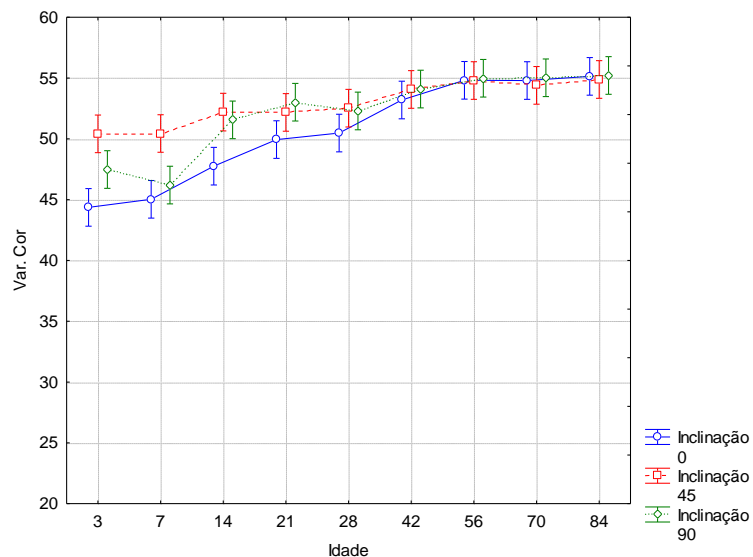
No entanto, cabe ressaltar uma peculiaridade verificada para localidades situadas a latitudes maiores no globo terrestre (tal como a cidade de Porto Alegre): de acordo com Burger e Rüther (2006), na comparação somente entre as inclinações de 0° e 90°, esta última se apresenta mais favorável ao recebimento da radiação solar, dada a menor altura solar observada nestas localidades. Complementarmente, o Low Energy Architecture Research Unit (2004) indica que as superfícies orientadas para o equador terrestre recebem suas maiores intensidades de radiação no inverno (quando o Sol está mais baixo no horizonte). Assim, pode-se justificar o fato de que as amostras à 90°, voltadas para norte, apresentaram comportamento estatístico igual às aquelas dispostas à 45°.

Quanto às amostras expostas à 0°, a menor atividade autolimpante observada pode ser fundamentada pelo acúmulo de água nestas superfícies, uma vez que sua disposição horizontal dificulta o efeito de lavagem das partículas degradadas possibilitado pela ação da água da chuva.

Ao analisar-se o efeito da interação entre idade e inclinação sobre  $\Delta E$  (figura 80), é possível verificar que, ao longo da exposição, a inclinação de 45° apresentou a menor variação nos valores médios observados na comparação às demais, indicando que estas necessitariam de maior tempo para atingir o mesmo patamar de 45°. Nesse sentido, tem-se que, a partir de 42 dias exposição, todas as inclinações em estudo apresentaram valores de variação de cor bastante semelhantes.

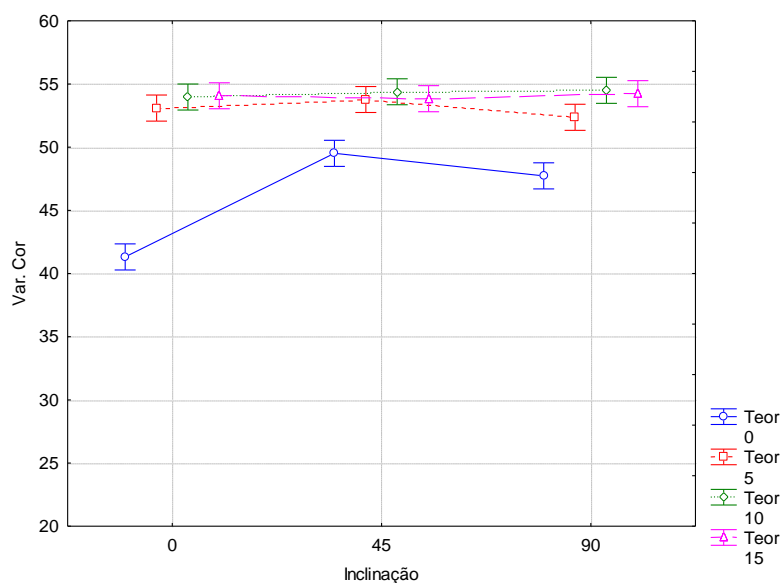
A figura 81, por sua vez, ilustra o efeito associado entre inclinação de exposição e teor de  $TiO_2$  aplicado, indicando que, para todas as inclinações propostas, o teor de 0% apresenta os menores valores médios de variação de cor, enquanto que aos demais teores são conferidos valores bastante próximos entre si.

Figura 80 – ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em  $\Delta E$ , norte, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Figura 81 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de  $TiO_2$  em  $\Delta E$ , norte, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Para a refletância ( $L^*$ ), a análise de variância aponta que todos os fatores controláveis atuam significativamente sobre a variável de resposta. Conforme exposto na tabela 31, não exerce influência significativa a interação de segunda ordem entre idade e inclinação, assim como a interação de terceira ordem entre os fatores.

Tabela 31 – Análise de variância norte ( $L^*$ ), RhB

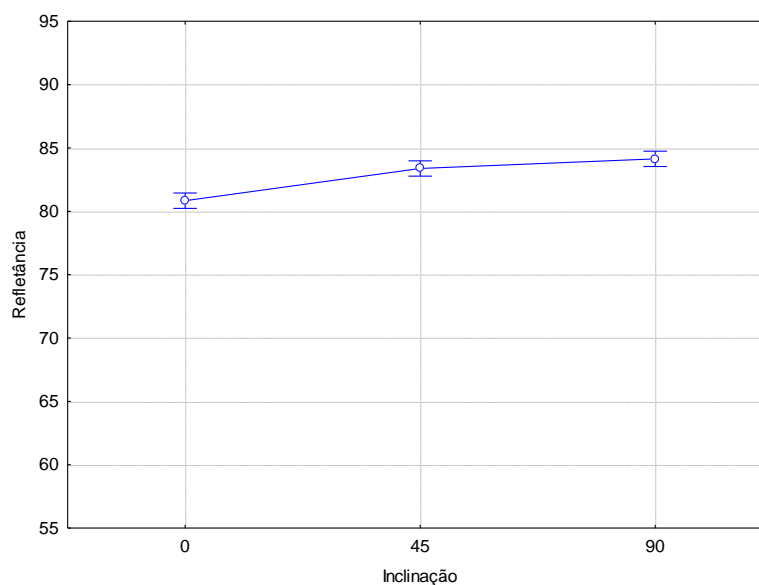
Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	5.125,43	9,00	569,49	76,16	0,00%	S
Inclinação	479,09	2,00	239,55	32,04	0,00%	S
Teor	2.763,95	3,00	921,32	123,22	0,00%	S
Idade*Inclinação	130,11	18,00	7,23	0,97	50,22%	NS
Idade*Teor	578,80	27,00	21,44	2,87	0,00%	S
Inclinação*Teor	383,54	6,00	63,92	8,55	0,00%	S
Idade*Inclinação*Teor	236,70	54,00	4,38	0,59	98,55%	NS
Erro	897,27	120,00	7,48	-	-	-

SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

(fonte: elaborado pelo autor)

Tendo em vista o efeito isolado da inclinação sobre  $L^*$ , a figura 82 aponta menor valor de refletância para as amostras expostas à  $0^\circ$ , na comparação àquelas à  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , que apresentam valores muito próximos para seus respectivos  $L^*$ . A comparação múltipla de médias (tabela 32) aponta que as amostras à  $0^\circ$  de inclinação possuem comportamento estatisticamente diferente às demais, as quais, por sua vez, podem ser considerados estatisticamente iguais.

Figura 82 –ANOVA efeito da inclinação em L\*, norte, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

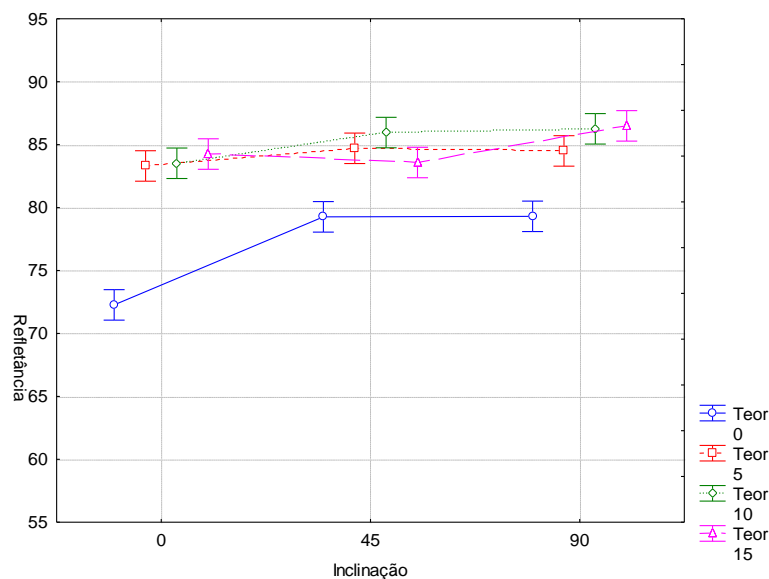
A figura 83 apresenta o efeito da interação entre inclinação e teor sobre a refletância, sendo possível observar que, em conformidade ao que já fora verificado para a variação de cor, os valores médios verificados para as argamassas fotocatalíticas são bastante próximos entre si para todas as inclinações propostas, o que não é visto para a argamassa de referência.

Tabela 32 – Teste de Duncan para a inclinação em L\*, norte, RhB

	0°	45°	90°
0°		S	S
45°	S		NS
90°	S	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 83 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de  $\text{TiO}_2$  em  $L^*$ , norte, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

### 5.3.2.2 Orientação leste

A tabela 33 expõe o resumo da análise de variância para a orientação leste, indicando que todos os fatores controláveis propostos interferem significativamente sobre a variável de resposta,  $\Delta E$ . Dentre as interações de segunda ordem, aquela que envolve tanto idade quanto inclinação não exerce influência sobre a variação de cor, em contraponto às demais. Já a interação de terceira tampouco influencia significativamente sobre  $\Delta E$ .

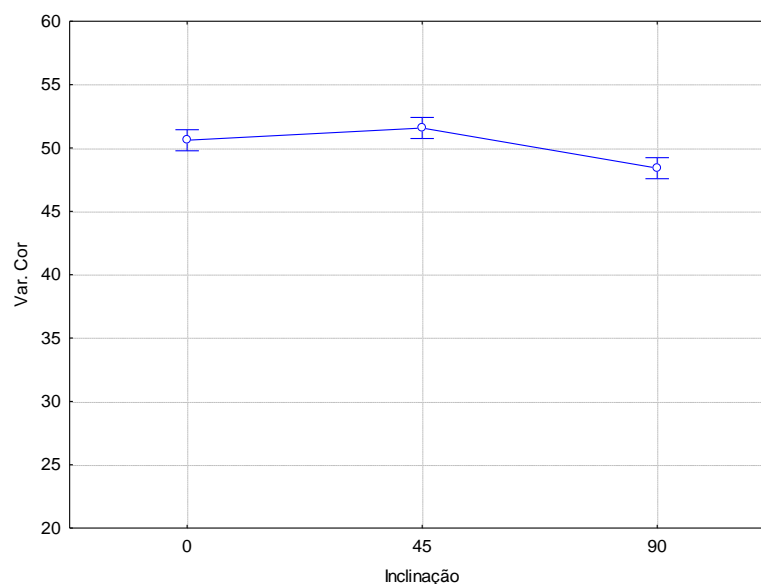
Na sequência, a figura 84 indica que as amostras à  $45^\circ$  de inclinação apresentaram as maiores alterações de cor, seguidamente àquelas expostas à  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente. No entanto, o teste de Duncan (tabela 34) expressa que, na comparação entre as médias de  $\Delta E$ , as amostras inclinadas a  $45^\circ$  são consideradas estatisticamente iguais às expostas à  $0^\circ$ , porém estatisticamente diferentes daquelas à  $90^\circ$ .

Tabela 33 – Análise de variância leste ( $\Delta E$ ), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	3.845,27	8,00	480,66	38,02	0,00%	S
Inclinação	380,39	2,00	190,20	15,04	0,00%	S
Teor	5.095,65	3,00	1.698,55	134,36	0,00%	S
Idade*Inclinação	158,15	16,00	9,88	0,78	70,27%	NS
Idade*Teor	2.282,70	24,00	95,11	7,52	0,00%	S
Inclinação*Teor	492,49	6,00	82,08	6,49	0,00%	S
Idade*Inclinação*Teor	310,23	48,00	6,46	0,51	99,48%	NS
Erro	1.365,35	108,00	12,64	-	-	-

SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 84 –ANOVA efeito da inclinação em  $\Delta E$ , leste, RhB

(fonte: STATISTICA 7)

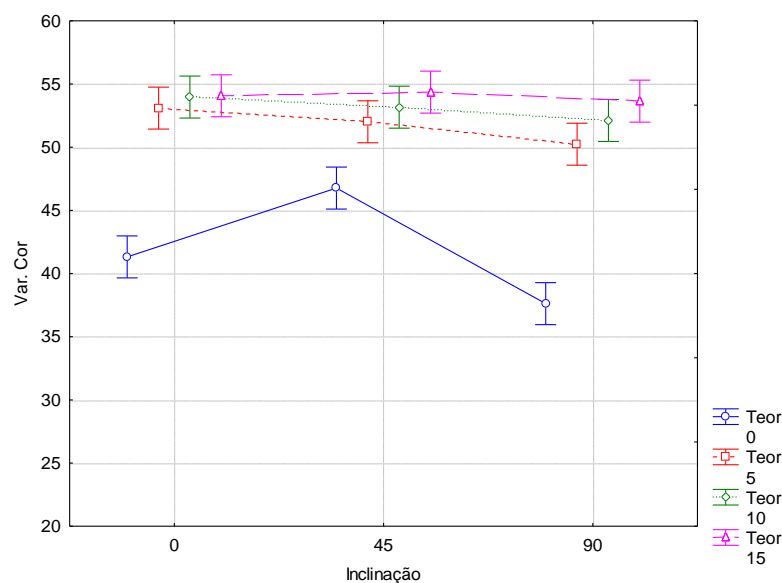
Tabela 34 – Teste de Duncan para a inclinação em  $\Delta E$ , leste, RhB

	0°	45°	90°
0°		NS	NS
45°	NS		S
90°	NS	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 85, é ilustrado o efeito associado entre inclinação e teor de  $\text{TiO}_2$ , observando-se que, para as inclinações em estudo, as argamassas fotocatalíticas apresentaram um mesmo padrão de comportamento. Já para a argamassa que não contém  $\text{TiO}_2$ , são verificados valores médios de  $\Delta E$  mais elevados para a inclinação de  $45^\circ$ , na comparação à  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

Figura 85 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de TiO<sub>2</sub> em  $\Delta E$ , leste, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Para a refletância ( $L^*$ ), os resultados que resumem a análise de variância (tabela 35) são idênticos aos obtidos para  $\Delta E$ : todos os fatores controláveis influenciam significativamente a variável de resposta, enquanto que, para as interações de maiores ordens, apenas a interação entre idade e inclinação não é significativa. Da mesma forma, a interação de terceira ordem é estatisticamente insignificante.

Tabela 35 – Análise de variância leste ( $L^*$ ), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	5.784,29	9,00	642,70	66,51	0,00%	S
Inclinação	157,78	2,00	78,89	8,16	0,05%	S
Teor	4.959,19	3,00	1.653,06	171,08	0,00%	S
Idade*Inclinação	79,93	18,00	4,44	0,46	96,98%	NS
Idade*Teor	850,05	27,00	31,48	3,26	0,00%	S
Inclinação*Teor	258,08	6,00	43,01	4,45	0,04%	S
Idade*Inclinação*Teor	225,34	54,00	4,17	0,43	99,96%	NS
Erro	1.159,53	120,00	9,66	-	-	-

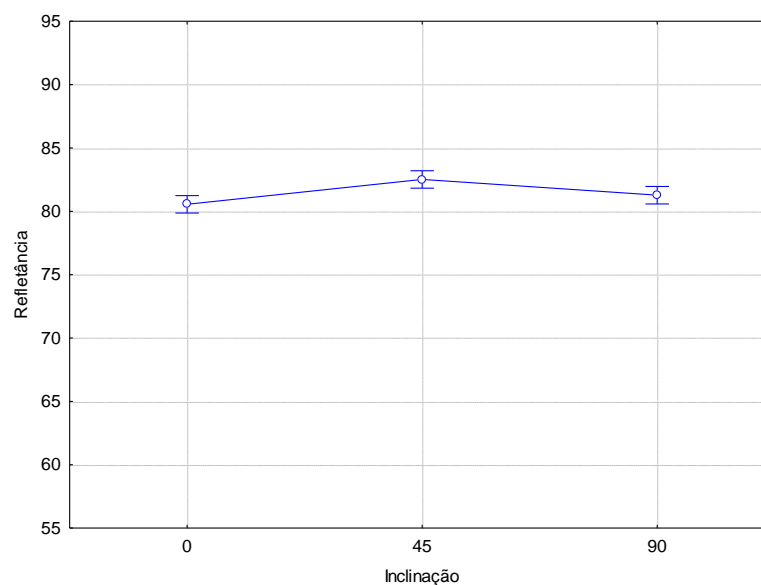
SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 86, o efeito isolado da inclinação sobre a refletância apresenta maior valor para a inclinação de 45°, a qual é levemente superior às demais. Porém, ao compararem-se tais médias pelo teste de Duncan, todos os valores são estatisticamente iguais (tabela 36).



Figura 86 –ANOVA efeito da inclinação em L\*, leste, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

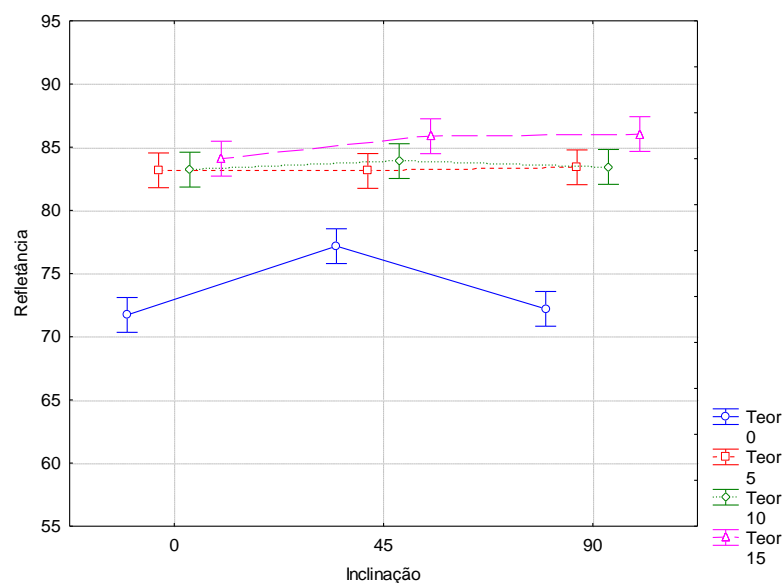
Tabela 36 – Teste de Duncan para a inclinação em L\*, leste, RhB

	0°	45°	90°
0°		NS	NS
45°	NS		NS
90°	NS	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

Visualizando-se o efeito associado da inclinação e do teor de  $\text{TiO}_2$  sobre a refletância (figura 87), é possível verificar que as argamassas que contém dióxido de titânio apresentam valores médios de  $L^*$  bastante próximos, para as inclinações em estudo. A argamassa de referência, por sua vez, indica maior variação nos dados conforme a exposição segundo as diferentes inclinações.

Figura 87 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de TiO<sub>2</sub> em L\*, leste, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

### 5.3.2.3 Orientação sul

A análise de variância para a orientação sul é apresentada na tabela 37, na qual é possível verificar que os três fatores controláveis em estudo exercem influência significativa sobre a variação de cor. A interação de segunda ordem entre idade e inclinação, por sua vez, não o exercem, assim como a interação de terceira ordem.

Tabela 37 – Análise de variância sul ( $\Delta E$ ), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	3.845,27	8,00	480,66	38,02	0,00%	S
Inclinação	380,39	2,00	190,20	15,04	0,00%	S
Teor	5.095,65	3,00	1.698,55	134,36	0,00%	S
Idade*Inclinação	158,15	16,00	9,88	0,78	70,27%	NS
Idade*Teor	2.282,70	24,00	95,11	7,52	0,00%	S
Inclinação*Teor	492,49	6,00	82,08	6,49	0,00%	S
Idade*Inclinação*Teor	310,23	48,00	6,46	0,51	99,48%	NS
Erro	1.365,35	108,00	12,64	-	-	-

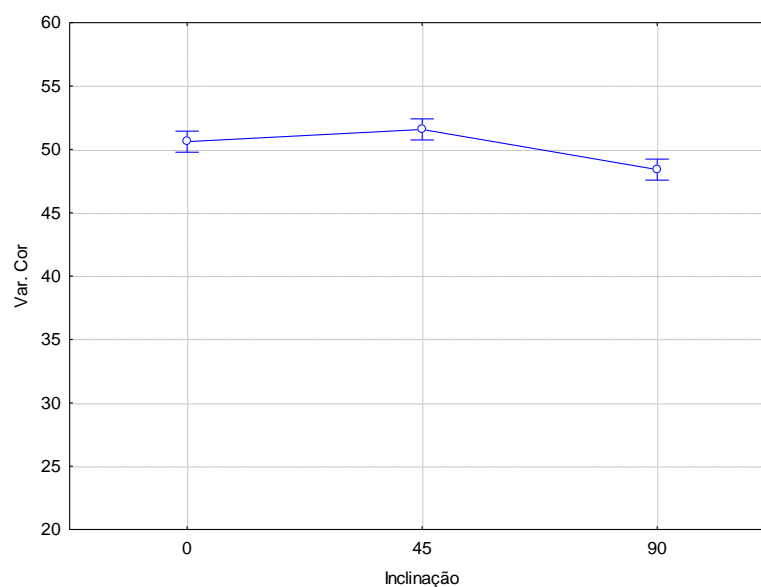
SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

(fonte: elaborado pelo autor)

Na análise do efeito isolado sobre a variável de resposta (figura 88), tem-se que a inclinação de 45° obteve o maior valor de  $\Delta E$ , seguidamente da inclinação à 0° e, mais distante, à 90°. O

teste de Duncan indica que as inclinações 0° e 45° são estatisticamente iguais, ao passo que a inclinação de 90° é estatisticamente diferente de ambas, conforme aponta a tabela 38.

Figura 88 – ANOVA efeito da inclinação em  $\Delta E$ , sul, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 38 – Teste de Duncan para a inclinação em  $\Delta E$ , sul, RhB

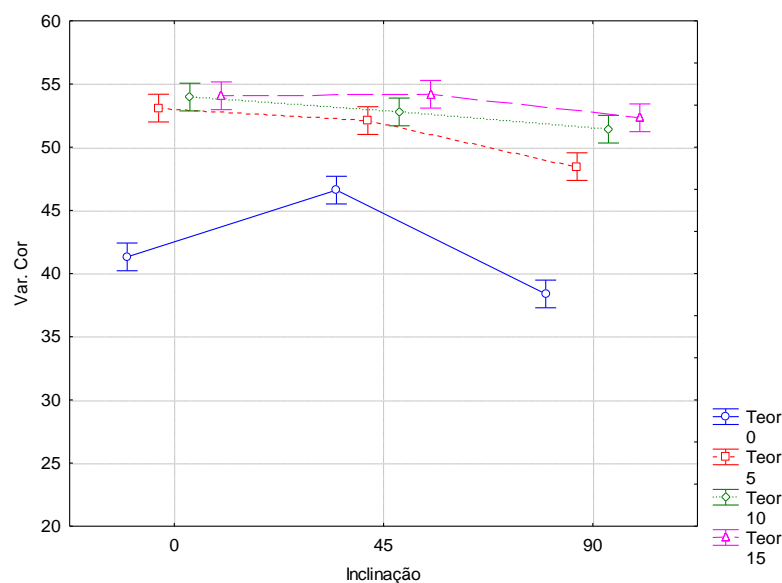
	0°	45°	90°
0°		NS	S
45°	NS		S
90°	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

O efeito da interação entre inclinação e teor de  $\text{TiO}_2$  é apresentado na figura 89, a partir da qual verifica-se que a variação dentre os valores médios de variação de cor é maior para a argamassa de referência. Para as fotocatalíticas, há maior variação em  $\Delta E$  com o aumento da inclinação de exposição.

