


# Efeito do uso do fotocatalisador $\text{TiO}_2$ sobre as propriedades da argamassa estabilizada

*Effect of the use of  $\text{TiO}_2$  photocatalyst on the properties of ready-mix stabilized mortar*

William José Kappes Fleck 

Eduardo Polesello 

Felipe Augusto Leão 

## Resumo

Como fatores que afetam as fachadas de edifícios destacam-se as ações por intempéries como chuva e o sol, além dos esforços mecânicos, que podem causar, principalmente, fissuras e infiltrações em revestimentos de argamassa. Vale destacar também que para a presença de sujidades e a própria poluição dos gases na atmosfera, que afetam a estética da edificação, já se tem estudos utilizando fotocatalíticos como alternativa para autolimpeza de fachadas submetidas a esses agentes agressivos. Considerando essa abordagem, este estudo avaliou o efeito nas propriedades da argamassa estabilizada quando incorporado à massa um material fotocatalisador, o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), considerando quatro diferentes teores de incorporação: 0% (referência), 5%, 10% e 15%, sobre a massa de cimento da mistura. Foi analisado se ocorre, ou não, alguma alteração nas propriedades dessa argamassa (índice de consistência, densidade de massa, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água), e o efeito de autolimpeza avaliada com a degradação da rodamina B durante 120 minutos de exposição à radiação UV. A incorporação do  $\text{TiO}_2$  na argamassa estabilizada não gerou alterações significativas na maioria das suas propriedades físicas, mecânicas e de autolimpeza estudadas, mesmo observando melhor autolimpeza para 15% em uma das amostras ensaiadas.

**Palavras-chave:** Argamassa estabilizada. Fotocatalisador. Dióxido de titânio. Propriedades da argamassa.

## Abstract

*Among the factors that affect the building facades, we can highlight the actions caused by weathering such as rain and sun, in addition to mechanical efforts, which can mainly cause cracks and infiltrations in mortar coverings. It is also worth noting that for the presence of dirt and gaseous pollution in the atmosphere, which affect the aesthetics of the building, there are already studies using photocatalytic as an alternative for self-cleaning facades subjected to these aggressive agents. Considering this approach, this study evaluated the effect on the properties of ready-mix stabilized mortar when a photocatalyst material was incorporated into the mass, the titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ), considering four different incorporation levels: 0% (reference), 5%, 10% and 15%, on the cement mass of the mixture. It was analyzed whether, or not, changes occurred in the properties of this mortar (consistency index, mass density, flexural tensile strength, compressive strength and water absorption), in addition to verifying the self-cleaning effect evaluated with the degradation of rhodamine B during 120 minutes of exposure to UV radiation. The incorporation of  $\text{TiO}_2$  into the stabilized mortar did not generate significant changes in most of its physical, mechanical and self-cleaning properties studied, even observing better self-cleaning for 15% in one of the tested samples.*

<sup>1</sup>William José Kappes Fleck

<sup>1</sup>Universidade FEEVALE  
Novo Hamburgo - RS - Brasil

<sup>2</sup>Eduardo Polesello

<sup>2</sup>Universidade FEEVALE  
Novo Hamburgo - RS - Brasil

<sup>3</sup>Felipe Augusto Leão

<sup>3</sup>Universidade FEEVALE  
Novo Hamburgo - RS - Brasil

Recebido em 18/06/24

Aceito em 30/09/24

**Palavras-chave:** Stabilized mortar. Photocatalyst. Titanium dioxide. Mortar properties.

## Introdução

As fachadas de uma edificação podem ter valor estético, expressando características socioeconômicas, culturais e psicossociais dos habitantes de determinada localidade. Além da função estética, a fachada também é barreira protetora de diversas condições do ambiente externo garantindo, entre outros aspectos, confortos térmico e acústico aos usuários. Essas fachadas são afetadas por diversos agentes agressivos, a exemplo da radiação solar, chuva, umidade, entre outros. Particularmente para revestimentos em argamassa, a ação desses agentes climáticos, ou poluição oriunda da urbanização, afetam diretamente a durabilidade e a estética da edificação, demandando maior frequência nas manutenções (CASARIN *et al.*, 2022; ANFAPA & ITeC, 2008; Salgado, 2009). Pode-se citar, ainda, a ocorrência de vandalismos e pichações causando, principalmente, através dessas ações, danos na estética e gerando poluição visual, o que afeta a população dos arredores (Spinelli, 2015).