Na análise de variância para a refletância (tabela 39), observa-se que todos os fatores controláveis propostos são estatisticamente significativos, bem como suas interações de segunda ordem. Já a interação de terceira não exerce influência significativa sobre a variável de resposta.

Figura 89 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de TiO<sub>2</sub> em ΔE, sul, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Conforme ilustrado na figura 90, é possível verificar que, considerando-se o efeito isolado da inclinação sobre a refletância, aquelas amostras expostas a 45° apresentaram maior luminosidade, com valores próximo de L\* para 0° e 90°. A comparação de médias pelo teste do Duncan indica, portanto, que as três inclinações propostas são estatisticamente iguais entre si, conforme observado na tabela 40.

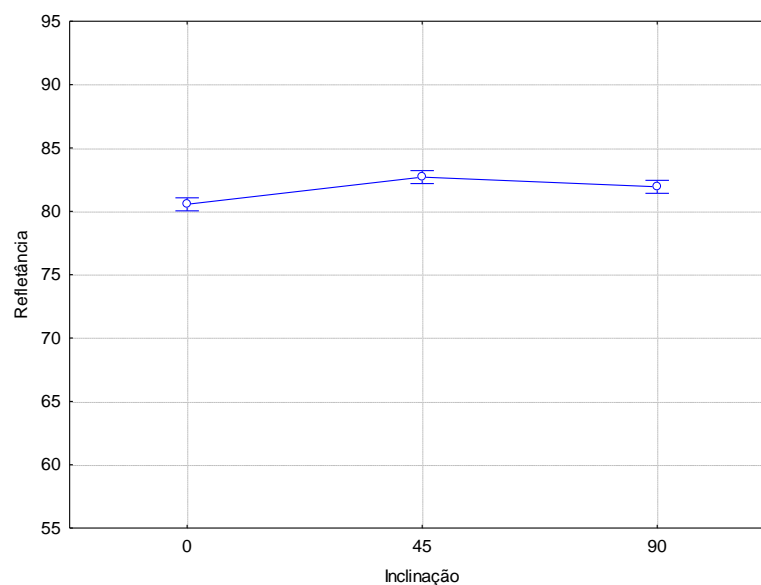
Tabela 39 – Análise de variância sul (L\*), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	5.674,33	9,00	630,48	117,49	0,00%	S
Inclinação	189,61	2,00	94,81	17,67	0,00%	S
Teor	3.700,41	3,00	1.233,47	229,85	0,00%	S
Idade*Inclinação	367,39	18,00	20,41	3,80	0,00%	S
Idade*Teor	876,23	27,00	32,45	6,05	0,00%	S
Inclinação*Teor	320,14	6,00	53,36	9,94	0,00%	S
Idade*Inclinação*Teor	280,19	54,00	5,19	0,97	54,58%	NS
Erro	643,96	120,00	5,37	-	-	-

SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 90 –ANOVA efeito da inclinação em L\*, sul, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

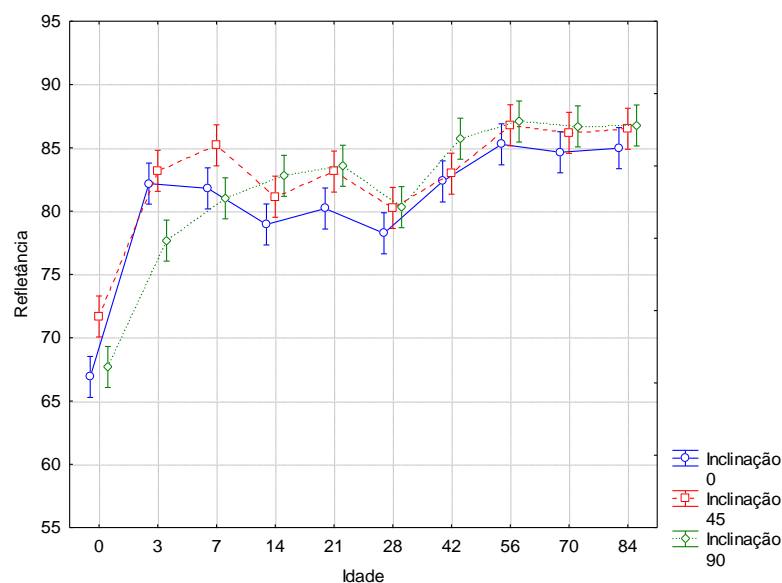
Tabela 40 – Teste de Duncan para a inclinação em L\*, sul, RhB

	0°	45°	90°
0°		NS	NS
45°	NS		NS
90°	NS	NS	

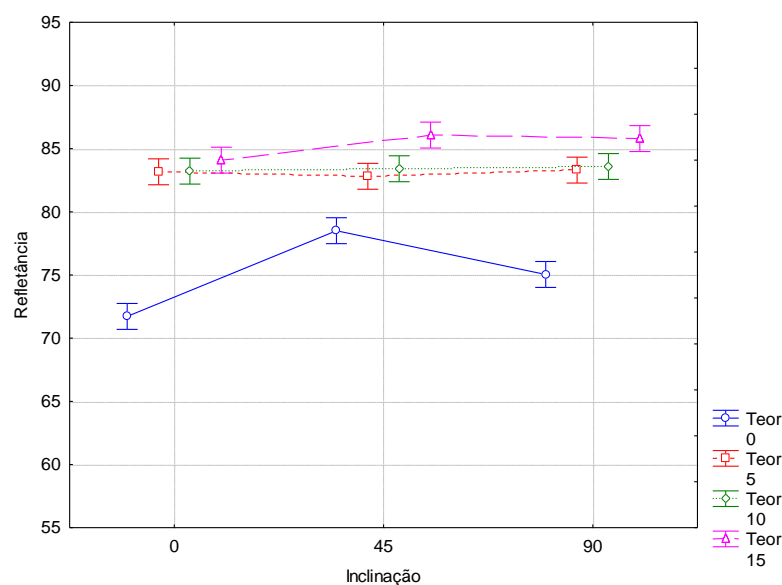
(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme a figura 91, pelo efeito da interação entre idade e inclinação sobre L\*, as inclinações em estudo apresentam comportamentos bastante semelhantes ao longo do período de exposição. Já para o efeito associado inclinação e teor de TiO<sub>2</sub>, as argamassas fotocatalíticas indicaram valores de L\* médio próximos, enquanto que para a de referência há variação entre as inclinações propostas.

Figura 91 – ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em L\*, sul, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Figura 92 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de TiO<sub>2</sub> em L\*, sul, RhB

(fonte: STATISTICA 7)

#### 5.3.2.4 Orientação oeste

Na tabela 41, está exposto o resumo da análise de variância para a orientação oeste, em relação à variação de cor. Nela, é possível verificar que todos os fatores controláveis existentes para o caso exercem influência significativa sobre a variável de resposta. O mesmo ocorre para as interações de segunda e terceira ordens.

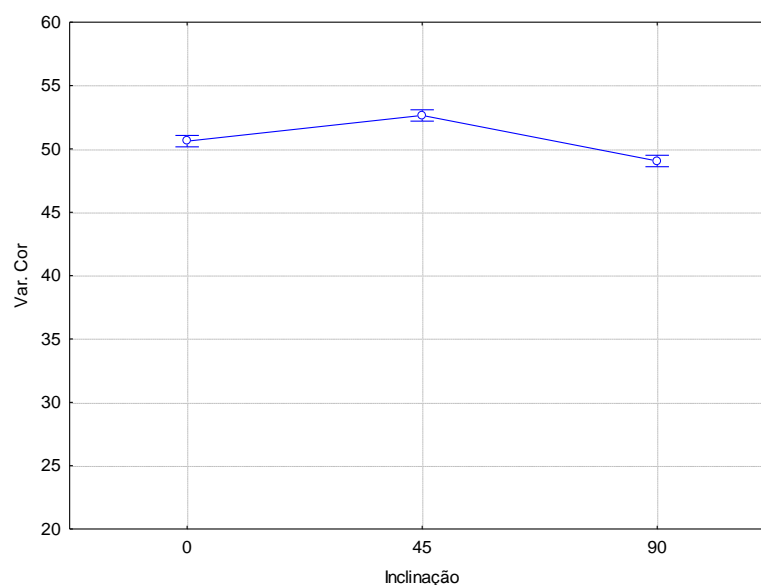
Tabela 41 – Análise de variância oeste ( $\Delta E$ ), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	4.383,81	8,00	547,98	148,08	0,00%	S
Inclinação	468,05	2,00	234,03	63,24	0,00%	S
Teor	1.973,61	3,00	657,87	177,77	0,00%	S
Idade*Inclinação	949,61	16,00	59,35	16,04	0,00%	S
Idade*Teor	834,90	24,00	34,79	9,40	0,00%	S
Inclinação*Teor	623,04	6,00	103,84	28,06	0,00%	S
Idade*Inclinação*Teor	537,37	48,00	11,20	3,03	0,00%	S
Erro	399,67	108,00	3,70	-	-	-

SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando-se o efeito isolado da inclinação, conforme apresentado no gráfico da figura 93, tem-se que a inclinação à 45° proporcionou a maior alteração de cor, seguidamente da inclinações 0° e 90°, respectivamente. Tendo em vista a comparação múltipla de médias, o teste de Duncan (tabela 42) realizado indica que a inclinação de 0° é estatisticamente igual tanto a 45° quanto a 90°. A inclinação de 45°, para este caso, apresenta comportamento estatístico igual à 0°, porém diferente à 90°.

Figura 93 –ANOVA efeito da inclinação em  $\Delta E$ , oeste, RhB

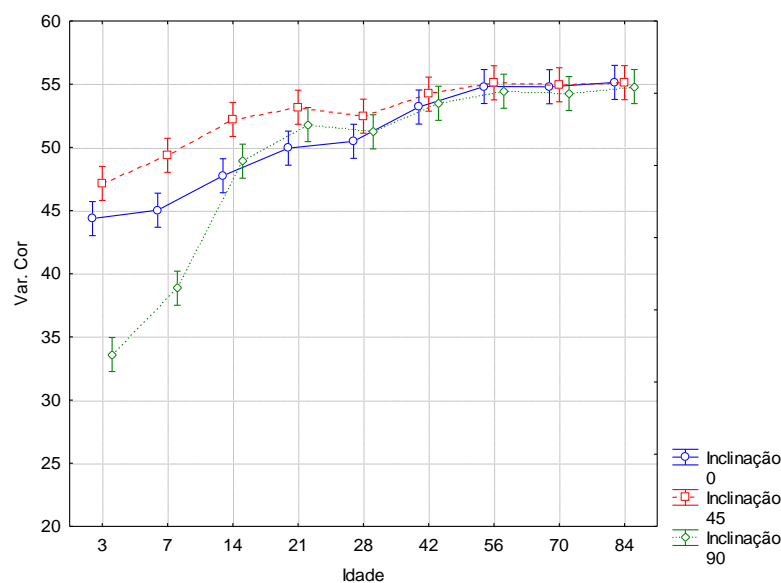
(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 42 – Teste de Duncan para a inclinação em  $\Delta E$ , oeste, RhB

	0°	45°	90°
0°		NS	NS
45°	NS		S
90°	NS	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

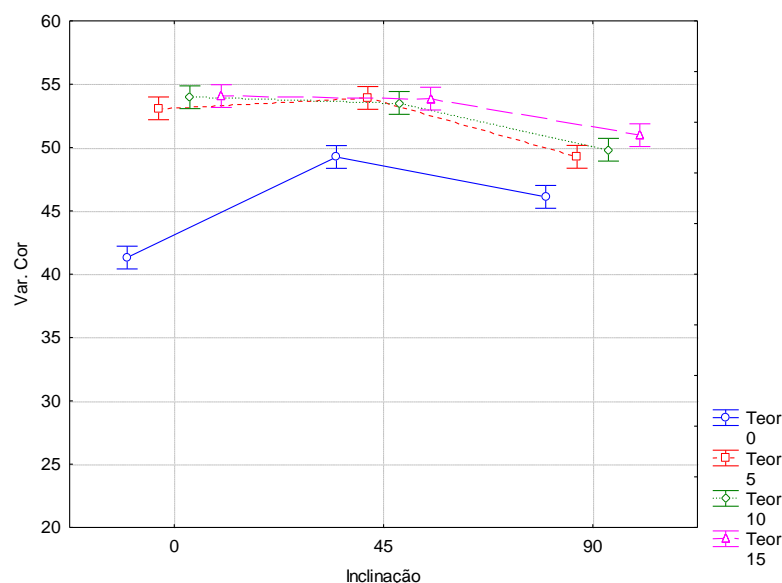
A interação entre idade e inclinação sobre  $\Delta E$  é ilustrada na figura 94, a partir da qual observa-se que a inclinação de 45° apresenta os valores médios mais elevados para a variável de resposta, sendo que as demais inclinações necessitariam de um maior período de tempo para atingir os valores verificados para 45°. Já na figura 95, tem-se o efeito associado entre inclinação e teor, indicando que para as diferentes inclinações em estudo as argamassas 5%, 10% e 15% apresentam comportamentos semelhantes. Já para a argamassa 0%, a inclinação de 45° é aquela que apresenta maiores valores médios de  $\Delta E$ .

Figura 94 – ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em  $\Delta E$ , oeste, RhB

(fonte: STATISTICA 7)



Figura 95 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de  $\text{TiO}_2$  em  $\Delta E$ , oeste, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Já a tabela 43 resume a análise de variância para a refletância ( $L^*$ ), a qual indica que são significativos todos os fatores controláveis e suas interações de segunda ordem. No entanto, a interação de terceira ordem não se mostrou significativamente influente sobre a variável de resposta em questão.

Pela análise de efeito isolado, tem-se que a inclinação de  $45^\circ$  apresenta maior luminosidade em relação às demais, conforme observado na figura 96. A seguir, tem-se a inclinação de  $90^\circ$  e  $0^\circ$ , nesta ordem.

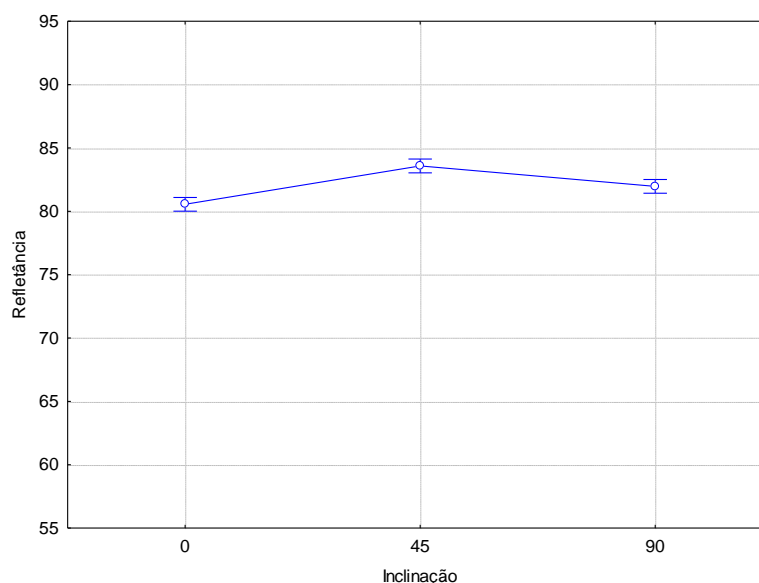
Tabela 43 – Análise de variância oeste ( $L^*$ ), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	6.577,72	9,00	730,86	121,35	0,00%	S
Inclinação	367,27	2,00	183,63	30,49	0,00%	S
Teor	2.132,29	3,00	710,76	118,01	0,00%	S
Idade*Inclinação	472,08	18,00	26,23	4,35	0,00%	S
Idade*Teor	351,96	27,00	13,04	2,16	0,24%	S
Inclinação*Teor	604,96	6,00	100,83	16,74	0,00%	S
Idade*Inclinação*Teor	413,47	54,00	7,66	1,27	14,08%	NS
Erro	722,73	120,00	6,02	-	-	-

SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 96 –ANOVA efeito da inclinação em L\*, oeste, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Pelo teste de Duncan, exposto na tabela 44, verifica-se que a inclinação de 0° é, estatisticamente, igual à de 90° e diferente à de 45°. Pela mesma análise, as inclinações de 45° e 90° apresentam comportamentos estatísticos iguais.

A figura 97 ilustra o efeito associado entre idade e inclinação sobre a refletância. É possível verificar que as inclinações de 0° e 90° demandam de maior tempo para atingir os valores médios de L\* observados para 45°: a inclinação de 90° se aproxima de L\* referente a 45° aos 14 dias de exposição, enquanto que, para a inclinação de 0°, o mesmo ocorre somente aos 56 dias.

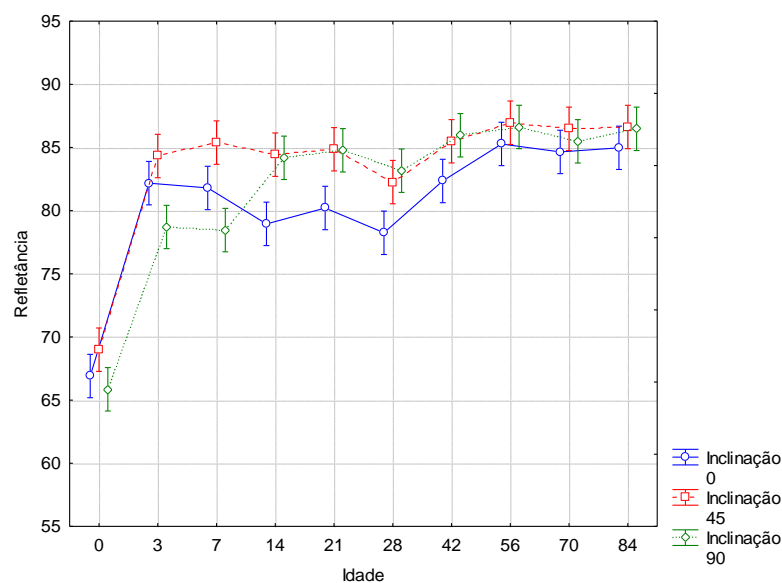
Tabela 44 – Teste de Duncan para a inclinação em L\*, oeste, RhB

	0°	45°	90°
0°		S	NS
45°	S		NS
90°	NS	NS	

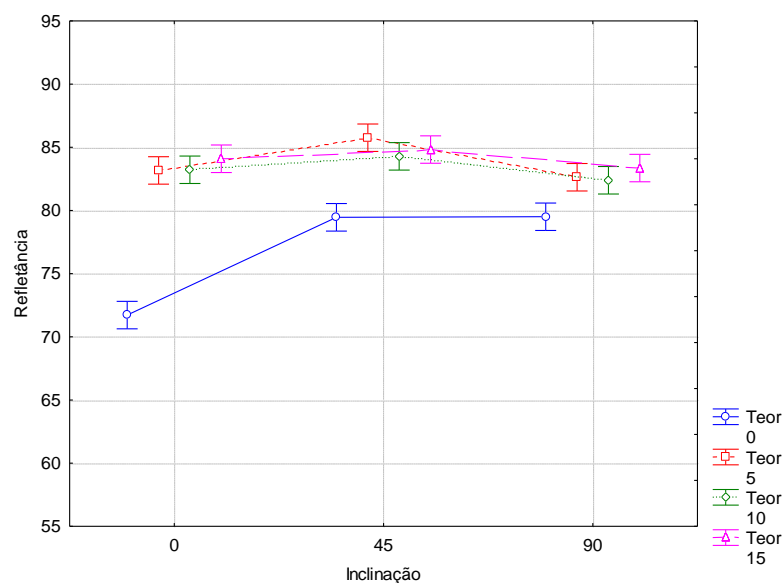
(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 98, tem-se o efeito da interação entre idade e inclinação sobre a refletância, sendo possível visualizar que a argamassa de referência apresenta a maior variação nos valores médios de L\* para as inclinações utilizadas para exposição das amostras.

Figura 97 – ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em L\*, oeste, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Figura 98 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de TiO<sub>2</sub> em L\*, oeste, RhB

(fonte: STATISTICA 7)

### 5.3.3 Métodos de aplicação – RhB

A análise de variância (ANOVA) é apresentada na tabela 45, a partir da qual é possível observar que todos os fatores controláveis deste tratamento estatístico atuam de maneira significativa sobre a variação de cor. Em relação às interações de segunda ordem, duas fontes

apresentam-se como significativas, ao passo que a de terceira ordem é tida como não significativa.

Tabela 45 – Análise de variância métodos ( $\Delta E$ ), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	209,39	8,00	26,17	23,06	0,00%	S
Método	272,01	2,00	136,01	119,82	0,00%	S
Teor	9,95	2,00	4,97	4,38	1,56%	S
Idade*Método	39,57	16,00	2,47	2,18	1,20%	S
Idade*Teor	7,22	16,00	0,45	0,40	97,95%	NS
Método*Teor	14,30	4,00	3,58	3,15	1,85%	S
Idade*Método*Teor	25,55	32,00	0,80	0,70	86,68%	NS
Erro	91,94	81,00	1,14	-	-	-

SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 99 ilustra o efeito isolado do método de aplicação do  $\text{TiO}_2$  em relação à variável de resposta ( $\Delta E$ ). É possível verificar uma maior variação de cor para as coberturas fotocatalíticas de pasta (em torno de 5% superior), quando comparada à cobertura de argamassa e ao uso do  $\text{TiO}_2$  incorporado às misturas, os quais se mostraram praticamente equivalentes.

Da mesma forma, a comparação de médias pelo teste de Duncan (tabela 46) indica que não há diferença significativa entre o uso do  $\text{TiO}_2$  incorporado às argamassas e a sua aplicação como cobertura de argamassa. Por outro lado, a aplicação sob a forma de cobertura de pasta é estatisticamente diferente às demais aplicações.

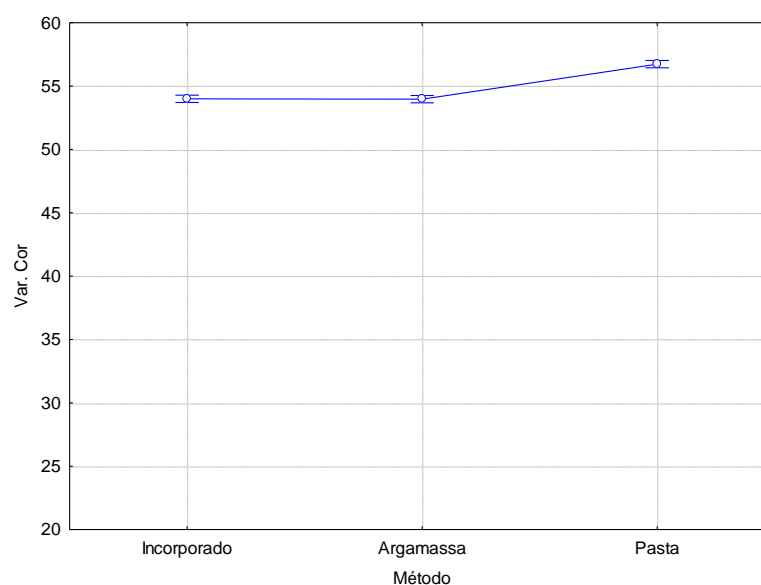
Tal comportamento vai ao encontro do que fora apresentado por Ruot et al. (2009), os quais indicaram uma atividade fotocatalítica maior para as pastas contendo  $\text{TiO}_2$ , na comparação a argamassas fotocatalíticas. Este melhor desempenho pode ser justificado pela maior quantidade de partículas de  $\text{TiO}_2$  que permanecem na superfície das pastas (quando comparadas às argamassas), e, portanto, apresentam maior facilidade para ativação do mecanismo autolimpante pela incidência da radiação ultravioleta.

Ruot (2009) atribui a menor atividade fotocatalítica das argamassas – em relação às pastas, devido ao uso de areia em sua composição, já que a presença do agregado miúdo implica em uma incidência apenas parcial da radiação UV sobre as partículas de  $\text{TiO}_2$  da superfície. Complementarmente, Maury-Ramirez et al. (2012) indicam que a aplicação do  $\text{TiO}_2$  sob a

forma de cobertura é uma alternativa atraente dado que os revestimentos estão em contato direto com os poluentes e fótons.

Por outro lado, Pereira et al. (2009) e Hüsken et al. (2009) indicam que superfícies mais lisas – assim como as pastas, apresentam atividade fotocatalítica inferior à de superfícies mais rugosas. No caso das argamassas, a presença de areia no traço leva a uma rugosidade superficial mais elevada, o que proporcionaria uma maior área disponível para ativação do mecanismo de autolimpeza.