Em fachadas revestidas por argamassa a variação da temperatura e umidade geram a movimentação, dilatação e contração, do revestimento que, quando contido de algum modo, acaba gerando fissuras. Essas fissuras, que inicialmente afetam a estética, com o passar do tempo e a continuidade do ciclo de secagem e umidificação, potencializam a incidência de outras anomalias, como esfarelamento e eflorescência no revestimento, além de acúmulo de sujidades e poluição, potencializando os problemas estéticos decorrentes disso (Sá *et al.*, 2015; Cincotto, 1988; Bauer, 1997; Neto *et al.*, 1999).

Campos (2009) constatou que o custo de manutenção para fachadas com revestimento de argamassa é variável em função da extensão de área degradada. O autor destaca a importância na execução de manutenções sempre que identificada alguma manifestação patológica, a fim de evitar, com o agravamento da deterioração, que a edificação seja mais comprometida, demandando, em casos extremos, inclusive a substituição de todo o revestimento. Benedito (2017) visualizou que em 5 anos foi gasto mais de 400 mil reais em manutenção de fachada de edifícios, sendo os agentes degradantes principais associados a processos biológicos, descascamento, empolamento e eflorescência.

Bezerra *et al.* (2023) reforçam a importância no desenvolvimento de materiais à base de cimento com propriedades fotocatalíticas, pois há uma crescente necessidade que os materiais cimentícios, além de atender ao desempenho mecânico, tenham melhores comportamentos com vistas à ecoeficiência. O estudo registrou que mesmo com possíveis aglomerados de partículas a microestrutura mostrou-se coesa e densificada, indicando ser viável o uso de fotocatalisadores em matrizes a base de cimento, e observam que não há prejuízo nas propriedades intrínsecas da mistura (hidratação e microestrutura). Contemplando essas problemáticas, podem ser utilizados alguns materiais fotocatalíticos como solução atrelada aos revestimentos em argamassa para atuar de forma autolimpante, reduzindo o impacto das degradações causadas nas fachadas. Assim, a utilização de argamassas autolimpantes tem se tornado uma solução atraente, uma vez que sua principal característica se dá através do uso de semicondutores com propriedades fotocatalíticas interagindo com outros elementos presentes na superfície. Estes óxidos fotocatalíticos degradam componentes orgânicos, poluentes atmosféricos, compostos orgânicos voláteis, bem como os não voláteis. Dentre os semicondutores mais utilizados, o  $\text{TiO}_2$  se destaca por sua ótima capacidade fotocatalítica (Prudente, 2020; Chen; Poon, 2009; Cassar, 2004; Dantas, 2021).

Entre os tipos de argamassas que as obras utilizam, destaca-se a argamassa estabilizada, pois está pronta para uso, reduzindo desperdícios em obra e acelerando o processo construtivo. A argamassa estabilizada tem como foco se manter trabalhável em um período de até 72 horas após sua mistura, pelo uso de aditivos como o estabilizador de hidratação, que visa estender a trabalhabilidade, e do incorporador de ar, que busca melhorar essa propriedade da argamassa (Carasek, 2010; Casali *et al.*, 2018).

Considerando a possibilidade de uso de revestimento aparente com argamassa estabilizada nas fachadas das edificações, e buscando entender melhor o efeito que a incorporação de um agente fotocatalítico gera no comportamento da argamassa, justificam-se estudos considerando essa abordagem. Desta forma, esta pesquisa objetiva estudar o efeito nas propriedades da argamassa estabilizada quando incorporada a mesma um material fotocatalisador. Para o estado fresco registrou-se o índice de consistência e a densidade de massa. Já no estado endurecido, determinou-se o desempenho mecânico pela resistência à tração na flexão e resistência à compressão, sua absorção de água e seu índice de vazios, finalizando com uma avaliação da ação do fotocatalítico através de ensaios de degradação do manchamento em câmara UV. Destaca-se a importância deste estudo já que na literatura não foram identificadas pesquisas que considerem a incorporação de  $\text{TiO}_2$  em argamassa estabilizada fornecida comercialmente.