Figura 99 – ANOVA efeito dos métodos de aplicação em  $\Delta E$ , RhB



(fonte: STATISTICA 7)

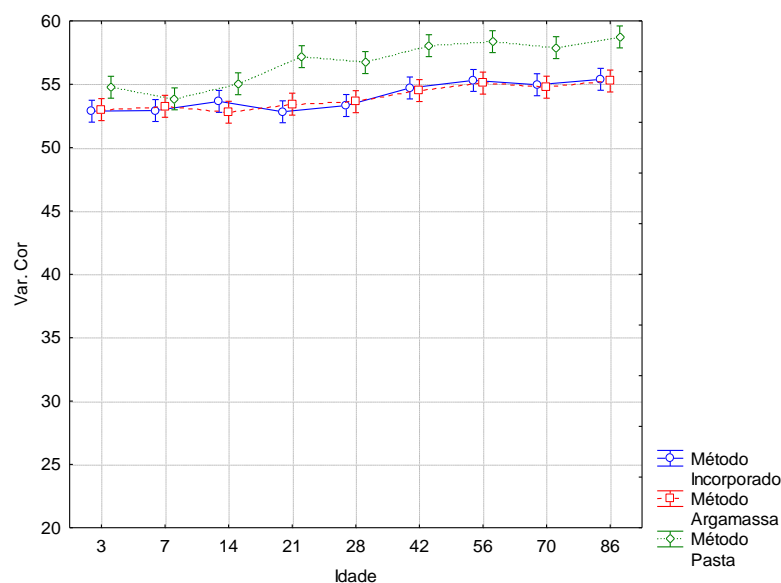
Tabela 46 – Teste de Duncan para o método de aplicação do  $TiO_2$  em  $\Delta E$ , RhB

	Incorporado	Argamassa	Pasta
Incorporado		NS	S
Argamassa	NS		S
Pasta	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando-se o efeito da interação entre idade de exposição e método de aplicação sobre  $\Delta E$  (figura 100), nota-se que o uso do dióxido de titânio incorporado à mistura ou aplicado sob a forma de cobertura de argamassa não apresentaram grandes variações ao longo do tempo. Já na aplicação como cobertura de pasta, é possível uma maior elevação na variação de cor a partir dos 14 dias de exposição.

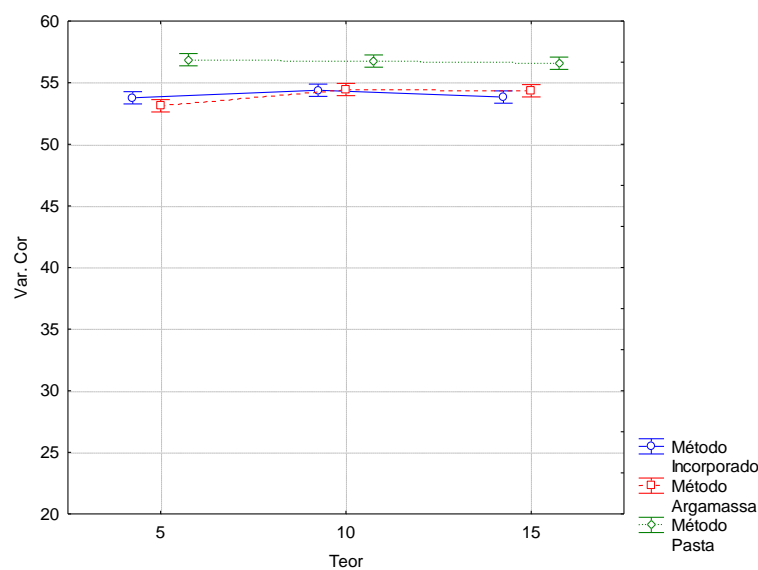
Figura 100 – ANOVA efeito da interação entre idade e método de aplicação em  $\Delta E$ , RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Em relação ao efeito associado do teor e dos métodos de aplicação (figura 101), percebe-se que, independentemente do teor de  $\text{TiO}_2$  utilizado em cada tipo de aplicação, os valores médios de  $\Delta E$  se mantiveram muito próximos. Desta forma, pode-se inferir que um percentual de 5% de dióxido de titânio (em relação à massa de cimento) seria a melhor escolha em termos de custos e eficiência de autolimpeza.

Figura 101 – ANOVA efeito da interação entre teor de  $\text{TiO}_2$  e método de aplicação em  $\Delta E$ , RhB



(fonte: STATISTICA 7)

Para a refletância ( $L^*$ ), a análise de variância (tabela 47) aponta que os três fatores controláveis propostos exercem influência significativa sobre a variável de resposta. As interações de maiores ordens apresentam-se de maneira não significativa, à exceção da interação entre método e teor de  $TiO_2$ .

Tabela 47 – Análise de variância métodos ( $L^*$ ), RhB

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	2.511,49	9,00	279,05	42,26	0,00%	S
Método	1.402,96	2,00	701,48	106,22	0,00%	S
Teor	122,01	2,00	61,01	9,24	0,02%	S
Idade*Método	115,38	18,00	6,41	0,97	49,98%	NS
Idade*Teor	56,48	18,00	3,14	0,48	96,25%	NS
Método*Teor	93,15	4,00	23,29	3,53	1,01%	S
Idade*Método*Teor	192,83	36,00	5,36	0,81	75,68%	NS
Erro	594,36	90,00	6,60	-	-	-

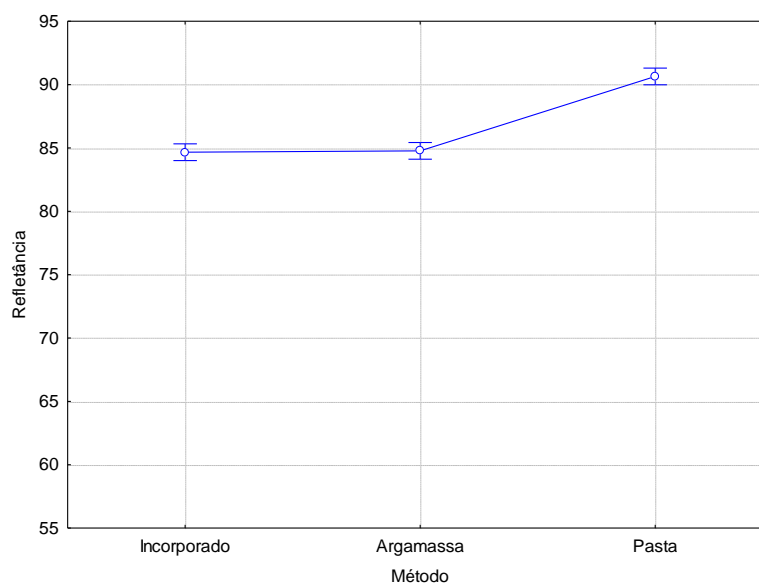
SQ: soma quadrada | GDL: graus de liberdade | MQ: média quadrada | Prob.: probabilidade | SIG: significância

(fonte: elaborado pelo autor)

Na análise do efeito isolado (figura 102), o valor de refletância para a cobertura de pasta apresenta-se próximo ao limite superior do eixo de luminosidade do sistema CIELab, que varia entre 0 e 100. Os demais métodos de aplicação do  $TiO_2$  – cobertura de argamassa ou incorporado à argamassa, apresentaram valores médios de refletância muito próximos, estando a refletância média das coberturas de pasta em torno de 7,1% superior a eles.

Tal fato pode ser creditado à maior proporção de dióxido de titânio presente nas pastas, quando comparadas às argamassas (já que esta possui o agregado miúdo como componente adicional). Logo, uma vez que o  $TiO_2$  apresenta elevada refração (conferindo cor branca), a luminosidade para as coberturas de pasta se manifesta de maneira mais intensa.

Figura 102 –ANOVA efeito dos métodos de aplicação em L\*, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

O teste de Duncan da tabela 48 revela que as aplicações do  $\text{TiO}_2$  junto à mistura ou como cobertura de argamassa apresentam comportamento estatístico iguais, enquanto que a aplicação como cobertura de pasta é estatisticamente diferente das demais.

Tabela 48 – Teste de Duncan para o método de aplicação do  $\text{TiO}_2$  em L\*, RhB

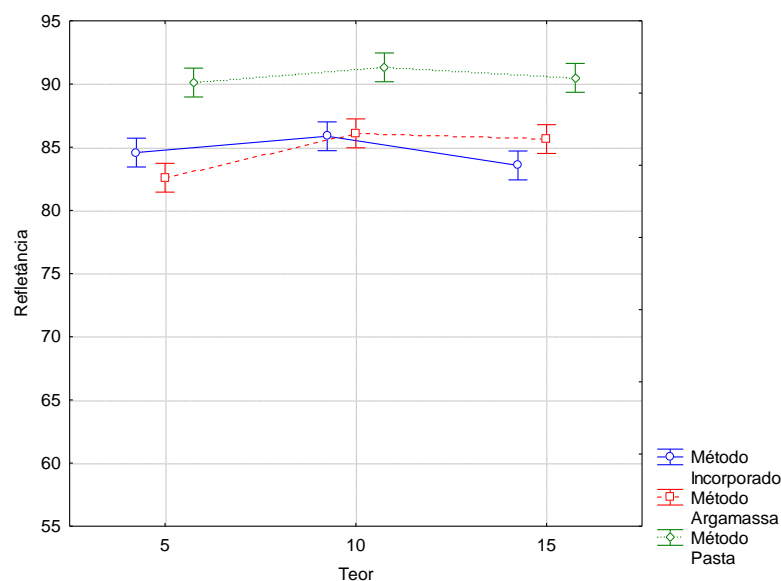
	Incorporado	Argamassa	Pasta
Incorporado		NS	S
Argamassa	NS		S
Pasta	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

Pela figura 103, observa-se que o teor de 10% apresentou o maior brilho das amostras, independentemente do método de aplicação do  $\text{TiO}_2$ . No entanto, em geral, os três métodos utilizados apresentaram pouca variação nos valores de refletância para os diferentes teor utilizados.



Figura 103 – ANOVA efeito da interação entre teor e método de aplicação em L\*, RhB



(fonte: STATISTICA 7)

### 5.3.4 Análise geral – cinzas

A tabela 49 resume a análise de variância realizada para os dados de variação de cor ( $\Delta E$ ), indicando que são estatisticamente significativos os fatores controláveis propostos – à exceção da orientação solar. Para as interações de segunda ordem, exercem influência significativa sobre a variável de resposta aquelas referentes à idade e inclinação, orientação e inclinação, e inclinação e teor de  $\text{TiO}_2$ . As interações de ordem mais alta não exercem influência significativa.

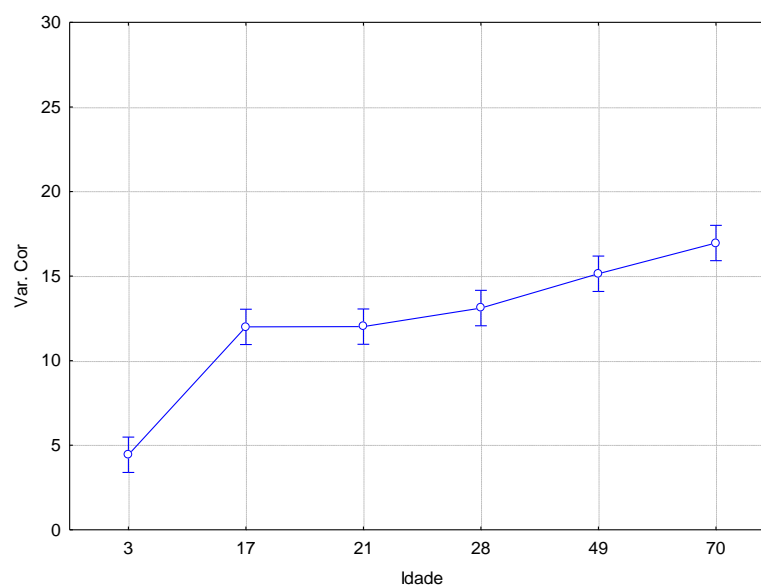
A figura 104 ilustra o efeito isolado da idade de exposição na variação de cor. É possível observar que, em geral, os valores médios de  $\Delta E$  aumentaram ao longo do tempo (exceto no período entre 17 e 21 dias). Dentre os períodos avaliados, houve maior acréscimo em  $\Delta E$  entre 3 e 17 dias de exposição – aproximadamente 60,4% da variação de cor total observada ao longo do estudo.

O teste de Duncan da tabela 50 apresenta a comparação múltipla de médias para a idade de exposição, na qual tem-se que a idade de 3 dias é estatisticamente diferente de todas as demais. As idades de 17, 21 e 28 dias apresentam comportamentos estatisticamente iguais, assim como 49 e 70 dias.

Tabela 49 – Análise de variância geral ( $\Delta E$ ), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
{1}Idade	5914,27	5,00	1182,85	65,88	0,00%	S
{2}Orientação	77,74	3,00	25,91	1,44	23,15%	NS
{3}Inclinação	2430,38	1,00	2430,38	135,36	0,00%	S
{4}Teor	318,18	3,00	106,06	5,91	0,07%	S
Idade*Orientação	184,71	15,00	12,31	0,69	79,67%	NS
Idade*Inclinação	1508,80	5,00	301,76	16,81	0,00%	S
Orientação*Inclinação	420,71	3,00	140,24	7,81	0,01%	S
Idade*Teor	372,54	15,00	24,84	1,38	15,86%	NS
Orientação*Teor	104,04	9,00	11,56	0,64	75,86%	NS
Inclinação*Teor	145,14	3,00	48,38	2,69	4,73%	S
Idade*Orientação*Inclinação	425,83	15,00	28,39	1,58	8,19%	NS
Idade*Orientação*Teor	1111,01	45,00	24,69	1,38	7,37%	NS
Idade*Inclinação*Teor	279,03	15,00	18,60	1,04	42,00%	NS
Orientação*Inclinação*Teor	186,53	9,00	20,73	1,15	32,67%	NS
1*2*3*4	409,78	45,00	9,11	0,51	99,59%	NS
Erro	3447,25	192,00	17,95	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 104 – ANOVA efeito da idade em  $\Delta E$ , cinza

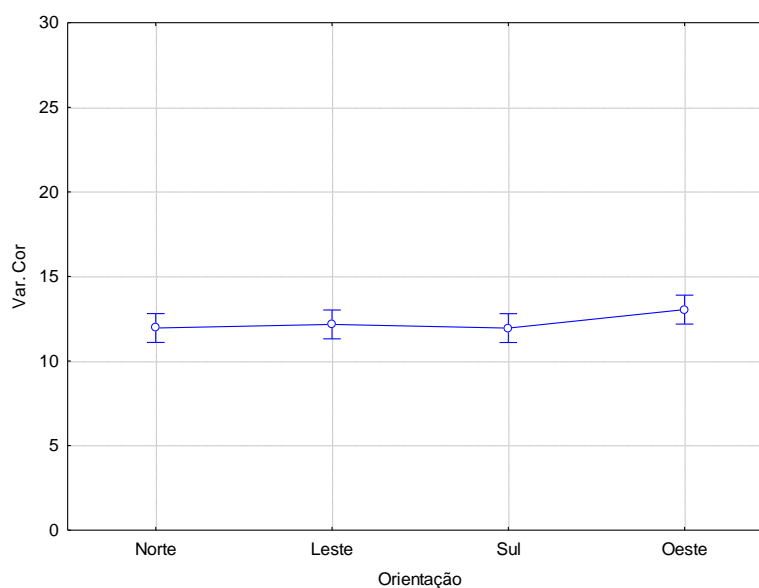
(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 50 – Teste de Duncan para a idade de exposição em  $\Delta E$ , cinza

	3 dias	17 dias	21 dias	28 dias	49 dias	70 dias
3 dias		S	S	S	S	S
17 dias	S		NS	NS	S	S
21 dias	S	NS		NS	S	S
28 dias	S	NS	NS		S	S
49 dias	S	S	S	S		NS
70 dias	S	S	S	S	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

Ao encontro do que fora apontado pela análise de variância e pela figura 105 (no qual apresenta-se o efeito isolado da orientação solar sobre  $\Delta E$ ), o teste de Duncan da tabela 51 indica que todas as orientações propostas neste estudo apresentam comportamentos estatisticamente iguais.

Figura 105 –ANOVA efeito da orientação solar em  $\Delta E$ , cinza

(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 51 – Teste de Duncan para a orientação solar em  $\Delta E$ , cinza

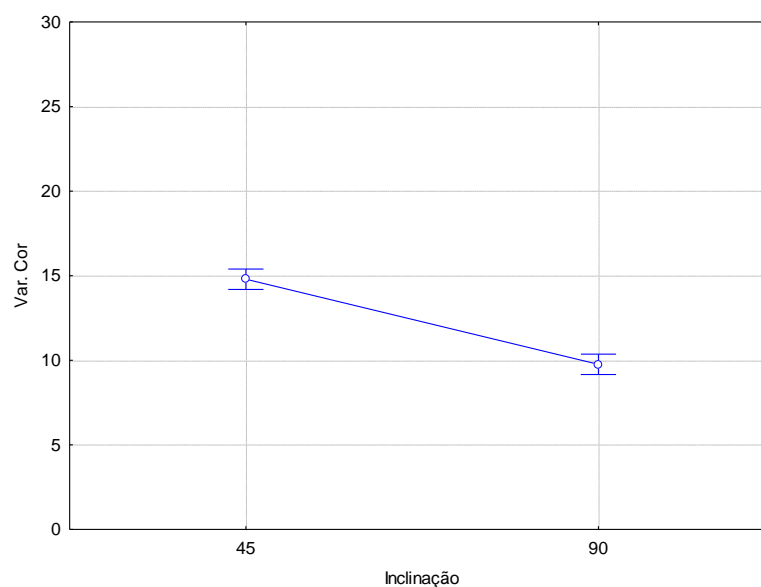
	Norte	Leste	Sul	Oeste
Norte		NS	NS	NS
Leste	NS		NS	NS
Sul	NS	NS		NS
Oeste	NS	NS	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

O efeito da inclinação sobre os valores verificados para a variação de cor é apresentado na figura 106, a partir da qual se pode observar que as amostras inclinadas a 45° apresentam valores médios de  $\Delta E$  superiores às que a 90°. O teste de Duncan (tabela 52) aponta que tal diferença contempla comportamentos estatísticos diferentes entre si.

Na figura 107, apresenta-se o efeito do teor de  $\text{TiO}_2$  em  $\Delta E$ , mostrando o teor de 5% levemente superior aos demais. Pelo teste de Duncan (tabela 53), tem-se que apresentam comportamento estatisticamente distintos os teores de 0% e 5%, enquanto que as demais comparações indicam comportamentos estatisticamente iguais.

Figura 106 – ANOVA efeito da inclinação de exposição em  $\Delta E$ , cinza

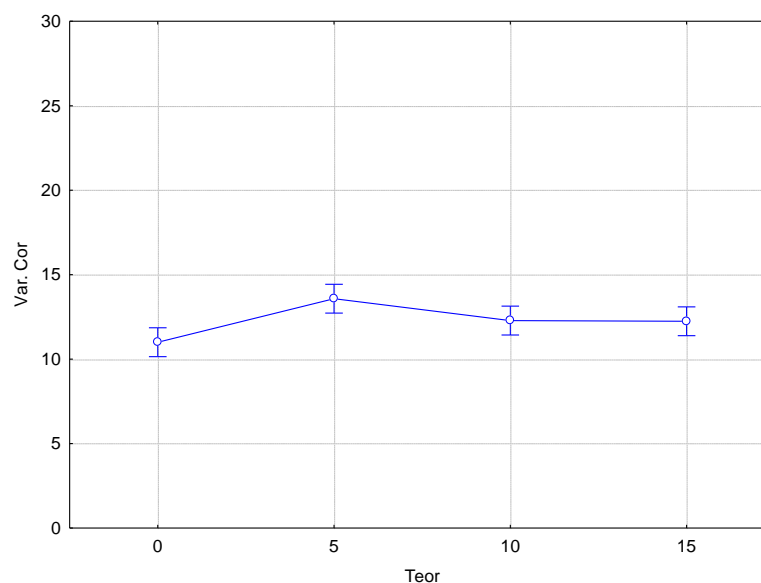


(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 52 – Teste de Duncan para a inclinação de exposição em  $\Delta E$ , cinza

	45°	90°
45°		S
90°	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 107 –ANOVA efeito do teor de TiO<sub>2</sub> em ΔE, cinza

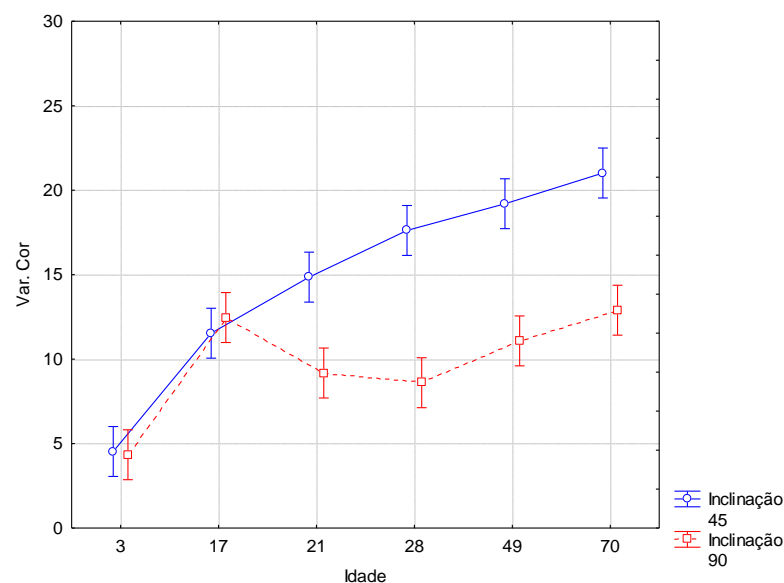
(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 53 – Teste de Duncan para o teor de TiO<sub>2</sub> em ΔE, cinza

	0%	5%	10%	15%
0%		S	NS	NS
5%	S		NS	NS
10%	NS	NS		NS
15%	NS	NS	NS	

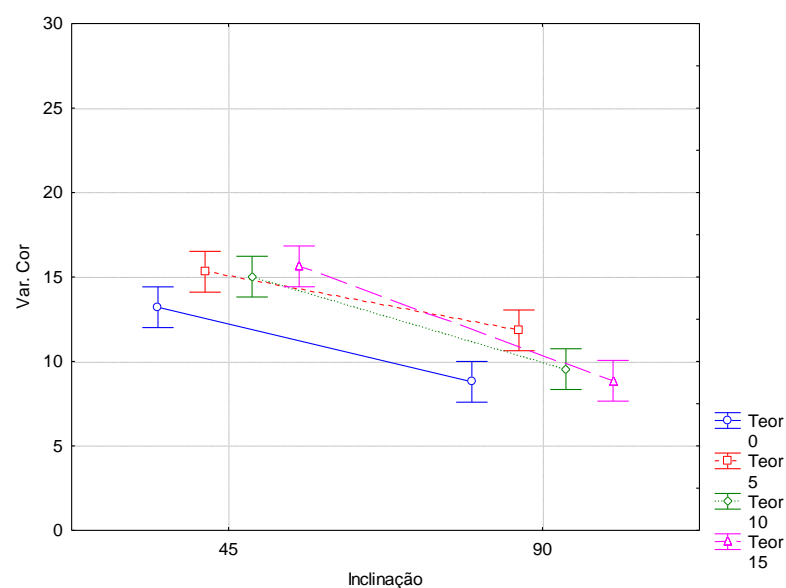
(fonte: elaborado pelo autor)

O efeito associado da idade de exposição e da inclinação sobre a variação de cor é apresentado pela figura 108. A partir desta, é possível observar que aos 3 e aos 17 dias ambas as inclinações em análise apresentaram valores médios para ΔE muito próximos, os quais tendem a afastar-se a partir da idade de 21 dias.

Figura 108 – ANOVA efeito da interação entre idade e inclinação em  $\Delta E$ , cinza

(fonte: STATISTICA 7)

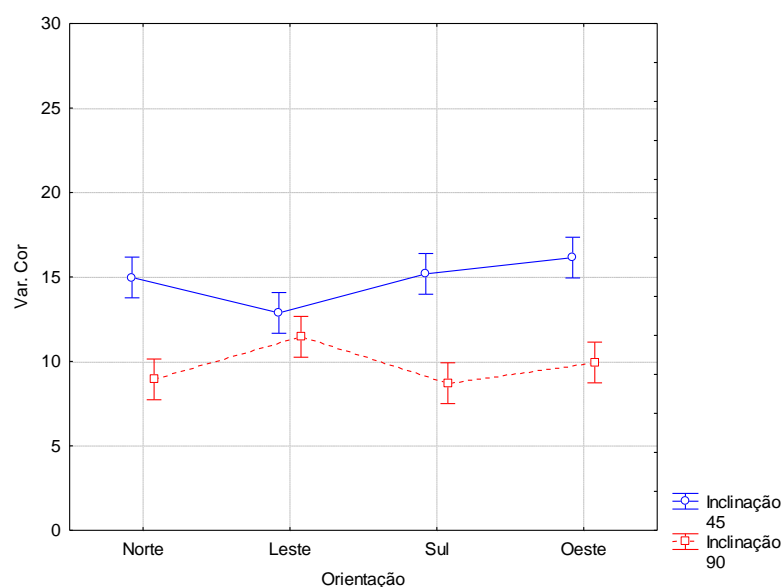
Na interação entre inclinação e teor de  $\text{TiO}_2$  (figura 109), tem-se que, tanto para a inclinação de  $45^\circ$  quanto de  $90^\circ$ , todos os teores de  $\text{TiO}_2$  estudados apresentam valores médios de  $\Delta E$  bastante próximos.

Figura 109 – ANOVA efeito da interação entre inclinação e teor de  $\text{TiO}_2$  em  $\Delta E$ , cinza

(fonte: STATISTICA 7)

Na figura 110, visualiza-se o efeito associado entre orientação solar e inclinação sobre a variável de resposta,  $\Delta E$ . A orientação solar leste apresenta comportamento distinto das demais, indicando não haver evidentes diferenças dentre os valores médios de  $\Delta E$  para as duas inclinações estudadas. Nas demais orientações, as amostras dispostas à 45° apresentam maiores valores de variação de cor, em relação àquelas à 90°, o que pode estar associado à ação mais efetiva das águas de lavagem e a intensidade de radiação UV mais intensa para 45°.

Figura 110 – ANOVA efeito da interação entre orientação e inclinação em  $\Delta E$ , cinza



(fonte: STATISTICA 7)

A tabela 54 apresenta o resumo da análise de variância realizada para a refletância ( $L^*$ ). Tem-se que todos os fatores controláveis exercem influência significativa sobre os resultados observados para esta variável de resposta. Dentre as interações de segunda ordem dos fatores controláveis, não exercem influência significativa: idade e orientação solar, idade e teor de  $TiO_2$ .

Para as interações de terceira ordem, influencia de forma significativa sobre  $L^*$  apenas aquela que contempla idade de exposição, inclinação e teor. A interação de quarta tampouco exerce influência de forma significativa.

Tabela 54 – Análise de variância geral (L\*), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
{1}Idade	24002,37	6,00	4000,40	100,24	0,00%	S
{2}Orientação	412,76	3,00	137,59	3,45	1,75%	S
{3}Inclinação	7858,95	1,00	7858,95	196,92	0,00%	S
{4}Teor	325,16	3,00	108,39	2,72	4,56%	S
Idade*Orientação	212,52	18,00	11,81	0,30	99,80%	NS
Idade*Inclinação	3702,94	6,00	617,16	15,46	0,00%	S
Orientação*Inclinação	1183,26	3,00	394,42	9,88	0,00%	S
Idade*Teor	787,20	18,00	43,73	1,10	35,76%	NS
Orientação*Teor	1691,18	9,00	187,91	4,71	0,00%	S
Inclinação*Teor	629,57	3,00	209,86	5,26	0,16%	S
Idade*Orientação*Inclinação	657,34	18,00	36,52	0,92	56,09%	NS
Idade*Orientação*Teor	782,92	54,00	14,50	0,36	100,00%	NS
Idade*Inclinação*Teor	1284,21	18,00	71,35	1,79	2,79%	S
Orientação*Inclinação*Teor	597,26	9,00	66,36	1,66	9,92%	NS
1*2*3*4	1015,30	54,00	18,80	0,47	99,93%	NS
Erro	8939,69	224,00	39,91	-	-	-

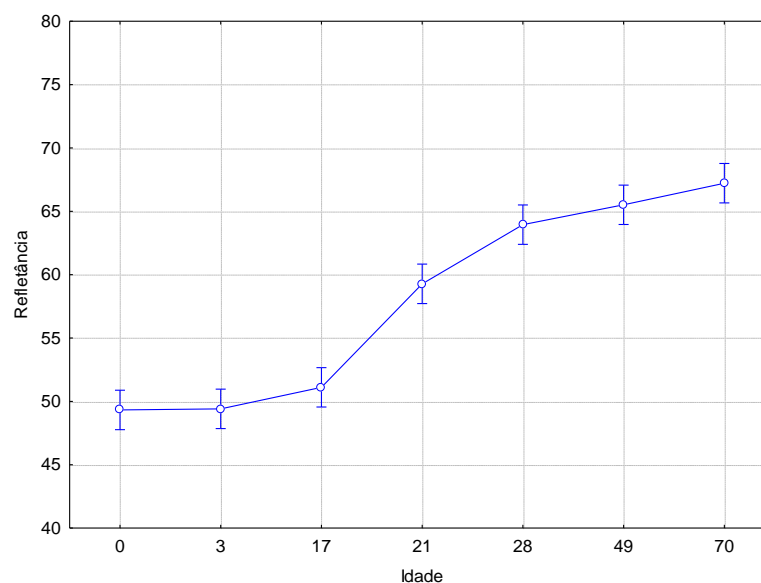
(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 111 apresenta o efeito da idade de exposição sobre a refletância, sendo possível observar que, ao longo do período de exposição, as amostras de argamassa apresentaram aumento no brilho superficial. Dentre as idades avaliadas, verifica-se maior crescimento de L\* entre as idades de 17 e 21 dias (em torno de 45,6% da refletância), dado o elevado volume de precipitação pluviométrica ocorrido ao vigésimo dia de exposição e seu consequente efeito de lavagem.

Pelo teste de Duncan (tabela 55), tem-se que a leitura inicial apresenta comportamento estatístico diferente das demais a partir da idade de 21 dias. Ao final do período, as idades entre 49 e 70 dias apresentam comportamentos estatisticamente iguais.



Figura 111 –ANOVA efeito da idade de exposição em L\*, cinza



(fonte: STATISTICA 7)

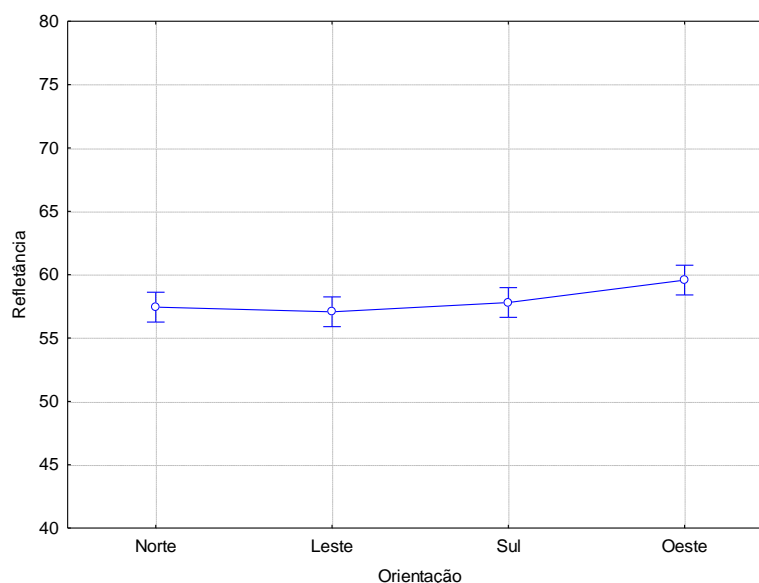
Tabela 55 – Teste de Duncan para a idade de exposição em L\*, cinza

	0 dias	3 dias	17 dias	21 dias	28 dias	49 dias	70 dias
0 dias		NS	NS	S	S	S	S
3 dias	NS		NS	S	S	S	S
17 dias	NS	NS		S	S	S	S
21 dias	S	S	S		S	S	S
28 dias	S	S	S	S		NS	S
49 dias	S	S	S	S	NS		NS
70 dias	S	S	S	S	S	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

O efeito da orientação solar sobre L\* é verificado junto à figura 112, na qual é possível observar que a orientação oeste apresenta valores médios de L\* sutilmente superiores às demais. No entanto, o teste de Duncan (tabela 56) indica que todas as orientações em estudo apresentam comportamentos estatisticamente iguais.

Figura 112 –ANOVA efeito da orientação solar em L\*, cinza



(fonte: STATISTICA 7)

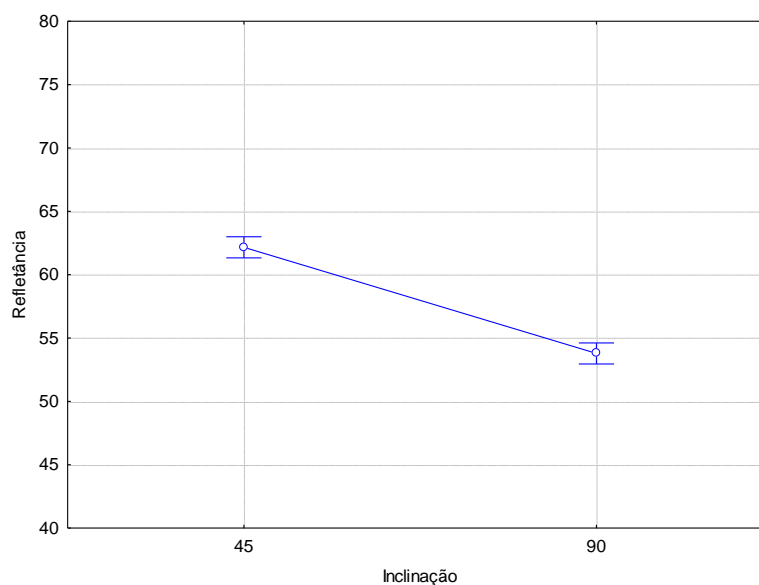
Tabela 56 – Teste de Duncan para a orientação solar em L\*, cinza

	Norte	Leste	Sul	Oeste
Norte		NS	NS	NS
Leste	NS		NS	NS
Sul	NS	NS		NS
Oeste	NS	NS	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 113 ilustra o efeito da inclinação de exposição sobre L\*, sendo possível verificar que as amostras dispostas à 45° de inclinação apresentaram maiores valores médios de refletância em relação àquelas a 90°. Tal verificação está de acordo ao apontado por Pereira et al. (2009), os quais indicaram maior eficácia de autolimpeza para amostras expostas inclinadas. Pode-se considerar que a ação de lavagem da água da chuva se dá de forma mais intensa nesta condição, o que facilita o escoamento da água sobre a superfície e arrasta as partículas contaminantes consigo. Pelo teste de Duncan (tabela 57), há diferença estatística dentre os comportamentos observados.

Figura 113 –ANOVA efeito da inclinação em L\*, cinza



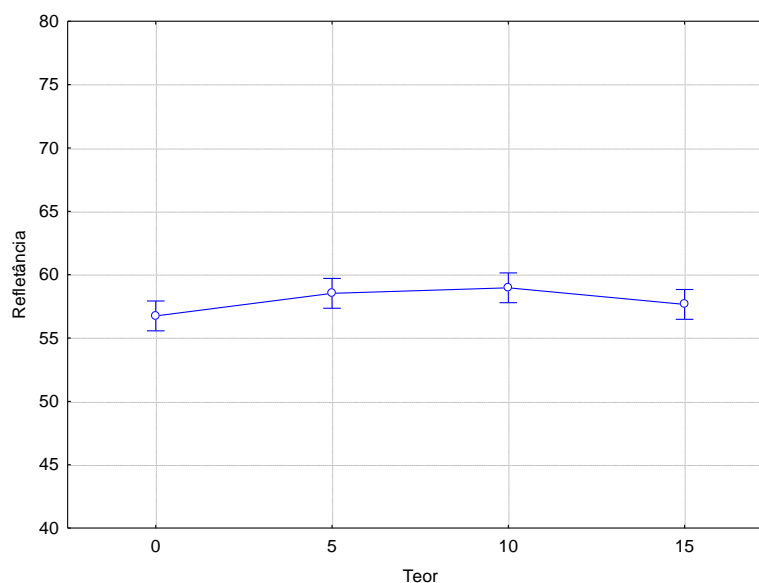
(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 57 – Teste de Duncan para a inclinação de exposição em L\*, cinza

	45°	90°
45°		S
90°	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 114, tem-se o efeito do teor de  $\text{TiO}_2$  aplicado em relação à refletância das amostras. Verifica-se que todos os teores empregados apresentaram valores médios de  $L^*$  muito próximos, havendo sutil superioridade para os valores de 5% e 10% de  $\text{TiO}_2$ . Entretanto, o teste de Duncan revela que todos as adições propostas neste estudo apresentam comportamentos estatisticamente iguais, conforme indica a tabela 58.

Figura 114 –ANOVA efeito do teor de TiO<sub>2</sub> em L\*, cinza

(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 58 – Teste de Duncan para o teor de TiO<sub>2</sub> em L\*, cinza

	0%	5%	10%	15%
0%		NS	NS	NS
5%	NS		NS	NS
10%	NS	NS		NS
15%	NS	NS	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3.5 Inclinação – cinzas

#### 5.3.5.1 Orientação norte

A tabela 59 resume a análise de variância realizada para a orientação norte, relativa à variação de cor. Tem-se que os fatores controláveis propostos atuam significativamente sobre a variável de resposta.

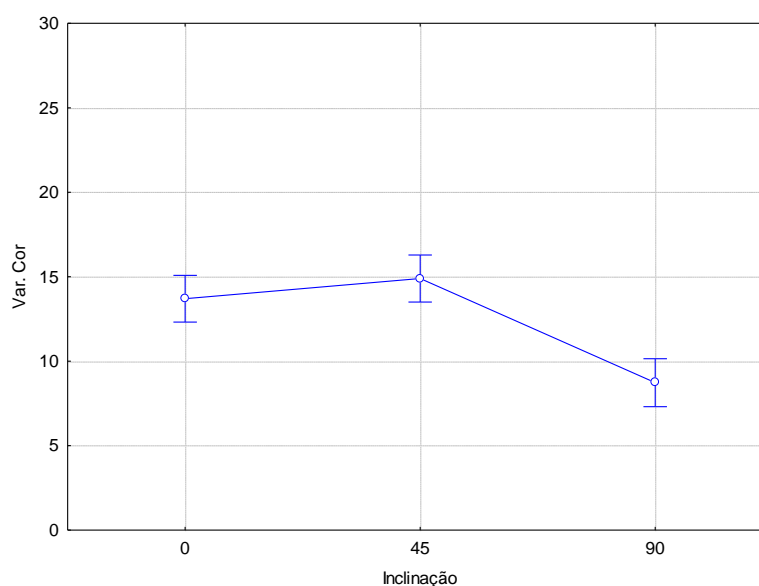
Das interações de ordens mais altas, apenas aquela referente à idade e inclinação exerce influência significativa sobre  $\Delta E$ . As demais, incluindo a de terceira ordem, não exercem influência de forma significativa.

Tabela 59 – Análise de variância norte ( $\Delta E$ ), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	2502,51	5,00	500,50	21,39	0,00%	S
Inclinação	1000,66	2,00	500,33	21,39	0,00%	S
Teor	200,51	3,00	66,84	2,86	4,30%	S
Idade*Inclinação	1170,47	10,00	117,05	5,00	0,00%	S
Idade*Teor	505,88	15,00	33,73	1,44	15,20%	NS
Inclinação*Teor	192,62	6,00	32,10	1,37	23,75%	NS
Idade*Inclinação*Teor	450,24	30,00	15,01	0,64	91,12%	NS
Erro	1684,50	72,00	23,40	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Observando-se o efeito da inclinação na variação de cor, dado pela figura 115, as inclinações de  $0^\circ$  e  $45^\circ$  apresentam valores médios de  $\Delta E$  muito próximos, os quais, por sua vez, são superiores aos verificados para  $90^\circ$ . Pelo teste de Duncan (tabela 60), tem-se que as inclinações horizontal e  $45^\circ$  apresentam comportamento estatisticamente iguais, enquanto que  $90^\circ$  é distinta a ambas.

Figura 115 –ANOVA efeito da inclinação em  $\Delta E$ , norte, cinza

(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 60 – Teste de Duncan para a inclinação norte em  $\Delta E$ , cinza

	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
$0^\circ$		NS	S
$45^\circ$	NS		S
$90^\circ$	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 61 expressa a análise de variância para a refletância, sendo possível observar que, dentre os três fatores controláveis propostos, apenas o teor de  $\text{TiO}_2$  não atua de forma significativa sobre a variável de resposta. Para as ordens mais altas de interação entre os fatores, influenciam significativa sobre  $L^*$  aquelas referentes a idade e inclinação, e inclinação e teor. As demais interações, incluindo a de terceira ordem, não exercem influência significativa sobre a refletância.

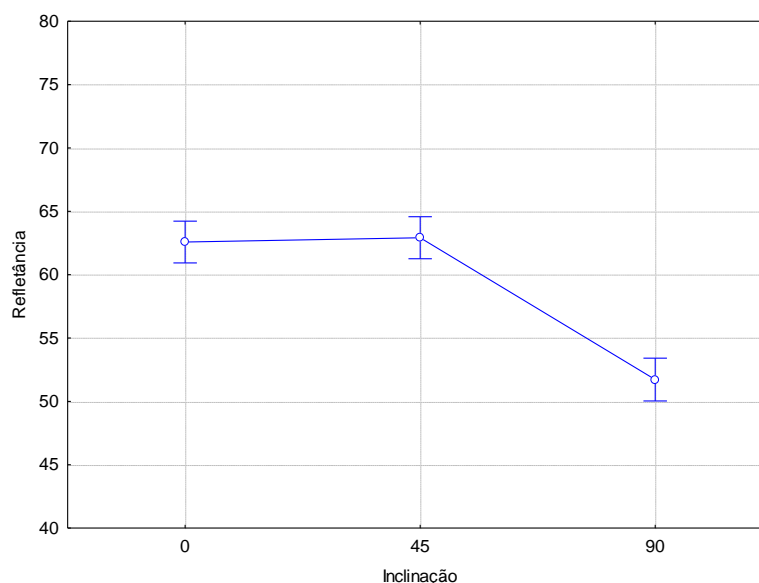
Tabela 61 – Análise de variância norte ( $L^*$ ), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	9281,60	6,00	1546,93	39,75	0,00%	S
Inclinação	4444,03	2,00	2222,02	57,09	0,00%	S
Teor	168,02	3,00	56,01	1,44	23,72%	NS
Idade*Inclinação	1575,80	12,00	131,32	3,37	0,05%	S
Idade*Teor	289,38	18,00	16,08	0,41	98,17%	NS
Inclinação*Teor	760,49	6,00	126,75	3,26	0,63%	S
Idade*Inclinação*Teor	1066,48	36,00	29,62	0,76	81,81%	NS
Erro	3269,27	84,00	38,92	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

O efeito isolado da inclinação em  $L^*$  é apresentado pela figura 116, na qual observam-se valores de refletância muito próximos para  $0^\circ$  e  $45^\circ$ , enquanto que, para a inclinação de  $90^\circ$ , os valores médios verificados são bastante inferiores às demais inclinações. O teste de Duncan (tabela 62) aponta que  $0^\circ$  e  $45^\circ$  apresentam comportamentos estatisticamente iguais, enquanto que  $90^\circ$  é diferente a ambos.

Figura 116 –ANOVA efeito da inclinação em L\*, norte, cinza



(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 62 – Teste de Duncan para a inclinação norte em L\*, cinza

	0°	45°	90°
0°		NS	S
45°	NS		S
90°	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3.5.2 Orientação leste

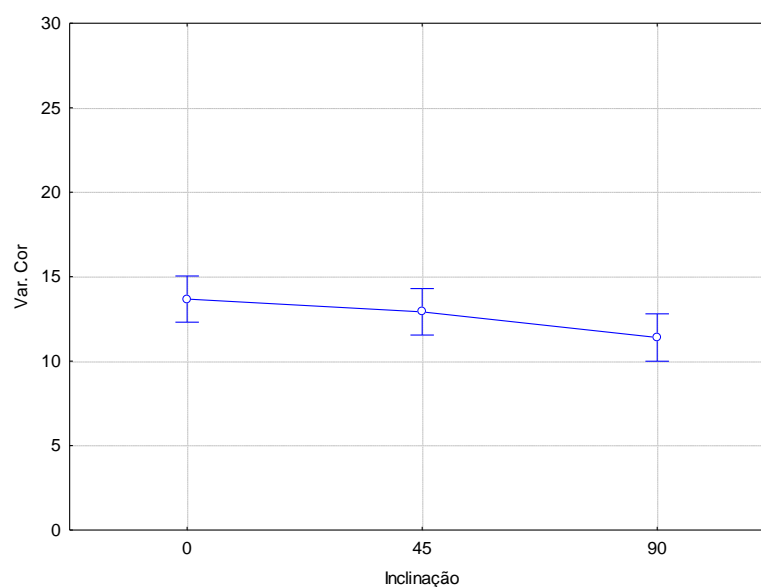
A análise de variância para a variação de cor é resumida na tabela 63, na qual é possível verificar que apenas o fator controlável idade de exposição atua de forma significativa sobre a refletância. As demais, incluindo interações de segunda e terceira ordens, não exercem influência significativa sobre a variável de resposta.

Pelo gráfico da figura 117, que apresenta o efeito isolado da inclinação sobre a variação de cor, são verificados valores médios de  $\Delta E$  muito próximos, os quais são apontados como estatisticamente iguais segundo o teste de Duncan realizado para tais dados (tabela 64).

Tabela 63 – Análise de variância leste ( $\Delta E$ ), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	2733,57	5,00	546,71	23,93	0,00%	S
Inclinação	126,66	2,00	63,33	2,77	6,92%	NS
Teor	116,69	3,00	38,90	1,70	17,42%	NS
Idade*Inclinação	327,56	10,00	32,76	1,43	18,33%	NS
Idade*Teor	339,79	15,00	22,65	0,99	47,34%	NS
Inclinação*Teor	165,59	6,00	27,60	1,21	31,23%	NS
Idade*Inclinação*Teor	496,42	30,00	16,55	0,72	83,59%	NS
Erro	1645,14	72,00	22,85	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 117–ANOVA efeito da inclinação em  $\Delta E$ , leste, cinza

(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 64 – Teste de Duncan para a inclinação leste em  $\Delta E$ , cinza

	0°	45°	90°
0°		NS	NS
45°	NS		NS
90°	NS	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

A análise de variância para a refletância é resumida na tabela 65, sendo possível observar que os fatores controláveis em questão exercem influência significativa sobre a variável de resposta. Entretanto, o mesmo não é verificado para as interações de ordens mais altas (segunda e terceira ordens).



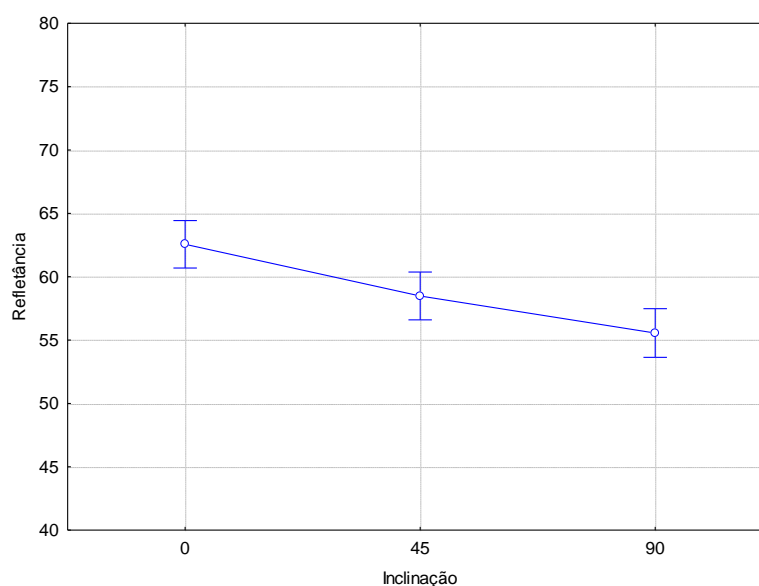
Tabela 65 – Análise de variância leste (L\*), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	10153,10	6,00	1692,18	33,63	0,00%	S
Inclinação	1373,88	2,00	686,94	13,65	0,00%	S
Teor	519,96	3,00	173,32	3,44	2,03%	S
Idade*Inclinação	675,60	12,00	56,30	1,12	35,61%	NS
Idade*Teor	830,24	18,00	46,12	0,92	56,09%	NS
Inclinação*Teor	500,78	6,00	83,46	1,66	14,13%	NS
Idade*Inclinação*Teor	1286,72	36,00	35,74	0,71	87,32%	NS
Erro	4226,23	84,00	50,31	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 118 aponta o efeito isolado da inclinação sobre L\*, indicando que as amostras expostas a 0° apresentam os valores mais elevados para a variável de resposta, seguidamente de 45° e 90°, nesta ordem. É de certa forma surpreendente tal apontamento, uma vez que as amostras dispostas horizontalmente tendem a acumular a água da chuva – dificultando a ação de lavagem e a conseqüente limpeza da superfície (de forma complementar).