## Referencial teórico

Ao se analisar o processo de mistura da argamassa estabilizada, Bauer *et al.* (2017) registraram uma redução de 15% da resistência à compressão através da mistura mecânica, devido ao maior teor de ar incorporado associado a esse tipo de preparo. Ramos *et al.* (2017) também identificaram esse efeito ao registrarem uma diferença de 7% a menos de incorporação de ar para a argamassa com mistura manual quando comparada com a mistura mecânica, além de proporcionar uma melhor retenção de água e facilidade de espalhamento da argamassa.

Estudando o uso do agente fotocatalisador dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) em revestimento em argamassa de fachada, Viapiana *et al.* (2017), com análises de medição de cor com uso de um espectrofotômetro, utilizando o método CIELAB, nas idades de 1, 2, 3, 30 e 240 dias, registraram que há eficiência da autolimpeza na fachada com presença de material biológico. No entanto, para manchas provenientes de chuva/poluição, as sujeiras ficaram em partes rugosas do revestimento, não sendo possível, pelo ensaio de cor, confirmar a eficiência da autolimpeza promovida pelo agente fotocatalisador.

O efeito de autolimpeza pelo agente fotocatalisador  $\text{TiO}_2$ , quando incorporado em uma argamassa com traço de 1:3 (cimento/agregado miúdo seco), nos teores de 0%, 5% e 10% em relação a massa de cimento, para diferentes métodos de aplicação e a análise através de método de manchamento, foi foco nos estudos de Treviso (2016) e Austria (2015). Austria (2015) realizou o manchamento através da aspersão de cinzas, rodamina B e tinta spray. Já Treviso (2016) efetuou através da imersão das peças em um recipiente, utilizando como manchamento a cinza e rodamina B.

O estudo de Austria (2015) mostrou que com o aumento gradativo do teor de  $\text{TiO}_2$  e da relação a/c (analisando entre 0,57 e 0,60), manteve-se uma resistência à compressão constante. Já Treviso (2016), mantendo a relação a/c fixa em 0,46 com uso de aditivo superplastificante, visualizou que as argamassas com a adição de  $\text{TiO}_2$  apresentaram um resultado superior nas resistências à compressão e à tração na flexão, sugerindo o preenchimento dos vazios das estruturas pelo  $\text{TiO}_2$ . Tal aspecto também foi visualizado por Austria (2015), ao analisar a argamassa para um traço de 1:2 e uma relação a/c de 0,41 a 0,45. Austria (2015), ainda visualizou que quanto mais  $\text{TiO}_2$  for adicionado a mistura, uma maior densidade e um menor teor de ar incorporado é aferido, no entanto, para Treviso (2016) houve maior tendência de ar incorporado nas argamassas com  $\text{TiO}_2$ .

Segundo estudo realizado por Wang *et al.* (2022), a presença do  $\text{TiO}_2$  na argamassa afeta a morfologia das fases CSH durante a fase de carbonatação da argamassa, destacando que a presença de  $\text{TiO}_2$  influencia a diferença de volume entre os hidratos e os produtos de carbonatação, e, como consequência, interfere também no efeito da autolimpeza. A carbonatação precoce de matrizes cimentícias, incompletamente hidratadas, prejudica a autolimpeza, especialmente com uso de cimento Portland comum, sendo recomendado uma mistura no teor de 5% de  $\text{TiO}_2$ , junto de algum ligante híbrido (cimento e sílica), fazendo com que seja mais resistente a deterioração da propriedade de autolimpeza após a hidratação e carbonatação (Liu *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022).

Para comportamento quanto a absorção de água por capilaridade da argamassa quando adicionado  $\text{TiO}_2$ , Dantas *et al.* (2019) constataram mudanças quando comparada com a referência, ao registrar uma maior absorção de água para as argamassas com a incorporação do  $\text{TiO}_2$ , ao analisarem duas amostras do agente fotocatalisador de diferentes fornecedores, considerando dois diferentes tipos de mistura, misturador padrão e misturador com alta energia de dispersão. Os autores registraram ainda um aumento na absorção de água, comparando as duas amostras para um mesmo procedimento de mistura, variando de 33,3% a 158,3% em relação a absorção de água registrada na argamassa de referência, no entanto cabe salientar que neste estudo os autores ajustaram o espalhamento da argamassa com  $\text{TiO}_2$  com a adição de água.