Figura 118 –ANOVA efeito da inclinação em L\*, leste, cinza



(fonte: STATISTICA 7)

A comparação múltipla de médias é apresentada na tabela 66, a qual indica que o comportamento verificado para as inclinações de 45° e 90° é estatisticamente igual. Entretanto, ambas são estatisticamente diferentes à 0°.

Tabela 66 – Teste de Duncan para a inclinação leste em L\*, cinza

	0°	45°	90°
0°		S	S
45°	S		NS
90°	S	NS	

(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3.5.3 Orientação sul

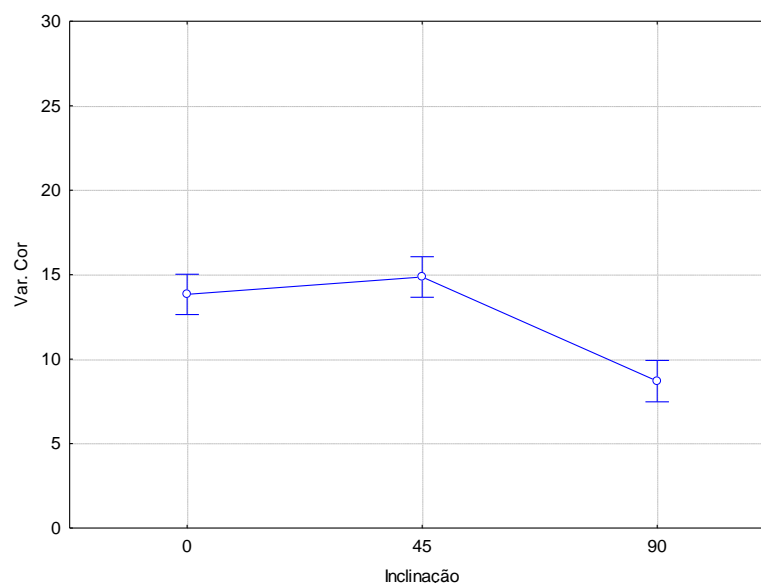
Apresenta-se na tabela 67 o resumo da análise de variância, a partir do qual tem-se que os fatores controláveis propostos exercem influência significativa sobre a variação de cor. No que compete às interações de ordens mais altas (segunda e terceira ordens), apenas aquela que associa idade e inclinação atua significativamente na variável de resposta.

O efeito isolado da inclinação sobre  $\Delta E$  é exposto na figura 119, sendo possível observar que as amostras dispostas à 45° apresentaram as maiores médias desta variável, com valores muito próximos verificados para 0°. Pelo teste de Duncan (tabela 68), tais inclinações podem ser consideradas estatisticamente iguais, ao passo que a de 90° apresenta comportamento estatístico diferente de ambas, já que sua médias para  $\Delta E$  apontam valores bastante inferior às demais (visto pela figura 119).

Tabela 67 – Análise de variância sul ( $\Delta E$ ), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	2736,98	5,00	547,40	31,45	0,00%	S
Inclinação	1020,83	2,00	510,41	29,33	0,00%	S
Teor	180,41	3,00	60,14	3,46	2,08%	S
Idade*Inclinação	867,71	10,00	86,77	4,99	0,00%	S
Idade*Teor	347,92	15,00	23,19	1,33	20,60%	NS
Inclinação*Teor	104,79	6,00	17,46	1,00	42,99%	NS
Idade*Inclinação*Teor	356,16	30,00	11,87	0,68	87,73%	NS
Erro	1253,11	72,00	17,40	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 119 –ANOVA efeito da inclinação em  $\Delta E$ , sul, cinza

(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 68 – Teste de Duncan para a inclinação sul em  $\Delta E$ , cinza

	0°	45°	90°
0°		NS	S
45°	NS		S
90°	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 69 apresenta a análise de variância para a refletância, indicando que os fatores controláveis atuam de forma significativa sobre a variável de resposta. Quanto às interações de segunda ordem, aquelas que associam idade e inclinação, e inclinação e teor também exercem influência significativa sobre  $L^*$ . O mesmo não ocorre para as demais interações apresentadas.

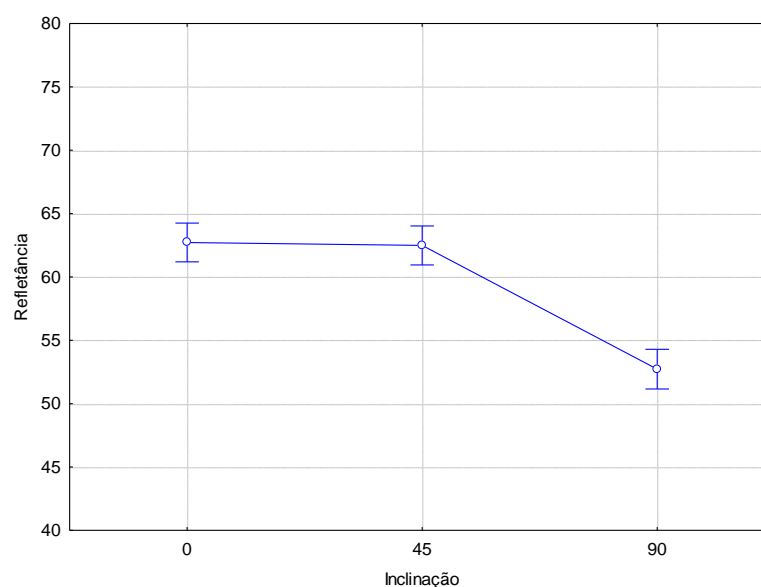
Tabela 69 – Análise de variância sul ( $L^*$ ), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	9552,31	6,00	1592,05	47,49	0,00%	S
Inclinação	3568,12	2,00	1784,06	53,21	0,00%	S
Teor	369,12	3,00	123,04	3,67	1,54%	S
Idade*Inclinação	1635,41	12,00	136,28	4,06	0,01%	S
Idade*Teor	293,66	18,00	16,31	0,49	95,73%	NS
Inclinação*Teor	461,98	6,00	77,00	2,30	4,21%	S
Idade*Inclinação*Teor	628,56	36,00	17,46	0,52	98,45%	NS
Erro	2816,24	84,00	33,53	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir da figura 120, é possível observar que as inclinações  $0^\circ$  e  $45^\circ$  apresentam valores de  $L^*$  médio bastante próximos, enquanto que, para  $90^\circ$ , as médias são inferiores. Tal condição pode estar associada à menor exposição à chuva nas superfícies dispostas verticalmente, em relação às demais. Em conformidade ao que fora observado para a variação de cor, o teste de Duncan (tabela 70) indica que as inclinações  $0^\circ$  e  $45^\circ$  apresentam comportamentos estatísticos iguais, porém diferentes ao de  $90^\circ$ .

Figura 120 – ANOVA efeito da inclinação em  $L^*$ , sul, cinza



(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 70 – Teste de Duncan para a inclinação sul em  $L^*$ , cinza

	0°	45°	90°
0°		NS	S
45°	NS		S
90°	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 5.3.5.4 Orientação oeste

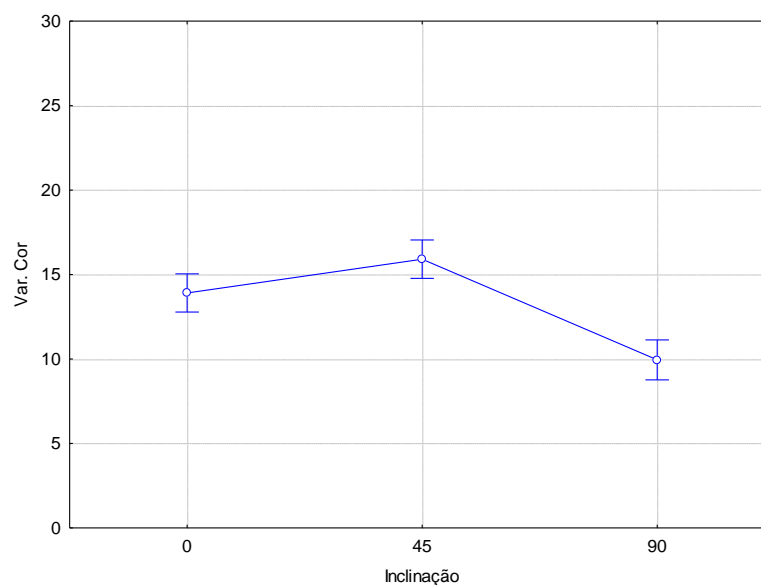
Apresenta-se o resumo da análise de variância na tabela 71, a qual indica que os fatores controláveis propostos atuam significativamente sobre a variação de cor. Entretanto, nas interações de ordem mais, se mostra estatisticamente significativa apenas a que associa idade e inclinação.

Tabela 71 – Análise de variância oeste ( $\Delta E$ ), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	3402,54	5,00	680,51	43,57	0,00%	S
Inclinação	842,50	2,00	421,25	26,97	0,00%	S
Teor	204,20	3,00	68,07	4,36	0,71%	S
Idade*Inclinação	550,77	10,00	55,08	3,53	0,08%	S
Idade*Teor	109,07	15,00	7,27	0,47	95,02%	NS
Inclinação*Teor	169,11	6,00	28,19	1,80	11,05%	NS
Idade*Inclinação*Teor	430,89	30,00	14,36	0,92	58,99%	NS
Erro	1108,87	71,00	15,62	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

O efeito isolado da inclinação sobre  $\Delta E$  é ilustrado na figura 121. É possível observar que a inclinação de  $45^\circ$  apresenta a maior média de variação de cor, seguidamente de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , nesta ordem. Pelo teste de Duncan (tabela 72),  $45^\circ$  e  $0^\circ$  possuem comportamentos estatisticamente iguais, enquanto que  $90^\circ$  é estatisticamente diferente de ambos.

Figura 121 – ANOVA efeito da inclinação em  $\Delta E$ , oeste, cinza

(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 72 – Teste de Duncan para a inclinação oeste em  $\Delta E$ , cinza

	0°	45°	90°
0°		NS	S
45°	NS		S
90°	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

A análise de variância para a refletância é resumida na tabela 73, a qual indica que os fatores controláveis atuam de forma significativa sobre a variável de resposta. No entanto, o mesmo não é percebido para as interações entre estes fatores, tanto para segunda quanto terceira ordens.

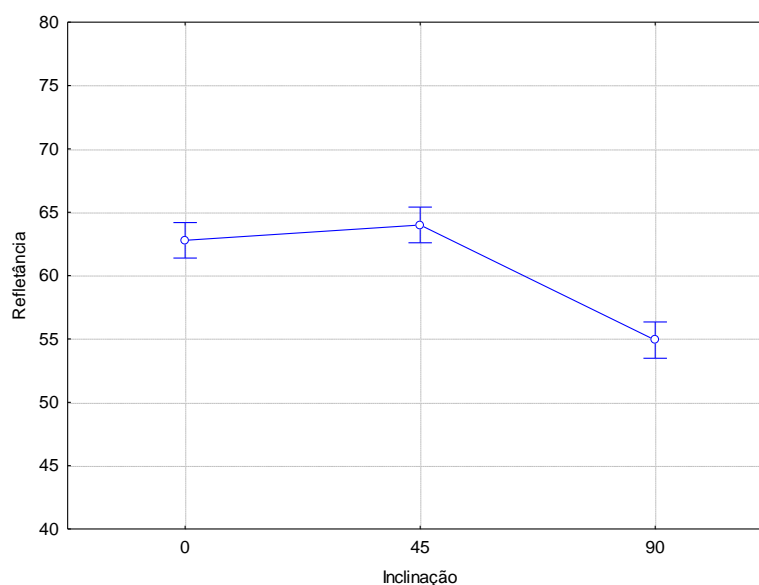
Tabela 73 – Análise de variância oeste (L\*), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	10153,10	6,00	1692,18	33,63	0,00%	S
Inclinação	1373,88	2,00	686,94	13,65	0,00%	S
Teor	519,96	3,00	173,32	3,44	2,03%	S
Idade*Inclinação	675,60	12,00	56,30	1,12	35,61%	NS
Idade*Teor	830,24	18,00	46,12	0,92	56,09%	NS
Inclinação*Teor	500,78	6,00	83,46	1,66	14,13%	NS
Idade*Inclinação*Teor	1286,72	36,00	35,74	0,71	87,32%	NS
Erro	4226,23	84,00	50,31	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 122 expõe o efeito isolado da inclinação sobre a refletância, indicando que as inclinações de 0° e 45° apresentam valores médios bastante próximos, superiores ao verificado para 90°. O teste de Duncan (tabela 74) revela, desta forma, que não há diferenças no comportamento estatístico de 0° e 45°, os quais são, por sua vez, diferentes estatisticamente de 90°.

Figura 122 –ANOVA efeito da inclinação em L\*, oeste, cinza



(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 74 – Teste de Duncan para a inclinação oeste em L\*, cinza

	0°	45°	90°
0°		NS	S
45°	NS		S
90°	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3.6 Métodos de aplicação – cinzas

A análise de variância para os métodos de aplicação do TiO<sub>2</sub> é apresentada na tabela 75. Verifica-se que os três fatores controláveis exercem influência significativa sobre a variação de cor. Para as interações de ordens mais altas, apenas aquela referente a método e teor de TiO<sub>2</sub> atua significativamente sobre a variável de resposta.

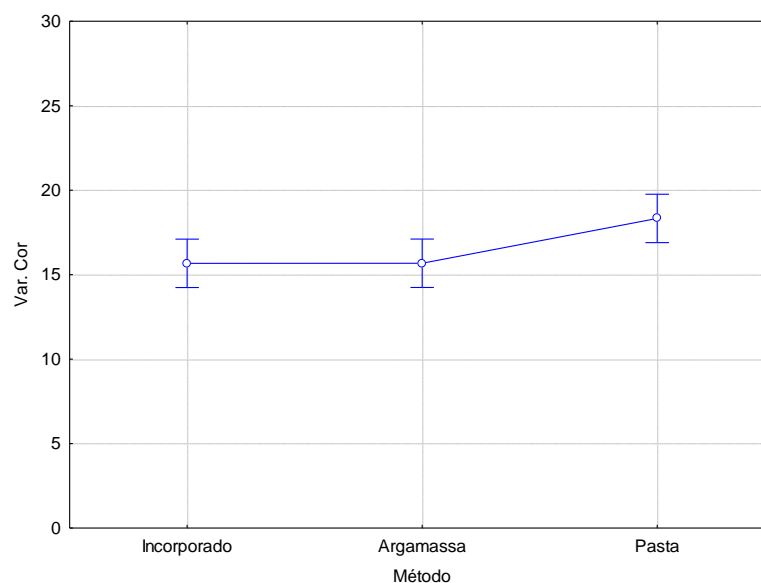
Tabela 75 – Análise de variância método ( $\Delta E$ ), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	5009,32	5,00	1001,86	54,47	0,00%	S
Método	169,54	2,00	84,77	4,61	1,42%	S
Teor	162,49	2,00	81,24	4,42	1,67%	S
Idade*Método	108,13	10,00	10,81	0,59	81,67%	NS
Idade*Teor	147,75	10,00	14,77	0,80	62,61%	NS
Método*Teor	253,09	4,00	63,27	3,44	1,41%	S
Idade*Método*Teor	235,52	20,00	11,78	0,64	86,34%	NS
Erro	993,21	54,00	18,39	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

O efeito dos diferentes métodos de emprego do dióxido de titânio é ilustrado na figura 123. É possível verificar que as coberturas de pasta obtiveram maiores valores de variação de cor, na comparação à cobertura de argamassa e ao TiO<sub>2</sub> adicionado às misturas.

De fato, o teste de Duncan (tabela 76) aponta que não há diferença estatisticamente significativa entre os comportamentos da cobertura de argamassa e do TiO<sub>2</sub> incorporado. Entretanto, ao encontro do que se observa no gráfico da figura 123, os valores de  $\Delta E$  referente à cobertura de pasta é estatisticamente diferente dos demais métodos testados.

Figura 123 –ANOVA efeito dos métodos de aplicação em  $\Delta E$ , cinza

(fonte: STATISTICA 7)

Tabela 76 – Teste de Duncan para o método de aplicação do  $\text{TiO}_2$  em  $\Delta E$ , cinza

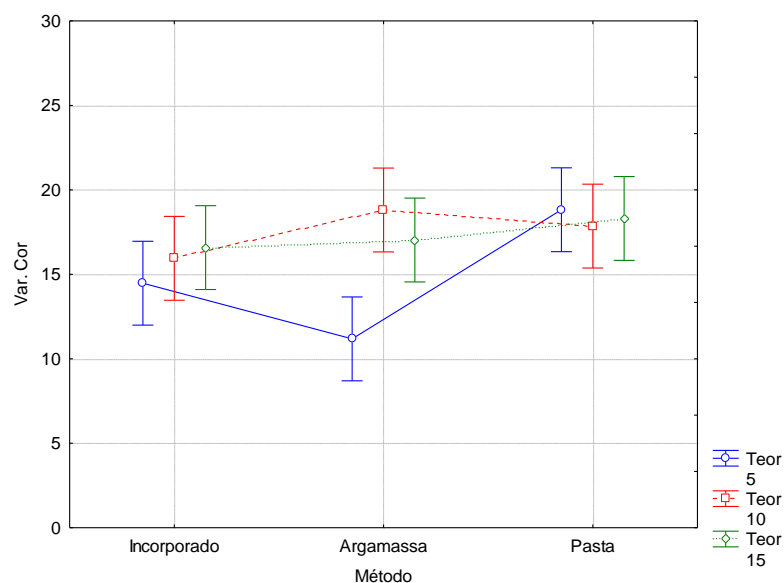
	Incorporado	Argamassa	Pasta
Incorporado		NS	S
Argamassa	NS		S
Pasta	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando-se o efeito associado entre método e teor de  $\text{TiO}_2$ , conforme a figura 124, é possível observar que, para a adição junto à mistura e a aplicação como cobertura de pasta, os valores médios de  $\Delta E$  são bastante próximos entre os teores empregados (5%, 10% ou 15%). Já para a cobertura de argamassa, o teor de 5% se mostra inferior aos demais.



Figura 124 – ANOVA efeito da interação entre teor de TiO<sub>2</sub> e método de aplicação em ΔE, cinza



(fonte: STATISTICA 7)

Conforme os resultados da análise de variância da tabela 77, verifica-se que todos os fatores controláveis propostos exercem influência significativa sobre a refletância das amostras em estudo. Para as ordens mais altas, apenas a interação entre método e teor de TiO<sub>2</sub> se mostra significativamente influente em relação à variável de resposta.

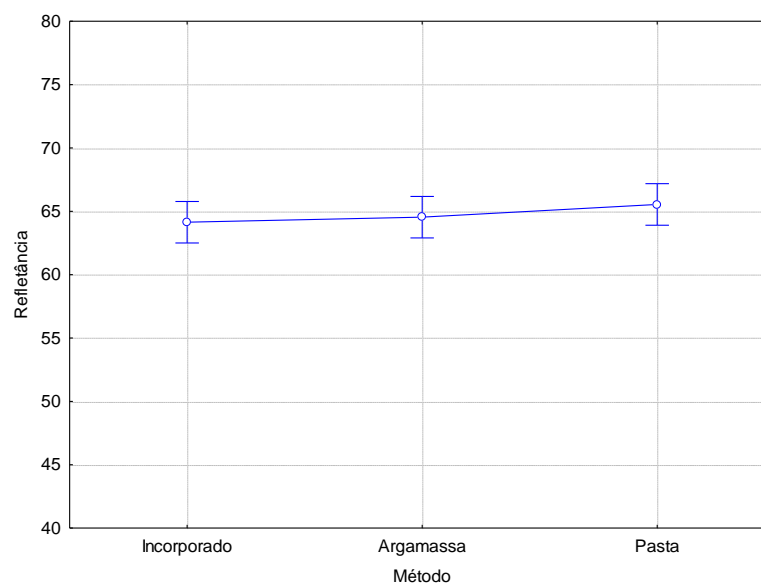
Tabela 77 – Análise de variância método (L\*), cinza

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Prob.	SIG
Idade	12508,38	6,00	2084,73	73,80	0,00%	S
Método	43,79	2,00	21,90	0,78	46,49%	S
Teor	275,68	2,00	137,84	4,88	1,07%	S
Idade*Método	48,80	12,00	4,07	0,14	99,96%	NS
Idade*Teor	271,53	12,00	22,63	0,80	64,79%	NS
Método*Teor	302,19	4,00	75,55	2,67	3,98%	S
Idade*Método*Teor	332,43	24,00	13,85	0,49	97,24%	NS
Erro	1779,54	63,00	28,25	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

O efeito isolado dos métodos de aplicação sobre L\* é apresentado na figura 125, na qual observam-se valores médio de refletância bastante próximos, havendo sutil superioridade para a cobertura de pasta. O teste de Duncan (tabela 78) indica que esta é estatisticamente diferente dos demais métodos de aplicação, os quais são tidos como estatisticamente iguais.

Figura 125 –ANOVA efeito dos métodos de aplicação em L\*, cinza



(fonte: STATISTICA 7)

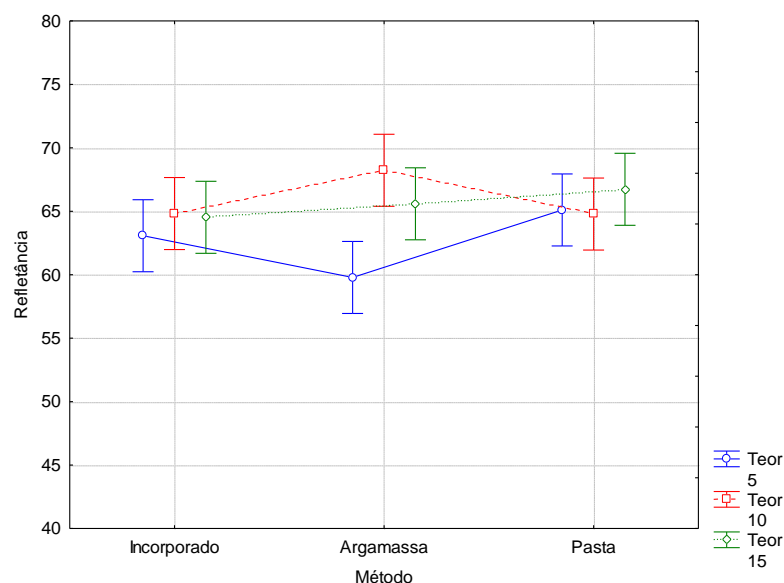
Tabela 78 – Teste de Duncan para o método de aplicação do TiO<sub>2</sub> em L\*, cinza

	Incorporado	Argamassa	Pasta
Incorporado		NS	S
Argamassa	NS		S
Pasta	S	S	

(fonte: elaborado pelo autor)

Já o efeito associado entre teor de TiO<sub>2</sub> e método de aplicação é ilustrado na figura 126. Verificam-se valores médios de L\* bastante semelhantes, para todos os teores empregados, nos casos da aplicação do TiO<sub>2</sub> incorporado à mistura e sob a forma de cobertura de pasta. Entretanto, para a cobertura de argamassa, o valor médio de menor magnitude verificado para o teor de 5% de TiO<sub>2</sub> pode ser considerado como um valor expúrio, já que não foram constatadas justificativas cabíveis para explicá-lo.

Figura 126 – ANOVA efeito da interação entre teor e método de aplicação em L\*, cinza



(fonte: STATISTICA 7)

### 5.3.7 Considerações finais

Em geral, foram observados valores de maior magnitude, tanto para a variação de cor quanto para a refletância, naquelas amostras manchadas com Rodamina B: para estas, o  $\Delta E$  médio observado foi de 50,73, enquanto que, para aquelas cujo manchamento foi o lodo de cinza, verificou-se 12,28. Em relação às médias de  $L^*$ , para o Rodamina B verificou-se em torno de 82,69, ao passo que, para o lodo de cinzas, 57,97.

Tais constatações vão ao encontro das evidências observadas no registro fotográfico (item 5.2), no qual foi possível notar, ainda que a partir de uma análise qualitativa (visual), uma maior descoloração superficial nas amostras manchadas com Rodamina B. Para este manchamento, verificou-se que a sua remoção ocorreu primeiramente – e de maneira mais acentuada, para as amostras acrescidas de  $TiO_2$  e, nesta condição, para aquelas que estiveram expostas a intensidades mais elevadas de radiação ultravioleta.

Desta forma, é recomendável que o monitoramento da descoloração de amostras manchadas com Rodamina B ocorra especialmente nos primeiros dias de exposição ao ambiente natural. A partir de idades mais avançadas, a remoção do corante é também observada naquelas argamassas que não contém  $TiO_2$ , uma vez que, frente à radiação solar, o Rodamina B pode ser decomposto mesmo sem a presença de um catalisador.

Por outro lado, para as amostras manchadas com o lodo de cinzas, além de a descoloração ter sido menos evidente nas superfícies monitoradas (em relação ao outro manchamento), não foi possível observar uma remoção de manchamento maior para as argamassas acrescidas de  $\text{TiO}_2$  (na comparação à argamassa de referência), e tampouco para as amostras submetidas a maiores intensidades de radiação UV. Estas situações podem ser justificadas por três fatores principais:

- a) excesso de lodo aplicado sobre as amostras, havendo, portanto, uma quantidade muito maior de moléculas contaminantes em relação ao número de fótons incidentes sobre a superfície, conforme referenciado por Fujishima (2000);
- b) obstrução física do manchamento à absorção de fótons pelo  $\text{TiO}_2$  – condição também observada no trabalho de Austria, no qual realizou-se manchamento por aspersão (2015);
- c) a composição química da própria cinza empregada, composta por pequena parcela de matéria orgânica (passível de degradação pelo mecanismo autolimpante).

Assim, tendo como base os registros fotográficos, os dados meteorológicos do período de exposição e a análise estatística dos dados colorimétricos, foi possível verificar que a remoção do lodo de cinzas da superfície das amostras se deve à ação da água de lavagem das chuvas.

Na comparação dentre os métodos de aplicação do  $\text{TiO}_2$  utilizados neste trabalho, foram verificadas médias mais elevadas de  $\Delta E$  e  $L^*$  para a forma de cobertura de pasta, em relação aos demais. No entanto, deve-se ressaltar que, ao longo da exposição natural, estas amostras manifestaram fissuras em suas superfícies (craqueamento), de pouca profundidade e pequena abertura, porém visíveis a olho nu – interferindo na qualidade do acabamento final.

Por fim, entende-se que, em aplicações reais, o critério de escolha do método mais adequado para emprego do  $\text{TiO}_2$  não deve ser restrito apenas à eficiência da autolimpeza, devendo incluir ainda aspectos como disponibilidade de recursos financeiros e de mão de obra, prazos para execução, qualidade do acabamento e complexidade da construção. Para formas arquitetônicas mais complexas e grandes áreas de fachada, por exemplo, considera-se mais adequado o emprego do  $\text{TiO}_2$  incorporado à mistura, uma vez que o revestimento de tais superfícies consumiria elevada quantidade de tempo e de mão de obra. Por outro lado, as coberturas fotocatalíticas seriam mais vantajosas quando aplicadas junto a painéis pré-moldados de concreto, devido à redução na quantidade de  $\text{TiO}_2$  empregada e facilidade de aplicação.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a capacidade autolimpante de argamassas e coberturas fotocatalíticas de  $\text{TiO}_2$  expostas a diferentes configurações de posicionamento no microclima urbano da cidade de Porto Alegre. Para tal, foram produzidas amostras de argamassa e de cobertura de pasta ou argamassa, incluindo diferentes teores de dióxido de titânio (0%, 5%, 10% e 15%).

Tais amostras foram manchadas por uma solução aquosa de Rodamina B ou por lodo de cinzas da queima de eucalipto, e, a seguir, foram expostas à radiação solar, voltadas para as orientações norte, leste, sul e oeste, incluindo as inclinações de 0°, 45° e 90°. Ao longo do período de exposição, foram realizadas leituras cromáticas por um espectrofotômetro portátil, conforme o espaço de cor do sistema CIELab, tendo em vista o monitoramento da degradação dos manchamentos aplicados.

As conclusões obtidas ao término deste estudo são apresentadas na sequência, devendo-se ressaltar que são específicas para o presente trabalho, referindo-se aos seus materiais, métodos e manchamentos e às condições ambientais da cidade de Porto Alegre. Novas pesquisas são necessárias como forma de complementação e comparação dos resultados verificados, e para certificação de sua representatividade.

### 6.1 CONCLUSÕES

Tendo em vista a capacidade autolimpante de argamassas e coberturas fotocatalíticas expostas a diferentes configurações de posicionamento no microclima urbano, expõe-se:

- a) as configurações de posicionamento que recebem menores intensidades de radiação solar demandam maiores teores de  $\text{TiO}_2$  para atingirem maior variação de cor;

- b) houve uma maior variação de cor para as coberturas fotocatalíticas de pasta quando comparada à cobertura de argamassa e ao uso do  $\text{TiO}_2$  incorporado às misturas, estes os quais se mostraram praticamente equivalentes;
- c) verificou-se um aumento no brilho das argamassas fotocatalíticas, dado o elevado grau de refração do pó empregado, em comparação à argamassa de referência.

No que compete à verificação da capacidade autolimpante de argamassas e coberturas fotocatalíticas na degradação de diferentes manchamentos, tem-se:

- a) notou-se um aumento na variação de cor e na refletância mesmo para a argamassa que não continha  $\text{TiO}_2$  ao longo da exposição, o que pode estar relacionado ao uso do Rodamina B, uma vez que o corante se decompõe mesmo na ausência de um catalisador;
- b) a menor descoloração superficial verificada junto às cinzas pode estar relacionada ao excesso de lodo aplicado sobre as amostras;
- c) adicionalmente, a menor eficácia na remoção das cinzas pode ser justificada pelas características químicas do próprio material, composto por pequena parcela de matéria orgânica.

Em relação à verificação da velocidade de autolimpeza de argamassas e coberturas fotocatalíticas, pode-se inferir que:

- a) houve um forte aumento na refletância média das amostras no período de 0 a 3 dias de exposição, enquanto que, desde então até a idade final, o aumento ocorreu de maneira mais lenta.

Referente à avaliação da capacidade autolimpante de argamassas e coberturas fotocatalíticas produzidas com diferentes teores de  $\text{TiO}_2$ , conclui-se que:

- a) a variação de cor é maior para as argamassas contendo quantidades mais elevadas de  $\text{TiO}_2$ , quando comparadas à de referência (0%);
- b) a adição de 5% de  $\text{TiO}_2$  pode ser considerada o valor mais adequado em termos de custos e eficiência de autolimpeza, na comparação com as demais percentuais propostos neste estudo.

Para a avaliação da influência da orientação solar na capacidade autolimpante de argamassas fotocatalíticas, tem-se:

- a) houve maior variação de cor nas amostras expostas para a orientação norte;

- b) os valores médios de variação de cor para as orientações leste, sul e oeste se mostraram bastante próximos, enquanto que, para a orientação norte, ocorrem de forma mais acelerada em relação às demais;
- c) as amostras voltadas para as orientações propostas tendem a atingir o mesmo valor de variação de cor ao final do período de exposição.

Por fim, tendo em vista a avaliação da influência da inclinação de superfícies na capacidade autolimpante de argamassas fotocatalíticas:

- a) houve maior alteração de cor para a inclinação de 45°, quando comparada à de 90°;
- b) as amostras expostas à 90° necessitam de maior tempo para atingir um valor de variação de cor verificado para 45°;
- d) o efeito de autolimpeza para a inclinação de 45° ocorre de forma mais acelerada nas primeiras idades;
- c) as amostras inclinadas à 45° apresentaram valores de variação de cor muito próximos a todas as orientações propostas, ao passo que aquelas à 90° demonstraram maior variação de cor na orientação norte;
- d) a menor atividade autolimpante observada foi vista para a inclinação de 0°, justificada pelo acúmulo de água nestas superfícies, uma vez que sua disposição horizontal dificulta o efeito de lavagem das partículas degradadas possibilitado pela ação da água da chuva.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do presente trabalho, surgiram hipóteses ou focos de estudo que envolviam variáveis adicionais àquelas contempladas no planejamento experimental. Portanto, apresentam-se sugestões de pesquisa que podem ser abordadas em trabalhos futuros:

- a) verificação do ângulo de contato das superfícies fotocatalíticas ao longo da exposição;
- b) comparação entre acabamentos superficiais lisos e rugosos nas amostras de argamassa;
- c) verificação da influência do sombreamento sobre a atividade fotocatalítica das amostras;
- d) aplicação de manchamento que simule a deposição de partículas oriundas da queima de combustíveis fósseis em grandes centros urbanos.

## REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, H. Z.; TAIB, H.; SORRELL, C. C. Coating methods for self-cleaning thick films of titania. **Advances in Applied Ceramics**, v. 106, n. 1-2, p. 105-113, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 47**: concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 65**: cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **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, 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, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13280**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_. **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, 2008.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11579**: cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15575-1**: edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.



\_\_\_\_\_. **NBR 16372: cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

AUSTRIA, G. **Argamassa autolimpante para revestimento de fachadas: o efeito das propriedades fotocatalíticas do dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>).** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

AZEVEDO, N. A. M.; BARROSO DE AGUIAR, J. L.; PACHECO TORRAL, F. Argamassas fotocatalíticas: influência da composição na resistência mecânica e na capacidade de autolimpeza. **APFAC**, 2012.

BARTHLOTT, W.; NEINHUIS, C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. **Planta**, v. 202, n. 1, p. 1-8, 1997.

BEELDENS, A. Air purification by road materials: results of the test project in Antwerp. **International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials**, 2007.

BENEDIX, R.; DEHN, F.; QUAAS, J.; ORGASS, M. Application of titanium dioxide photocatalysis to create self-cleaning building materials. **LACER**, n. 5, 2000.

BOONEN, E.; BEELDENS, A. Photocatalytic roads: from lab tests to real scale applications. **European Transport Research Review**, v. 5, n. 2, 2013

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Relatório técnico 36: perfil do titânio.** Brasília, DF, 2010.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Sumário mineral.** Brasília, DF, 2013.

BROGREN, M.; GREEN, A. Hammarby Sjostad: an interdisciplinary case study of the integration of photovoltaics in a new ecologically sustainable residential area in Stockholm. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, n. 75, 2003.

BUDIKOVA, D. Albedo. **The encyclopedia of Earth: albedo**, maio 2013. Disponível em: < <http://www.eoearth.org/view/article/149954/>>. Acesso em: 23 jan. 2015.

CASSAR, L. **Photocatalysis of cementitious materials: clean buildings and clean air.** Cambridge: Cambridge University Press, 2004. MRS Bulletin n. 9.

CHAVES, A. M. V. A. **Patologia e reabilitação de revestimentos de fachadas.** 2009. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2009.

CHEW, M. Y. L.; DE SILVA, N.; TAN, P. P. Maintainability of facades in the tropics. **Conference for Facade Design and Procurement**, Bath, 2006.

CHEW, M. Y. L.; TAN, P. P. **Staining of facades.** Singapore: World Scientific, 2003.

CINCOTTO, M. A. **Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações.** Tecnologia de edificações. São Paulo: PINI/IPT, 1988. p. 549-554.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (São Paulo). Emissões veiculares no estado de São Paulo 2013. São Paulo, 2013.

DIAMANTI, M. V.; ORMELLESE, V.; PEDEFERRI, M. P. Characterization of photocatalytic and superhydrophilic properties of mortars containing titanium dioxide. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 11, p. 1349-1353, jul. 2008.

DIAMANTI, M. V.; DEL CURTO, B.; ORMELLESE, V.; PEDEFERRI, M. P. Photocatalytic and self-cleaning activity of colored mortars containing TiO<sub>2</sub>. **Cement and Concrete Research**, v. 46, p. 167-174, maio 2013.

FOLLI, A. **TiO<sub>2</sub> photocatalysis in Portland cement systems: fundamentals of self cleaning effect and air pollution mitigation**. 2010. 176f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Chemistry, University of Aberdeen, 2010.

FOLLI, A.; PADE, C.; HANSEN, T. B.; DE MARCO, T.; MACPHEE, D. E. TiO<sub>2</sub> photocatalysis in cementitious systems: insights into self-cleaning and depollution chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 3, p. 539-548, 2012.

FOLLI, A.; BLOH, J. Z.; STROM, M.; MADSEN, T. P.; HENRIKSEN, T.; MACPHEE, D. E. Efficiency of solar-light-driven TiO<sub>2</sub> photocatalysis at different latitudes and seasons: where and when does TiO<sub>2</sub> really work? **The Journal of Physical Chemistry Letters**, Washington, n. 5, p. 830-832, mar. 2014.

FOLLI, A.; MACPHEE, D. E. Future challenges for photocatalytic concrete technology. **Cement and Concrete Research**, Sheffield, v. 34, n.12, set. 2014.

FUJISHIMA, A.; RAO, T.; TRYK, D. Titanium dioxide photocatalysis. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, n. 1, p. 1-21, 2000.

FUJISHIMA, A.; ZHANG, X. Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches. **Comptes Rendus Chimie**, v. 9, n. 8, p. 750-760, 2005.

FUJISHIMA, A.; WANG, R.; HASHIMOTO, K.; CHIKUNI, M.; KOJIMA, E.; KITAMURA, A.; SHIMOHIGOSHI, M.; WATANABE, T. Photogeneration of highly amphiphilic TiO<sub>2</sub> surfaces. **Advanced Materials**, 1998.

GRAZIANI, L.; QUAGLIARINI, E.; OSIMANI, A.; AQUILANTI, L.; CLEMENTI, F.; YÉPRÉMIAN, C.; LARICCIA, V.; AMOROSO, S.; D'ORAZIO, M. Evaluation of inhibitory effect of TiO<sub>2</sub> nanocoatings against microalgal growth on clay brick façades under weak UV exposure conditions. **Building and Environment**, n. 64, p. 38-45, 2013.

GRAZIANI, L.; QUAGLIARINI, E.; BONDIOLI, F.; D'ORAZIO, M. Durability of self-cleaning TiO<sub>2</sub> coatings on fired clay brick façades: Effects of UV exposure and wet & dry cycles. **Building and Environment**, n. 71, p. 193-203, 2014.

GRIMM, A. M. **Meteorologia básica**: notas de aula. Curitiba: Departamento de Física da Universidade Federal do Paraná, 1999. Notas de aula da disciplina Meteorologia Básica da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

GUROL, M. D. **Photo-catalytic construction materials and reduction in air pollutants**. San Diego, 2006.

HASHIMOTO, K.; FUJISHIMA, A.; IRIE, H. TiO<sub>2</sub> photocatalysis: a historical overview and future prospects. **Japanese Journal of Applied Physics**, Tokyo, v. 44, n. 12, p. 8269-8285, 2005.

HÜSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 10, p. 1246-1259, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações automáticas – Gráficos**.

Disponível em:

<[http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede\\_estacoes\\_auto\\_graf](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf)>.

Acesso em: 27 set. 2015.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Ontario: Academic Press Canada, 1983.

KRISHNAN; P.; ZHANG, M. H.; YU, L.; FENG, H. Photocatalytic degradation of particulate pollutants and self-cleaning performance performance of TiO<sub>2</sub>-containing silicate coating and mortar. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 309-316, 2013.

KUSHNIR, Y. **Solar radiation and the Earth's energy balance**. Columbia University, 2000. Disponível em: <<http://eesc.columbia.edu/courses/ees/climate/lectures/radiation/>>.  
Acesso em: 22 jan. 2015.

LACEY, M.; SCHIRMER, W. O uso da fotocatalise para a desinfecção e desodorização do ar interno. **Ambiência: revista do setor de ciências agrárias e ambientais**. v. 4. n. 2. p. 309-325. Maio-ago. 2008.

LOW ENERGY ARCHITECTURE RESEARCH UNIT. **Building orientation**. Londres: School of Planning and Architecture of London Metropolitan University, 2004. Disponível em: <[http://www.new-learn.info/packages/clear/thermal/buildings/configuration/building\\_orientation.html](http://www.new-learn.info/packages/clear/thermal/buildings/configuration/building_orientation.html)>. Acesso em: 25 jan. 2015.

MARANHÃO, F. Método para redução de mancha nas vedações externas de edifícios. 2005. 106f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MARANHÃO, F.; LOH, K.; JOHN, V. O uso da fotocatalise em materiais autolimpantes. **Wolfmartins.com**, [S.I.], não paginado, 12 out. 2012. Disponível em: <<http://www.wolfmartins.com.br/2012/06/materiais-autolimpantes/>>. Acesso em: 12 out. 2014.

MAURY-RAMIREZ A.; DEMEESTERE K.; BELIE N. D. Photocatalytic activity of titanium dioxide nanoparticle coatings applied on autoclaved aerated concrete: effect of weathering on coating physical characteristics and gaseous toluene removal. **Hazard Mater**, p. 211-225, 2012.

MELO, J. **Desenvolvimento de peças pré-moldadas de concreto fotocatalíticas para pavimentação e purificação do ar**. 2011. 191f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

NICHOLSON, C. **Pollution-Killing material: smog-eating cement**. Core77, 2013. Disponível em: <<http://www.core77.com/posts/25281/pollution-killing-material-smog-eating-cement-25281>>. Acesso em: 12 set. 2015.

NOGUEIRA, R.; JARDIM, W. F. **A fotocatalise heterogênea e sua aplicação ambiental**. Campinas: Química Nova, 1998.

OLIVEIRA FILHO, K.; SARAIVA, M. **Movimento anual do Sol e as estações do ano**. Porto Alegre: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

PASSUELO, A. **Análise de parâmetros influentes na cromacidade e no comportamento mecânico de concretos à base de cimento branco**. 2003. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PEREIRA, M. A. C.; JALALI, S.; PACHECO TORGAL, F. 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. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

PICADA PROJECT. **Innovative facade coatings with de-soiling and de-polluting properties**. 2006.

PIDWIRNY, M. Solar radiation. **The encyclopedia of Earth: natural sciences**, jan. 2010. Disponível em: <<http://www.eoearth.org/view/article/156098/>>. Acesso em: 21 jan. 2015.

\_\_\_\_\_. **Atmospheric effects on incoming solar radiation**. 2nd ed. Fundamentals of Physical Geography, 2006.

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas híbridos: soluções energéticas para a Amazônia**. 1. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 396 p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL/CRESESB, 2014.

POON, C.; CHEUNG, C. NO removal efficiency of photocatalytic paving blocks prepared with recycled materials. **Construction and Building Materials**, n. 21, p. 1746-1753, 2007.

PORTO ALEGRE. **Tabelas de medição diária da precipitação de Porto Alegre**. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <[http://www2.portoalegre.rs.gov.br/ceic/default.php?p\\_secao=28](http://www2.portoalegre.rs.gov.br/ceic/default.php?p_secao=28)>. Acesso em: 7 fev. 2016.

RUOT, B.; PLASSAIS, A.; OLIVE, F.; GUILLOT, L.; BONAFIOUS, L. TiO<sub>2</sub>-containing cement pastes and mortars: measurements of the photocatalytic efficiency using a rhodamine B-based colourimetric test. **Solar Energy**, v. 83, n. 10, p. 1794-1801, 2009.

SANTOS, I. P. **Minicurso Building-Integrated Photovoltaics para arquitetos e engenheiros civis**. Recife: International Energy Initiative, 2014. Material preparado para minicurso homônimo oferecido no V Congresso Brasileiro de Energia Solar.

\_\_\_\_\_. **Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura**. 2013. 214f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SILVEIRA, F. L. **Movimento anual do Sol em Porto Alegre**. Porto Alegre: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/dia.htm>>. Acesso em 22 jan. 2015.

SMITS, M.; HUYGH, D.; CRAEYE, B.; LENAERTS, S. Effect of process parameters on the photocatalytic soot degradation on self-cleaning cementitious materials. **Catalysis Today**, v. 230, p. 250-255, 2014.

VASKE, N. R. **Contribuição ao estudo do aproveitamento da cinza de lenha de eucalipto como adição ao concreto**. 2012. 236f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

VERHOEF, F. G. W. **Soiling and cleaning of building façades**. Report of the Technical Committee 62 SCF – RILEM, London: L. G. W. Verhoef, 2004.

VIEIRA, A. **Influência dos detalhes arquitetônicos no estado de conservação das fachadas de edificações do patrimônio cultural do centro histórico de Porto Alegre: estudo de caso**. 2005. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

YURANOVA, T.; SARRIA, V.; JARDIM, W.; RENGIFO, J.; PULGARIN, C.; TRABESINGER, G.; KIWI, J. Photocatalytic discoloration of organic compounds on outdoor building cement panels modified by photoactive coatings. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 188, 2007.