Avaliando a argamassa no estado fresco, Dantas *et al.* (2019), visualizaram que a adição de  $\text{TiO}_2$  diminui o índice de consistência da argamassa, sendo necessário adição de água para uma melhor trabalhabilidade. Esta constatação corroborou o registro feito por Albuquerque *et al.* (2021), no qual a cada aumento no teor de  $\text{TiO}_2$  (5%, 10% e 15% em função da massa do cimento) os autores identificaram uma redução na medida do índice de consistência, chegando a 6% para a argamassa com 15% de  $\text{TiO}_2$  em comparação com a argamassa de referência, justificando esse comportamento pelo aumento da presença de partículas finas na mistura, porém cabe destacar que os autores utilizaram resíduo do  $\text{TiO}_2$ . Adicionalmente, ao analisar o comportamento no estado endurecido, Albuquerque *et al.* (2021), utilizando o resíduo do  $\text{TiO}_2$  nos teores de 5%, 10% e 15% em função da massa do cimento, registraram que as resistências à compressão e à tração na flexão, analisando estatisticamente pelo método da ANOVA, não apresentaram alteração significativa nos resultados aos 28 dias de idade.

Liu *et al.* (2022) e Wang *et al.* (2022), buscando simular a luz UV em condições naturais, realizaram testes para avaliar a capacidade autolimpante com exposição das argamassas em câmara UV utilizando uma lâmpada UV com uma densidade de  $10 \pm 0,05$  W/m<sup>2</sup>. Ambos os estudos avaliaram as mudanças de cor na superfície das argamassas com o uso de espectrômetro. Os ensaios foram realizados com intervalos diferentes, Wang *et al.* (2022) aferiram após 30, 60, 120, 240, 480, 960 e 1560 min, enquanto Liu *et al.* (2022) em 0, 15, 45, 105, 225, 345, 1365, 1785 e 2800 min. Ambos os estudos realizaram o manchamento com a rodamina B, conforme indica a UNI 11259 (Sai Global, 2016), em método de aspersão.

Otuka (2022) realizou os ensaios para avaliação da autolimpeza com um reator com uma lâmpada de vapor de mercúrio com 150W sem o bulbo e, previamente ao ensaio, as amostras de argamassa utilizadas, produzidas com cimento branco, foram secas durante 24 horas em uma temperatura de 60 °C e após imersos em solução de 20mg/L de rodamina B durante 24 horas. O estudo avaliou a característica autolimpante, pelo uso de um TiO<sub>2</sub> composto por 75% anatase e 25% rutilo, através de registros fotográficos a cada 15 minutos, durante um período de 300 minutos, sendo visível que quanto maior o teor de TiO<sub>2</sub> presente na mistura, ocorreu maior degradação da rodamina B da superfície.

## Materiais e métodos

A representação esquemática das etapas do programa experimental desenvolvido ao longa da realização deste estudo está ilustrada na Figura 1.

A definição dos teores de TiO<sub>2</sub> utilizados, 0%, 5%, 10% e 15%, considerou como base os estudos de Treviso (2016), Austria (2015) e Albuquerque *et al.* (2021). Destaca-se que esse percentual é sobre a massa de cimento da mistura.

### Materiais utilizados

Os materiais utilizados para a realização do programa experimental foram a argamassa estabilizada e nanopartículas do fotocatalisador TiO<sub>2</sub>, com especificação Anatase.

A argamassa estabilizada é uma argamassa a base de cimento produzida em uma central dosadora localizada na região do Vale do Sinos-RS, que utiliza cimento CP II F 40. A Tabela 1 apresenta algumas informações da ficha técnica do fornecedor, quanto aos limites considerados para cada propriedade.

O TiO<sub>2</sub> utilizado foi fornecido por uma empresa, distribuidora do produto, localizada na região do Vale dos Sinos – RS. As características do produto, considerando as informações da ficha técnica apresentada pelo fabricante, estão detalhadas no Tabela 2.