## **ANEXO A – Caracterização dos materiais**

Tabela 79 – Resistência à compressão do cimento (MPa), aos 7 dias

CP	kN	A(cm <sup>2</sup> )	kN/cm <sup>2</sup>	MPa
1	66,90	19,63	3,41	34,09
2	60,70	19,63	3,09	30,93
3	58,80	19,63	3,00	29,96
4	62,70	19,63	3,19	31,95

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 80 – Resistência à compressão do cimento (MPa), aos 28 dias

CP	kN	A(cm <sup>2</sup> )	kN/cm <sup>2</sup>	MPa
1	87,80	19,63	4,47	44,74
2	99,70	19,63	5,08	50,80
3	103,20	19,63	5,26	52,59
4	94,60	19,63	4,82	48,20

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 81 – Índice de finura (%) para o cimento

	Amostra 1	Amostra 2
massa (g)	50,00	50,00
retido (g)	0,12	0,08
IF (%)	0,24	0,16

(fonte: elaborado pelo autor)

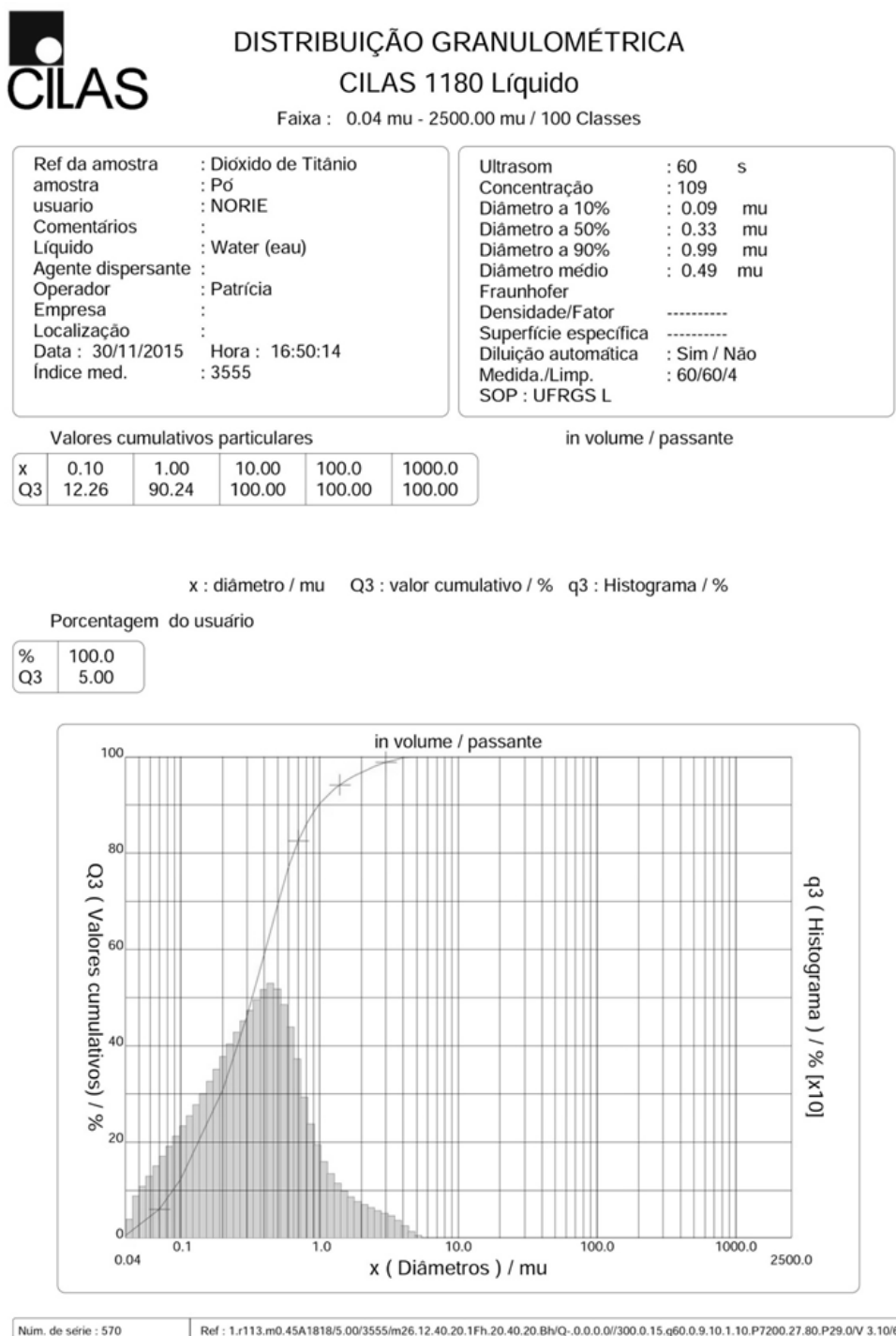
Figura 128 – Difração a *laser* para o dióxido de titânio



Figura 128 – Difração a *laser* para o dióxido de titânio (continuação)

## DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

## CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra	: Dióxido de Titânio	Ultrasom	: 60	s
amostra	: Pó	Concentração	: 109	
usuario	: NORIE	Diâmetro a 10%	: 0.09	mu
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 0.33	mu
Líquido	: Water (eau)	Diâmetro a 90%	: 0.99	mu
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 0.49	mu
Operador	: Patrícia	Fraunhofer		
Empresa	:	Densidade/Fator	-----	
Localização	:	Superfície específica	-----	
Data : 30/11/2015	Hora : 16:50:14	Diluição automática	: Sim / Não	
Índice med.	: 3555	Medida./Limp.	: 60/60/4	
		SOP	: UFRGS L	

Valores cumulados característicos in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.71	6.08	12.26	30.84	46.24	58.99	69.45	77.20	82.60	86.08
q3	0.59	2.29	4.14	6.40	9.07	10.58	11.19	10.15	8.36	6.22
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	88.49	90.24	91.57	92.62	93.47	94.17	95.28	96.11	96.78	97.34
q3	4.89	3.97	3.33	2.88	2.54	2.26	1.98	1.68	1.52	1.40
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	97.81	98.21	98.86	99.79	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	1.29	1.19	1.08	0.77	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	600.0	700.0	800.0	900.0	1000.0	1100.0	1200.0	1300.0	1400.0	1500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	1600.0	1700.0	1800.0	1900.0	2000.0	2100.0	2200.0	2300.0	2400.0	2500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

(fonte: LACER/UFRGS)

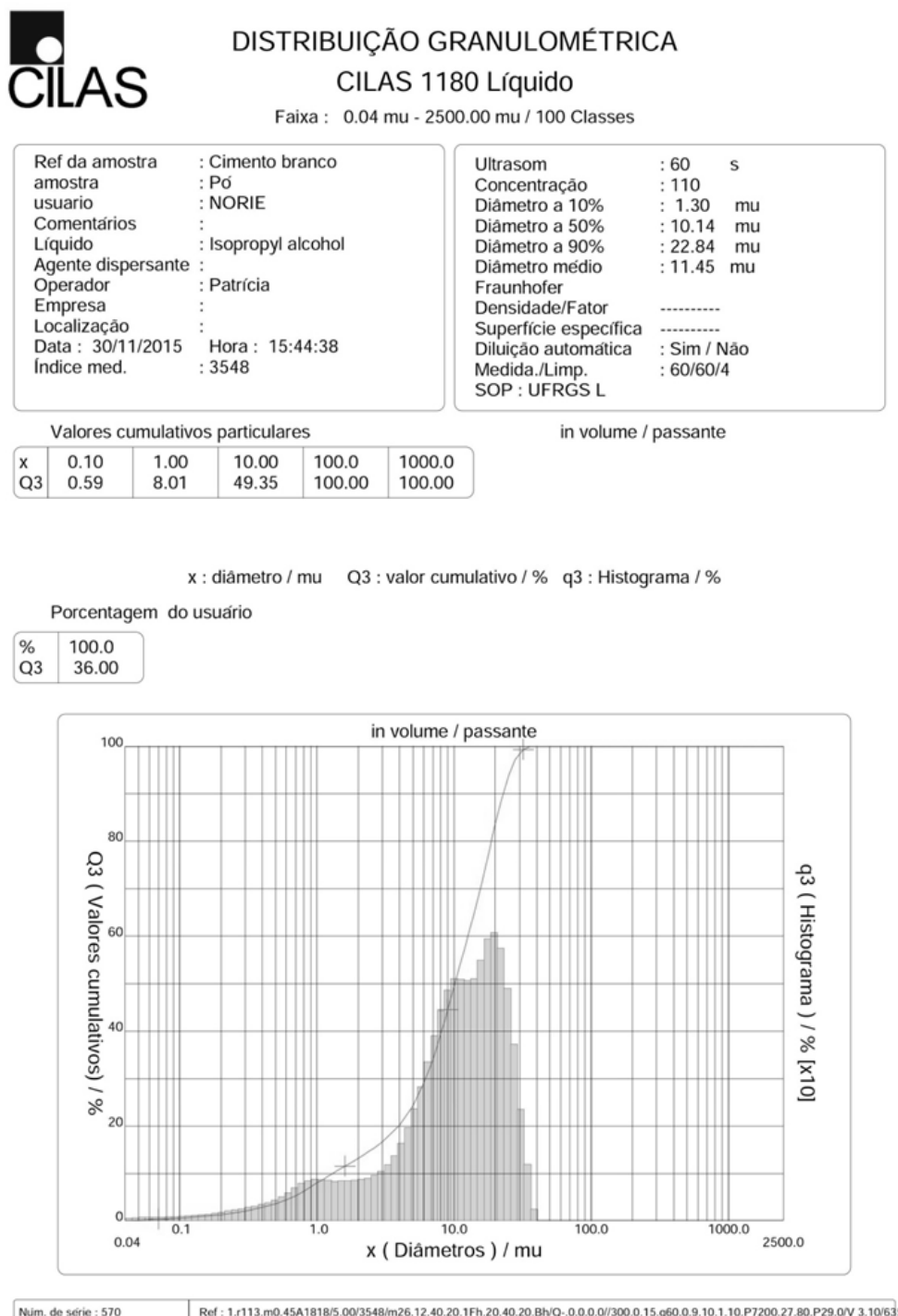
Figura 129 – Difração a *laser* para o cimento branco

Figura 129 – Difração a *laser* para o cimento branco (continuação)

## DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

## CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra	: Cimento branco	Ultrasom	: 60	s
amostra	: Pó	Concentração	: 110	
usuario	: NORIE	Diâmetro a 10%	: 1.30	mu
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 10.14	mu
Líquido	: Isopropyl alcohol	Diâmetro a 90%	: 22.84	mu
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 11.45	mu
Operador	: Patrícia	Fraunhofer		
Empresa	:	Densidade/Fator	-----	
Localização	:	Superfície específica	-----	
Data : 30/11/2015	Hora : 15:44:38	Diluição automática	: Sim / Não	
Índice med.	: 3548	Medida./Limp.	: 60/60/4	
		SOP	: UFRGS L	

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.10	0.37	0.59	1.30	2.08	2.85	3.63	4.46	5.36	6.30
q3	0.03	0.04	0.06	0.09	0.17	0.24	0.31	0.41	0.53	0.63
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	7.19	8.01	8.74	9.40	9.99	10.54	11.54	12.43	13.24	13.99
q3	0.68	0.70	0.69	0.68	0.66	0.67	0.67	0.68	0.69	0.71
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	14.69	15.37	16.70	20.21	24.32	29.00	31.51	34.09	36.71	39.34
q3	0.72	0.77	0.84	1.10	1.66	2.31	2.82	3.14	3.42	3.67
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	41.95	44.50	49.35	53.73	57.71	61.34	64.78	68.14	71.49	74.75
q3	3.88	4.02	4.15	4.14	4.12	4.09	4.18	4.39	4.68	4.84
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	77.87	80.84	83.60	88.43	93.80	97.18	99.35	100.00	100.00	100.00
q3	4.92	4.95	4.85	4.56	3.78	2.69	1.46	0.50	0.00	0.00
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	600.0	700.0	800.0	900.0	1000.0	1100.0	1200.0	1300.0	1400.0	1500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	1600.0	1700.0	1800.0	1900.0	2000.0	2100.0	2200.0	2300.0	2400.0	2500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

(fonte: LACER/UFRGS)

Figura 130 – Análise FRX para cimento branco e dióxido de titânio

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
 INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
 Centro de Pesquisas em Petrologia e Geoquímica (CPGq)  
 Núcleo de Litoquímica e Análises Minerais  
 LAUDO 09/03/2016

Av. Bento Gonçalves 9500 prédio 43126 sala 214  
 Caixa Postal 15 001  
 91501-970 Porto Alegre  
 Fone 051 3308 6357; Fax 051 3308-7302  
[cpgq\\_secretaria@ufrgs.br](mailto:cpgq_secretaria@ufrgs.br)  
[labfrx@ufrgs.br](mailto:labfrx@ufrgs.br)

### RELATÓRIO DE ANÁLISE

Porto Alegre, 30 de março de 2016

LAUDO 010-30/03/2016

Ilmo(a) Sr(a). João Pedro Treviso

Amostras: duas amostras codificadas no laboratório como LAB175 e LAB176.

Técnica de análise: Espectrometria de fluorescência de raios-X

Os resultados listados na tabela abaixo para a amostra LAB0175 (cimento) foram obtidos a partir de análise **quantitativa** realizada através da técnica em amostra fundida com curva de calibração a partir de padrões de rocha (valores apresentados em porcentagem de peso da amostra, nd=não detectado pela rotina). A presença de voláteis foi avaliada através de técnicas gravimétricas e esta representada por LOI. O espectrômetro de fluorescência de raios-X (XRF) em funcionamento no laboratório esta equipado com tubo de raios-X de Rh.

Já os resultados listados para a amostra LAB0176 (TiO<sub>2</sub>) foram obtidos a partir de análise **semi-quantitativa**. Utilizou-se uma rotina automática de varredura por WDS e os elementos identificados e respectivas concentrações foram sugeridos automaticamente pela varredura com o programa FP02. Cabe a vossa equipe analisar criticamente os resultados semi-quantitativos obtidos.

#### Análise Quantitativa

<i>% em peso</i>	<i>cimento (LAB175)</i>
SiO <sub>2</sub>	20,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,20
TiO <sub>2</sub>	0,09
MgO	0,79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00
MnO	0,00
CaO	65,80
Na <sub>2</sub> O	0,00
K <sub>2</sub> O	0,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02
SO <sub>4</sub>	3,79
LOI	5,38
<b>Total</b>	<b>100,74</b>

#### Análise Semi-quantitativa (2-theta scan FP02)

<i>% em peso</i>	<i>TiO<sub>2</sub> (LAB176)</i>
SiO <sub>2</sub>	0,26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,54
SO <sub>3</sub>	0,14
CaO	0,24
K <sub>2</sub> O	0,54
TiO <sub>2</sub>	98,1
<b>total</b>	<b>99,82</b>

Porto Alegre, 30 de março de 2016

Centro de Pesquisas em Petrologia e Geoquímica (CPGq)  
 Núcleo de Litoquímica e Análises Minerais  
[www.ufrgs.br/geoquimica](http://www.ufrgs.br/geoquimica)

(fonte: IGEO/UFRGS)

## **ANEXO B – Caracterização das argamassas**

Tabela 82 – Resistência à tração na flexão e à compressão (MPa), aos 28 dias

Teor TiO <sub>2</sub>	CP	Tração		Compressão			
		(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)
0%	1	2,23	5,23	63,10	39,44	57,70	36,06
	2	2,42	5,68	58,60	36,63	60,80	38,00
	3	2,51	5,88	57,90	36,19	53,00	33,13
	4	2,40	5,62	53,10	33,19	58,40	36,50
	5	2,47	5,79	58,00	36,25	64,60	40,38
	6	2,29	5,37	66,90	41,81	59,50	37,19
5%	51	0,74	1,74*	52,00	32,50	74,30	46,44
	52	1,15	2,69*	79,20	49,50	73,50	45,94
	53	2,59	6,07	78,10	48,81	73,40	45,88
	54	2,49	5,83	72,70	45,44	73,70	46,06
	55	2,33	5,47	73,70	46,06	71,80	44,88
	56	2,37	5,54	74,90	46,81	70,30	43,94
10%	101	2,86	6,70	64,40	40,25	63,60	39,75
	102	2,77	6,50	58,60	36,63	60,40	37,75
	103	2,61	6,11	67,20	42,00	66,40	41,50
	104	3,28	7,70	66,00	41,25	65,20	40,75
	105	2,77	6,48	60,60	37,88	63,40	39,63
	106	2,48	5,82	68,00	42,50	67,70	42,31
15%	151	2,66	6,23	63,90	39,94	-	-
	152	2,78	6,51	66,60	41,63	67,20	42,00
	153	2,53	5,93	63,70	39,81	71,80	44,88
	154	2,40	5,62	74,80	46,75	68,70	42,94
	155	2,55	5,97	61,40	38,38	62,60	39,13
	156	-	-	-	-	-	-

\*: valores expúrios

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 83 – Absorção de água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>), aos 28 dias

Teor TiO <sub>2</sub>	CP	seco	3h		6h		24h		48h		72h	
		(g)	(g)	(g/cm <sup>2</sup> )	(g)	(g/cm <sup>2</sup> )	(g)	(g/cm <sup>2</sup> )	(g)	(g/cm <sup>2</sup> )	(g)	(g/cm <sup>2</sup> )
0%	1	503,11	509,60	0,41	511,73	0,54	519,11	1,00	522,43	1,21	524,96	1,37
	2	517,82	523,45	0,35	525,79	0,50	533,19	0,96	536,80	1,19	539,17	1,33
	3	512,27	517,78	0,34	519,89	0,48	527,23	0,94	530,82	1,16	533,57	1,33
	4	522,19	528,23	0,38	530,45	0,52	537,90	0,98	541,56	1,21	544,26	1,38
	5	509,08	515,06	0,37	517,13	0,50	524,32	0,95	527,62	1,16	530,12	1,32
	6	513,16	518,83	0,35	521,05	0,49	528,92	0,98	532,42	1,20	535,04	1,37
5%	51	533,23	540,14	0,43	542,66	0,59	551,53	1,14	555,72	1,41	559,01	1,61
	52	519,68	525,39	0,36	527,53	0,49	534,89	0,95	538,37	1,17	540,80	1,32
	53	526,15	532,50	0,40	534,74	0,54	542,89	1,05	546,74	1,29	549,49	1,46
	54	527,52	533,68	0,38	535,98	0,53	544,48	1,06	548,15	1,29	550,83	1,46
	55	531,65	538,12	0,40	540,52	0,55	548,89	1,08	552,65	1,31	555,34	1,48
	56	525,63	531,88	0,39	534,13	0,53	542,32	1,04	546,18	1,28	548,83	1,45
10%	101	526,00	531,76	0,36	534,12	0,51	541,91	0,99	545,13	1,20	547,60	1,35
	102	533,03	538,89	0,37	541,15	0,51	549,32	1,02	553,01	1,25	555,67	1,42
	103	525,56	530,53	0,31	532,76	0,45	540,67	0,94	544,36	1,18	546,80	1,33
	104	527,81	534,11	0,39	536,38	0,54	544,07	1,02	547,86	1,25	550,67	1,43
	105	519,07	524,45	0,34	526,62	0,47	534,12	0,94	537,49	1,15	539,93	1,30
	106	529,56	533,54	0,25	535,47	0,37	543,77	0,89	547,70	1,13	550,71	1,32
15%	151	538,94	544,22	0,33	546,60	0,48	554,58	0,98	558,39	1,22	560,87	1,37
	152	550,34	556,72	0,40	559,03	0,54	566,59	1,02	570,69	1,27	573,45	1,44
	153	541,49	546,94	0,34	549,42	0,50	557,97	1,03	561,92	1,28	564,92	1,46
	154	520,09	526,02	0,37	528,53	0,53	536,80	1,04	540,47	1,27	543,12	1,44
	155	531,24	537,04	0,36	539,31	0,50	547,25	1,00	550,96	1,23	553,57	1,40
	156	524,16	529,33	0,32	531,65	0,47	539,37	0,95	543,16	1,19	545,70	1,35

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 84 – Densidade de massa aparente ( $\rho$ )

Teor TiO <sub>2</sub>	CP	h <sub>1</sub> (mm)	h <sub>2</sub> (mm)	média (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)	média (mm)	c <sub>1</sub> (mm)	c <sub>2</sub> (mm)	média (mm)	m (g)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0%	1	40,05	40,15	40,10	39,69	40,66	40,18	161,42	161,80	161,61	546,30	2.098
	2	40,82	40,80	40,81	40,75	40,59	40,67	160,64	164,69	162,67	560,00	2.074
	3	40,25	40,05	40,15	40,37	40,65	40,51	161,10	162,43	161,77	540,17	2.053
	4	40,23	40,11	40,17	40,55	41,32	40,94	160,80	160,60	160,70	550,44	2.083
	5	40,13	39,95	40,04	40,27	41,11	40,69	162,26	162,73	162,50	550,14	2.078
	6	41,20	40,97	41,09	41,33	40,47	40,90	160,29	159,87	160,08	555,98	2.067
5%	51	40,34	40,00	40,17	40,98	40,45	40,72	160,91	160,92	160,92	572,81	2.176
	52	40,46	40,65	40,56	40,16	38,73	39,45	161,28	161,48	161,38	559,17	2.166
	53	40,30	39,56	39,93	42,23	39,44	40,84	163,28	162,75	163,02	566,81	2.132
	54	40,95	41,08	41,02	39,88	39,93	39,91	161,17	162,41	161,79	568,81	2.148
	55	40,11	40,11	40,11	40,55	40,82	40,69	160,82	160,95	160,89	573,81	2.186
	56	40,75	41,07	40,91	40,96	38,57	39,77	162,49	162,05	162,27	568,13	2.152
10%	101	41,05	39,76	40,41	40,89	40,21	40,55	163,49	162,72	163,11	568,83	2.129
	102	40,52	40,87	40,70	40,52	41,06	40,79	163,41	162,50	162,96	577,23	2.134
	103	40,83	41,23	41,03	40,75	40,74	40,75	160,73	161,29	161,01	567,68	2.109
	104	40,71	42,00	41,36	40,30	40,20	40,25	161,20	160,92	161,06	570,20	2.127
	105	40,56	41,04	40,80	40,01	41,12	40,57	160,73	161,12	160,93	560,66	2.105
	106	41,58	41,11	41,35	40,07	39,95	40,01	162,72	161,73	162,23	571,99	2.131
15%	151	40,08	40,12	40,10	40,27	40,42	40,35	161,11	161,17	161,14	584,89	2.244
	152	40,55	40,65	40,60	41,98	41,87	41,93	161,77	162,01	161,89	593,49	2.154
	153	40,85	40,97	40,91	40,77	40,94	40,86	162,34	162,27	162,31	584,90	2.156
	154	39,99	39,95	39,97	40,83	40,79	40,81	160,96	161,28	161,12	561,62	2.137
	155	40,62	40,62	40,62	40,72	40,79	40,76	160,84	161,20	161,02	573,09	2.150
	156	40,48	40,27	40,38	40,62	40,40	40,51	160,87	160,88	160,88	654,94	2.489

h: altura | L: largura | c: comprimento | m: massa |  $\rho$ : densidade

(fonte: elaborado pelo autor)



Tabela 85 – Módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ )

Teor TiO <sub>2</sub>	CP	c (mm)	t <sub>1</sub> ( $\mu$ s)	t <sub>2</sub> ( $\mu$ s)	t <sub>3</sub> ( $\mu$ s)	v (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_d$ (MPa)
0%	1	161,6	34,4	34,0	33,9	4,77	2.098	42.918
	2	162,7	34,8	38,1	34,4	4,73	2.074	41.741
	3	161,8	34,5	34,3	34,0	4,76	2.053	41.827
	4	160,7	35,1	34,4	34,0	4,73	2.083	41.881
	5	162,5	34,9	34,4	34,2	4,75	2.078	42.220
	6	160,1	34,9	34,3	34,2	4,68	2.067	40.755
5%	51	160,9	36,3	35,9	35,9	4,48	2.176	39.355
	52	161,4	35,8	35,9	35,4	4,56	2.166	40.513
	53	163,0	35,9	35,8	35,4	4,60	2.132	40.698
	54	161,8	35,8	35,4	35,4	4,57	2.148	40.382
	55	160,9	36,0	35,9	35,9	4,48	2.186	39.505
	56	162,3	36,2	35,9	35,9	4,52	2.152	39.574
10%	101	163,1	36,8	36,5	36,3	4,49	2.129	38.677
	102	163,0	35,9	36,3	35,9	4,54	2.134	39.571
	103	161,0	36,4	36,7	36,3	4,44	2.109	37.343
	104	161,1	35,9	35,8	35,9	4,49	2.127	38.528
	105	160,9	35,8	35,9	35,7	4,51	2.105	38.496
	106	162,2	35,9	35,9	35,4	4,58	2.131	40.286
15%	151	161,1	35,9	35,9	35,8	4,50	2.244	40.909
	152	161,9	36,3	35,9	35,8	4,52	2.154	39.638
	153	162,3	35,9	35,8	35,7	4,55	2.156	40.109
	154	161,1	36,4	36,4	36,1	4,46	2.137	38.311
	155	161,0	36,4	36,4	36,3	4,44	2.150	38.072
	156	160,9	36,2	35,9	35,9	4,48	2.489	44.985

c: comprimento | t: tempo | v: velocidade |  $\rho$ : densidade

(fonte: elaborado pelo autor)

## **ANEXO C - Dados meteorológicos**

As tabelas 86 e 87 apresentam os dados meteorológicos<sup>10</sup> referentes aos períodos de exposição das amostras manchadas com Rodamina B e cinza, respectivamente.

Tabela 86 – Dados meteorológicos do período de exposição das amostras, RhB

Idade (dias)	Precipitação (mm)	Umidade (%)	Insolação (h)	Nascer do Sol	Pôr do Sol
1	-	81,00	5,90	7:18	17:31
2	-	87,00	1,20	7:18	17:31
3	-	71,00	7,60	7:18	17:32
4	-	68,00	7,20	7:19	17:32
5	-	74,00	4,70	7:19	17:32
6	66,00	87,00	0,90	7:19	17:32
7	0,20	77,00	7,10	7:19	17:32
8	-	81,00	7,30	7:20	17:32
9	-	88,00	-	7:20	17:33
10	2,00	92,00	1,60	7:20	17:33
11	13,50	82,00	4,30	7:20	17:33
12	-	89,00	1,10	7:20	17:33
13	-	80,00	7,50	7:21	17:34
14	-	75,00	7,50	7:21	17:34
15	-	79,00	7,00	7:21	17:34
16	-	82,00	7,20	7:21	17:35
17	-	83,00	2,10	7:21	17:35
18	8,30	85,00	-	7:21	17:35
19	-	82,00	3,50	7:21	17:36
20	-	85,00	6,20	7:21	17:36
21	-	85,00	4,10	7:21	17:36
22	-	76,00	0,60	7:21	17:37
23	-	86,00	6,90	7:21	17:37
24	-	79,00	2,50	7:21	17:38
25	5,50	91,00	-	7:20	17:38
26	-	94,00	-	7:20	17:39
27	52,00	94,00	0,60	7:20	17:39
28	-	86,00	2,60	7:20	17:40

<sup>10</sup> Bases de dados consultadas:

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações e dados:** estações convencionais. Brasília, 2015. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>>. Acesso em: 2 ago. 2015.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Serviço de informação aeronáutica.** Brasília, 2015. Disponível em: < <http://www.aisweb.aer.mil.br/index.cfm?i=nascer-por-do-sol>>. Acesso em: 2 ago. 2015.

PORTO ALEGRE. **Tabelas de medição diária da precipitação de Porto Alegre.** Porto Alegre, 2016.

Disponível em: <[http://www2.portoalegre.rs.gov.br/ceic/default.php?p\\_secao=28](http://www2.portoalegre.rs.gov.br/ceic/default.php?p_secao=28)>. Acesso em: 7 fev. 2016.

Tabela 86 – Dados meteorológicos do período de exposição das amostras, RhB (continuação)

29	-	87,00	4,00	7:20	17:40
30	-	89,67	-	7:19	17:41
31	54,00	88,00	-	8:19	17:41
32	48,00	94,00	-	9:19	17:42
33	8,20	94,33	-	10:19	17:42
34	3,00	95,67	-	7:18	17:43
35	11,00	97,67	-	7:18	17:43
36	-	85,33	7,20	7:17	17:44
37	-	89,67	-	7:17	17:44
38	100,00	97,00	-	7:17	17:45
39	21,00	84,00	3,90	7:16	17:46
40	-	82,00	5,50	7:16	17:46
41	-	85,00	0,80	7:15	17:47
42	-	86,33	1,10	7:15	17:47
43	-	86,67	5,60	7:14	17:48
44	-	90,67	1,90	7:13	17:48
45	-	86,00	6,00	7:13	17:49
46	-	81,00	7,20	7:12	17:50
47	-	84,67	0,10	7:11	17:51
48	-	81,00	7,50	7:10	17:51
49	-	64,00	7,30	7:09	17:52
50	-	73,33	7,60	7:09	17:53
51	-	69,33	5,80	7:08	17:53
52	-	70,33	2,10	7:07	17:54
53	1,00	83,67	0,70	7:06	17:54
54	33,00	88,67	2,20	7:06	17:55
55	-	74,33	6,50	7:05	17:55
56	-	52,00	7,20	7:04	17:56
57	-	55,00	7,70	7:03	17:57
58	-	66,67	7,90	7:02	17:57
59	-	59,67	8,00	7:01	17:58
60	3,50	80,00	1,90	7:00	17:58
61	1,00	80,00	7,60	6:59	17:59
62	-	74,33	5,60	6:58	17:59
63	-	70,00	2,20	6:58	18:00
64	-	71,67	1,60	6:57	18:01
65	-	83,00	-	6:56	18:01
66	-	74,67	8,00	6:55	18:02
67	-	75,33	1,50	6:54	18:02
68	16,00	86,33	-	6:52	18:03

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 86 – Dados meteorológicos do período de exposição das amostras, RhB  
(continuação)

69	2,00	79,67	3,00	6:51	18:03
70	-	73,00	8,40	6:50	18:04
71	-	71,67	5,30	6:49	18:05
72	-	76,33	6,90	6:48	18:05
73	25,00	70,33	7,30	6:47	18:06
74	-	77,33	6,10	6:46	18:06
75	-	89,00	0,20	6:45	18:07
76	17,00	74,00	9,20	6:44	18:07
77	-	62,00	7,60	6:43	18:08
78	-	68,67	8,30	6:41	18:08
79	-	69,33	8,90	6:40	18:09
80	-	64,33	8,70	6:39	18:09
81	1,00	66,00	4,50	6:38	18:10
82	-	67,00	9,20	6:37	18:11
83	-	76,33	7,30	6:36	18:11
84	-	81,33	2,80	6:34	18:12
85	-	83,33	2,50	6:33	18:12
86	-	79,33	4,80	6:32	18:13

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 87 – Dados meteorológicos do período de exposição das amostras, cinza

Idade (dias)	Precipitação (mm)	Umidade (%)	Insolação (h)	Nascer do Sol	Pôr do Sol
1	-	82,00	3,50	7:21	17:36
2	-	85,00	6,20	7:21	17:36
3	-	85,00	4,10	7:21	17:36
4	-	76,00	0,60	7:21	17:37
5	-	86,00	6,90	7:21	17:37
6	-	79,00	2,50	7:21	17:38
7	5,50	91,00	-	7:20	17:38
8	-	94,00	-	7:20	17:39
9	52,00	94,00	0,60	7:20	17:39
10	-	86,00	2,60	7:20	17:40
11	-	87,00	4,00	7:20	17:40
12	-	90,00	-	7:19	17:41
13	54,00	88,00	-	8:19	17:41
14	48,00	94,00	-	9:19	17:42
15	8,20	94,00	-	10:19	17:42
16	3,00	96,00	-	7:18	17:43
17	11,00	98,00	-	7:18	17:43
18	-	85,00	7,20	7:17	17:44
19	-	90,00	-	7:17	17:44
20	100,00	97,00	-	7:17	17:45
21	21,00	84,00	3,90	7:16	17:46
22	-	82,00	5,50	7:16	17:46
23	-	85,00	0,80	7:15	17:47
24	-	86,00	1,10	7:15	17:47
25	-	87,00	5,60	7:14	17:48
26	-	91,00	1,90	7:13	17:48
27	-	86,00	6,00	7:13	17:49
28	-	81,00	7,20	7:12	17:50
29	-	84,67	0,10	7:11	17:51
30	-	81,00	7,50	7:10	17:51
31	-	64,00	7,30	7:09	17:52
32	-	73,33	7,60	7:09	17:53
33	-	69,33	5,80	7:08	17:53
34	-	70,33	2,10	7:07	17:54
35	1,00	83,67	0,70	7:06	17:54
36	33,00	88,67	2,20	7:06	17:55
37	-	74,33	6,50	7:05	17:55
38	-	52,00	7,20	7:04	17:56
39	-	55,00	7,70	7:03	17:57
40	-	66,67	7,90	7:02	17:57

Tabela 87 – Dados meteorológicos do período de exposição das amostras, cinza (continuação)

41	-	59,67	8,00	7:01	17:58
42	3,50	80,00	1,90	7:00	17:58
43	1,00	80,00	7,60	6:59	17:59
44	-	74,33	5,60	6:58	17:59
45	-	70,00	2,20	6:58	18:00
46	-	71,67	1,60	6:57	18:01
47	-	83,00	-	6:56	18:01
48	-	74,67	8,00	6:55	18:02
49	-	75,33	1,50	6:54	18:02
50	16,00	86,33	-	6:52	18:03
51	2,00	79,67	3,00	6:51	18:03
52	-	73,00	8,40	6:50	18:04
53	-	71,67	5,30	6:49	18:05
54	-	76,33	6,90	6:48	18:05
55	25,00	70,33	7,30	6:47	18:06
56	-	77,33	6,10	6:46	18:06
57	-	89,00	0,20	6:45	18:07
58	17,00	74,00	9,20	6:44	18:07
59	-	62,00	7,60	6:43	18:08
60	-	68,67	8,30	6:41	18:08
61	-	69,33	8,90	6:40	18:09
62	-	64,33	8,70	6:39	18:09
63	1,00	66,00	4,50	6:38	18:10
64	-	67,00	9,20	6:37	18:11
65	-	76,33	7,30	6:36	18:11
66	-	81,33	2,80	6:34	18:12
67	-	83,33	2,50	6:33	18:12
68	-	79,33	4,80	6:32	18:13
69	-	70,00	9,6	7:05	17:55
70	-	80,67	1,00	7:04	17:56

(fonte: elaborado pelo autor)

## **ANEXO D - Dados colorimétricos**



As tabelas 88 e 89 apresentam, respectivamente, os valores médios obtidos para variação de cor ( $\Delta E$ ) e luminosidade ( $L^*$ ).

Tabela 88 – Valores médios para  $\Delta E$ 

Idade		3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	56 dias	70 dias	84 dias	
Norte	45°	0%	43,50	45,89	49,96	50,23	51,42	51,98	53,12	52,13	53,08
			42,52	40,07	45,75	50,15	48,81	52,26	53,44	53,30	53,63
		5%	52,96	52,65	53,60	53,95	52,64	54,34	55,29	55,33	55,51
			53,41	53,41	53,46	48,51	53,21	54,75	55,24	54,29	55,39
		10%	53,19	53,50	53,97	53,80	53,35	54,87	55,29	55,23	55,43
			53,11	53,07	53,92	54,09	53,84	55,33	55,73	55,40	55,84
	15%	50,27	50,49	52,49	52,04	52,21	53,42	54,09	53,71	53,87	
		54,34	54,45	54,48	54,60	54,70	55,55	56,21	55,84	56,31	
	90°	0%	37,52	39,20	46,50	49,33	48,39	51,68	53,34	53,37	53,72
			34,23	36,42	46,32	48,99	48,57	51,53	53,14	53,34	53,57
		5%	46,40	37,82	51,65	53,18	52,06	53,88	55,11	55,16	55,28
			50,42	50,28	53,19	54,05	53,31	54,90	55,32	55,07	55,52
		10%	52,99	53,51	54,34	54,99	54,32	55,88	56,00	56,20	56,33
			52,16	51,57	54,10	54,36	53,60	54,61	55,26	55,44	55,36
	15%	52,53	47,16	53,00	54,44	53,94	55,31	55,86	55,84	56,00	
		53,61	53,65	53,39	54,78	54,17	54,98	55,85	55,79	55,96	
Leste	45°	0%	28,87	33,97	41,64	46,96	47,35	50,18	53,90	53,63	53,81
			34,37	42,20	43,73	51,52	48,38	51,74	53,21	53,07	53,26
		5%	49,87	51,54	52,02	52,33	52,46	54,88	55,71	55,36	55,50
			40,50	44,10	49,80	53,53	51,48	53,35	54,64	54,63	54,50
		10%	50,21	51,38	52,73	54,26	53,27	53,64	55,66	55,75	55,84
			47,51	51,23	51,49	52,60	52,92	53,81	54,94	54,90	54,95
	15%	52,19	52,76	54,04	50,71	54,55	55,50	56,12	55,96	56,28	
		52,16	53,16	53,32	54,14	53,66	55,77	55,97	56,10	56,07	
	90°	0%	23,77	33,55	37,67	44,01	44,39	50,74	52,79	52,91	52,00
			16,82	15,60	18,77	24,87	26,30	35,47	47,05	49,82	50,61
		5%	40,18	46,99	50,47	50,47	51,63	53,76	54,70	55,00	54,53
			35,14	42,52	49,74	51,19	50,42	53,76	54,73	54,82	54,19
		10%	45,27	45,18	51,14	52,76	51,34	54,09	54,67	54,70	54,76
			46,62	50,13	52,13	52,79	52,38	54,65	55,22	55,31	55,10
	15%	50,71	52,24	52,09	53,23	53,13	54,79	55,86	55,98	56,24	
		49,50	51,47	52,71	53,49	53,53	54,63	55,33	55,29	55,45	
Sul	45°	0%	33,09	40,25	42,58	47,95	47,12	49,96	53,43	53,29	53,63
			33,07	38,50	39,94	47,91	47,32	50,34	53,51	53,28	53,71
		5%	42,06	47,86	49,61	51,56	51,31	52,60	54,35	54,27	54,56
			50,72	52,69	51,87	53,27	52,22	54,23	54,88	54,81	55,10
		10%	43,34	52,35	51,32	51,69	52,58	53,92	54,92	54,66	55,03
			50,86	51,12	52,31	53,23	53,38	53,61	55,34	55,27	55,30
	15%	51,47	51,94	53,07	54,00	53,71	54,44	55,88	55,79	55,94	
		51,81	53,23	53,45	54,12	54,09	54,61	55,91	55,95	56,10	
	90°	0%	13,79	23,05	31,47	39,05	38,95	48,14	52,01	52,38	53,15
			10,51	23,50	26,45	36,19	37,08	48,78	51,51	52,21	52,74
		5%	35,51	40,02	48,26	50,55	49,98	53,52	54,66	54,69	54,96
			29,05	31,93	48,01	51,14	50,16	53,79	55,25	55,30	55,58
		10%	47,82	49,41	51,84	52,42	52,09	53,47	54,58	54,61	54,59
			36,98	44,80	50,52	52,69	52,29	53,81	54,54	54,56	54,69
	15%	47,05	51,02	52,71	53,88	53,82	55,26	55,76	55,91	55,38	
		42,13	46,40	50,27	52,38	51,49	53,76	54,72	54,90	55,06	

Tabela 88 – Valores médios para  $\Delta E$  (continuação)

Idade		3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	56 dias	70 dias	84 dias	
Oeste	45°	0%	39,15	43,43	48,48	51,19	50,69	52,47	53,33	53,12	53,34
			39,77	42,78	48,07	49,96	48,91	51,74	53,42	53,16	53,63
		5%	49,86	51,28	53,36	54,10	53,16	54,98	56,24	55,79	56,00
			50,90	51,97	53,90	54,34	53,37	54,50	55,59	55,39	55,82
		10%	49,40	51,91	53,62	54,11	53,40	54,89	55,42	55,19	55,45
			50,10	51,31	53,17	53,50	52,84	54,35	54,97	54,95	54,87
	15%	49,10	51,72	54,71	54,91	54,36	55,69	56,52	56,64	56,70	
		48,90	50,57	52,36	53,34	53,02	55,10	55,37	55,42	55,18	
	90°	0%	26,19	35,64	43,67	48,68	46,70	51,19	52,22	52,82	53,43
			30,71	36,23	44,24	48,26	47,79	51,84	53,39	53,14	53,77
		5%	28,00	37,76	51,34	53,29	52,58	54,24	54,99	55,05	55,60
			35,55	36,62	49,52	52,12	51,75	53,38	54,86	55,10	55,07
10%		34,49	41,29	50,69	52,52	52,22	53,94	54,22	54,16	54,45	
		36,34	39,17	50,15	52,77	52,79	54,20	54,88	53,78	54,89	
15%	41,51	42,09	51,26	53,64	53,36	54,64	55,49	54,67	55,23		
	36,10	42,05	50,38	53,17	52,67	54,50	55,51	55,34	56,09		
0°	0%	24,76	29,49	40,06	48,29	47,13	51,34	53,35	53,19	53,56	
		22,99	20,35	27,45	34,37	36,68	44,36	51,28	52,17	52,86	
	5%	47,95	49,49	50,81	51,69	52,60	53,87	54,83	54,95	55,19	
		52,15	51,36	53,06	52,91	53,08	54,82	55,58	55,45	55,96	
	10%	52,79	52,72	53,11	52,96	53,37	55,00	55,71	55,56	55,81	
		52,62	53,08	52,29	53,00	53,10	54,84	55,44	54,78	55,30	
	15%	50,27	51,37	52,35	52,66	53,64	55,87	55,87	55,93	55,87	
		51,38	52,37	52,91	53,61	54,24	55,45	56,49	56,37	56,59	
	Película pasta	5%	52,11	52,08	51,94	52,34	53,10	53,33	53,76	53,64	54,01
			53,42	53,00	52,21	52,93	52,68	53,07	54,25	53,75	54,64
10%		53,60	54,08	53,38	54,02	53,52	55,06	55,60	55,16	55,66	
		52,73	53,45	52,12	53,94	55,02	55,12	55,63	55,74	56,18	
15%		53,56	54,08	54,17	53,67	54,04	55,90	56,21	55,78	56,29	
		52,60	52,89	52,96	53,69	53,39	54,57	55,11	54,54	54,74	
Película argamassa	5%	54,38	53,08	56,83	57,19	57,47	58,02	58,27	57,64	58,63	
		53,57	53,82	56,56	57,39	57,39	58,33	58,16	58,25	58,65	
	10%	54,92	53,88	56,20	57,00	55,65	58,04	58,71	58,16	58,90	
		54,61	53,17	54,78	57,31	56,28	58,23	58,36	58,60	58,78	
	15%	55,93	54,54	56,66	57,19	56,83	57,72	58,24	57,03	58,49	
		55,19	54,62	49,24	57,01	56,67	57,96	58,46	57,70	58,98	

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 89 – Valores médios para L\*

Idade		0 dias	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	56 dias	70 dias	84 dias	
Norte	45°	0%	61,74	80,71	80,63	81,67	79,62	83,23	82,71	84,66	82,18	84,30
			61,98	80,47	78,69	76,52	77,85	71,57	82,47	84,40	83,97	84,84
		5%	74,42	87,71	87,34	86,11	86,22	82,65	86,51	88,31	88,10	88,13
			76,36	87,75	87,29	85,76	67,79	83,66	86,73	87,68	85,39	87,59
		10%	75,76	87,66	87,43	86,60	85,43	83,50	86,70	87,27	86,85	87,22
			75,22	87,94	88,19	87,05	86,49	85,33	88,15	88,61	87,60	88,36
		15%	68,04	82,59	82,45	83,29	80,03	79,02	82,67	83,45	82,46	82,17
			77,28	88,34	88,62	87,21	86,45	86,23	87,41	88,07	87,47	87,86
	90°	0%	67,38	79,40	79,61	80,72	80,44	75,42	82,97	84,97	84,73	85,34
			62,36	77,13	77,39	78,82	78,93	76,88	82,52	84,23	84,61	84,76
		5%	75,48	84,92	79,26	85,75	86,17	84,24	86,54	87,99	87,77	87,98
			70,01	86,01	86,15	85,82	86,43	84,32	87,60	88,17	87,43	88,27
		10%	71,44	88,51	88,80	87,83	88,26	86,33	89,35	89,17	89,30	89,52
			71,21	87,81	87,39	87,74	87,36	84,97	86,88	87,61	87,73	87,39
		15%	76,29	88,30	84,56	85,75	87,65	85,72	88,11	88,57	88,18	88,56
			75,33	88,76	88,78	85,92	87,97	85,93	87,55	88,96	88,61	88,79
Leste	45°	0%	60,76	74,37	77,20	72,06	74,43	71,88	76,79	85,86	85,09	84,93
			66,33	77,89	79,53	71,34	82,06	70,78	80,47	84,13	83,71	83,79
		5%	69,45	85,96	86,63	84,81	83,90	82,70	87,01	88,39	87,64	87,58
			64,74	80,49	81,92	82,70	85,65	80,92	84,28	86,48	85,94	85,31
		10%	73,74	86,89	86,72	85,41	87,28	83,94	84,32	88,41	88,21	88,09
			67,54	83,76	85,68	82,20	83,74	81,99	83,07	85,81	85,57	85,70
		15%	76,75	87,93	87,56	87,48	80,79	86,99	88,13	88,93	88,27	88,77
			70,73	87,86	88,20	85,88	86,58	84,47	88,42	88,04	88,06	87,54
	90°	0%	67,51	74,15	78,06	74,53	77,20	71,96	82,23	83,60	83,23	77,04
			52,52	65,40	64,88	57,42	66,08	61,50	73,66	79,02	79,66	74,40
		5%	73,28	81,61	84,96	84,45	81,33	82,50	86,04	86,99	87,25	85,52
			72,02	80,22	83,47	86,06	83,68	82,44	87,01	87,64	87,24	84,49
		10%	68,93	83,45	82,80	85,08	85,92	81,82	86,28	86,87	86,62	86,13
			68,97	83,71	85,24	85,09	84,77	82,05	86,09	86,58	86,04	86,38
		15%	75,28	87,81	88,39	87,00	86,83	85,72	87,61	88,95	88,72	89,04
			72,03	86,24	87,30	86,94	86,61	86,07	87,57	87,76	87,53	87,39
Sul	45°	0%	70,13	78,84	80,74	73,73	78,64	70,95	77,25	85,22	84,85	85,19
			68,22	79,22	80,99	71,34	78,69	72,11	78,43	85,64	84,57	85,33
		5%	65,36	81,56	83,57	81,38	82,58	80,92	83,09	86,34	85,82	86,09
			75,60	84,71	87,01	83,15	84,66	80,88	85,15	86,26	85,79	86,39
		10%	67,92	80,43	87,53	82,22	81,88	81,68	84,47	86,28	85,17	85,64
			71,67	86,54	86,53	84,76	85,13	84,53	83,92	87,70	87,17	87,11
		15%	76,35	87,05	87,16	85,59	86,40	84,81	85,23	88,26	87,76	87,74
			78,19	87,14	88,04	86,94	87,04	86,14	86,11	88,59	88,36	88,60
	90°	0%	60,32	68,41	74,16	75,53	78,10	70,37	82,30	84,96	84,06	84,86
			55,85	62,26	72,60	71,62	74,78	67,26	81,99	83,89	83,47	84,04
		5%	69,08	79,50	81,07	84,77	84,66	82,09	86,64	87,94	87,58	87,87
			69,19	78,21	78,31	86,16	86,48	82,70	87,60	88,98	88,58	88,69
		10%	75,16	84,05	84,87	85,37	84,59	82,83	84,91	86,50	86,19	86,01
			66,92	80,02	83,38	84,77	85,48	84,68	85,99	86,92	86,46	86,70
		15%	75,66	86,16	88,31	87,90	88,15	87,58	89,22	89,47	89,42	88,15
			69,35	82,76	85,41	86,21	86,45	84,99	87,13	88,01	87,79	87,79

Tabela 89 – Valores médios para L\* (continuação)

Idade		0 dias	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	56 dias	70 dias	84 dias	
Oeste	45°	0%	67,53	79,41	81,18	78,67	80,90	78,87	82,79	83,88	83,71	84,06
			63,24	79,30	79,78	78,91	79,84	75,15	80,24	84,00	83,36	84,36
		5%	68,33	87,15	87,88	86,84	87,13	84,11	87,38	89,38	88,12	88,10
			77,36	86,77	87,26	86,59	86,83	84,39	86,50	88,52	87,82	88,78
		10%	68,54	85,94	87,23	86,34	86,58	83,93	86,92	87,78	87,10	87,26
			70,76	84,81	85,44	85,15	84,87	82,54	85,54	86,53	86,33	86,07
		15%	71,13	86,77	88,43	88,73	87,96	86,34	88,14	89,47	89,30	89,27
			65,03	84,47	85,93	84,26	84,78	82,74	86,44	86,12	86,07	85,09
	90°	0%	63,85	74,50	77,27	78,40	80,23	75,68	82,50	82,57	83,63	84,65
			72,42	77,43	77,55	81,15	81,62	78,07	83,93	85,15	84,18	85,34
		5%	61,66	76,34	80,44	86,40	86,19	84,61	87,50	87,76	87,27	88,47
			65,81	79,82	79,70	85,14	85,48	84,33	85,10	86,88	86,71	86,96
		10%	64,89	77,96	81,00	84,83	85,19	84,25	86,35	85,98	85,59	85,98
			66,90	79,73	80,21	85,49	85,57	85,18	86,79	87,52	81,82	86,59
		15%	66,19	82,83	68,18	85,52	86,97	86,49	87,60	88,49	86,48	87,56
			65,13	81,03	83,33	86,53	86,95	86,70	87,96	88,68	88,22	86,28
0°	0%	52,15	70,96	74,48	70,97	78,04	69,95	80,74	84,40	83,85	84,24	
		53,22	68,29	66,34	58,90	65,46	63,89	70,09	79,56	79,32	79,63	
	5%	72,57	84,96	85,07	81,14	80,65	81,09	84,12	85,83	85,58	85,85	
		70,87	87,12	83,49	84,65	82,95	81,53	85,26	87,19	86,31	87,17	
	10%	71,32	87,31	86,73	84,59	83,39	82,62	85,37	86,92	86,06	86,54	
		74,11	86,06	85,84	82,11	82,99	79,79	82,01	84,23	82,69	83,85	
	15%	67,89	85,27	84,91	83,62	82,80	82,59	86,68	86,60	86,28	85,66	
		73,09	87,44	87,52	85,62	85,38	84,50	84,52	87,50	87,13	86,87	
Película pasta	45°	5%	73,05	84,20	83,66	81,33	81,61	83,49	83,63	84,14	83,84	84,34
			73,49	85,83	84,80	81,64	82,80	81,65	82,71	85,53	84,01	85,89
		10%	77,30	87,61	88,02	85,06	85,82	84,15	87,14	88,07	86,86	87,69
	15%		74,23	88,21	88,66	83,98	86,70	88,68	87,89	88,64	88,25	88,98
			74,06	89,11	89,18	87,29	85,47	85,49	88,77	89,07	87,98	88,70
			72,76	86,45	86,65	84,65	85,46	86,90	86,40	87,27	85,21	86,04
Película argamassa	45°	5%	75,61	91,24	91,04	91,74	91,39	92,01	92,34	92,35	91,02	92,48
			74,54	91,44	92,21	92,14	91,59	91,00	92,16	91,88	91,69	92,42
		10%	80,29	92,29	92,44	92,15	92,32	91,33	92,98	93,38	92,42	93,13
	15%		79,68	91,59	92,63	91,66	92,99	93,13	93,67	92,42	92,99	92,92
			81,12	92,41	92,23	92,53	92,01	92,79	92,49	92,56	90,69	92,66
			82,70	92,80	92,88	74,04	92,18	92,34	93,06	93,02	91,94	93,41

(fonte: elaborado pelo autor)