Figura 1 - Matriz detalhando as etapas do programa experimental da pesquisa

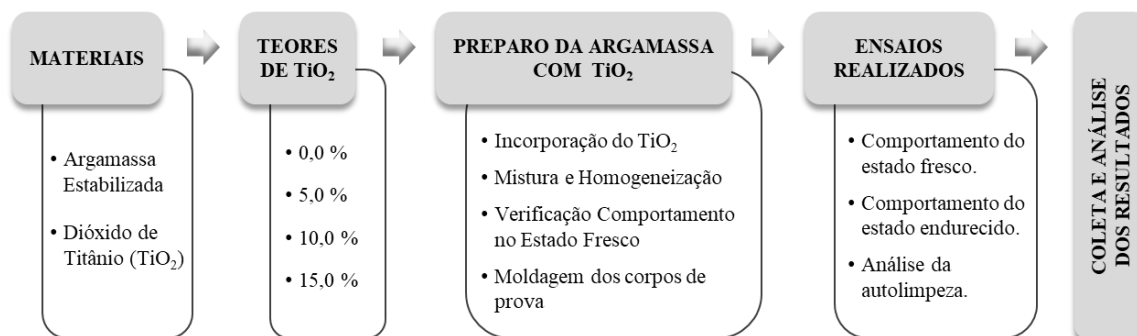


Tabela 1 - Informações da ficha técnica para argamassa estabilizada utilizada

Propriedade	Resistência aos 28 dias (MPa)			Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Retenção de Água (%)
	Compressão	Tração na Flexão	Aderência à Tração		
Especificação do fabricante	> 4,0	> 2,0	> 0,30	1750 a 1850	> 95,0

Fonte: dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 2 - Caracterização do TiO<sub>2</sub> anatase utilizado na pesquisa

Características físico-químicas	Umidade (%)	Poder Tintorial (%)	Absorção de Óleo (g/100g)	Determinação de pH	Concentração (%)	Resíduo (45micron)
Resultados do Lote	0,20	107,0	21,0	8,0	98,6	0,01

Fonte: dados fornecidos pelo fabricante.

## Planejamento experimental

O programa experimental contemplou o preparo da argamassa com TiO<sub>2</sub> e moldagem dos corpos de prova, a realização dos ensaios no estado fresco e endurecido da argamassa e, por fim, a análise da eficiência do fotocatalisador, em diferentes concentrações de TiO<sub>2</sub> consideradas nesse estudo, para a argamassa submetida ao ensaio acelerado com exposição das amostras à luz artificial em câmara UV.

Cabe salientar que, por ser uma argamassa estabilizada e já pronta, coletada no momento de entrega em obra, para evitar incorporação de ar, se submetida a um novo processo de mistura mecânica, o TiO<sub>2</sub> foi incorporado diretamente na argamassa, com mistura de forma manual. Essa mistura foi realizada com auxílio de uma espátula metálica e executada, após a dispersão do TiO<sub>2</sub> sobre a argamassa, por um período de 5 minutos, garantindo adequada incorporação e homogeneização do TiO<sub>2</sub> na argamassa.

Tanto para a argamassa referência, sem TiO<sub>2</sub>, quanto para as argamassas com TiO<sub>2</sub> (5%, 10% e 15%), após a homogeneização, dispersão do fotocatalisador em toda a massa da argamassa, realizou-se a caracterização das argamassas estudadas no estado fresco e a moldagens dos corpos de prova, para posterior análise do comportamento no estado endurecido.

Em decorrência dos ensaios estabelecidos neste estudo, detalhados no próximo item desta metodologia, foram moldados corpos de prova prismáticos, nas dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm, para os ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade. Adicionalmente, optou-se em realizar o ensaio de absorção de água por imersão, para tal moldaram-se corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, conforme NBR 9778 (ABNT, 2005a). Além destes corpos de prova, para realização do ensaio acelerado por exposição em câmara UV moldaram-se placas com as medidas de 8 cm x 7 cm x 2 cm, dimensões definidas em decorrência do espaço disponível para acomodação das amostras na câmara UV.

Após a moldagem, os corpos de prova e as placas permaneceram nas formas por um período de 72 horas, tempo definido por se tratar de uma argamassa estabilizada, em atendimento a NBR 13279 (ABNT, 2005b) que estabelece um período de 48±24 horas. Passado esse período os CPs e as placas foram desmoldados e submetidos ao processo de cura em condições ambientais de laboratório, também respeitando as prerrogativas da NBR 13279 (ABNT, 2005b). Os corpos de prova e as placas permaneceram em cura até as datas definidas para cada ensaio.

## Ensaio realizados

Além de verificado o comportamento das argamassas nos estados fresco e endurecido, ainda foi realizado um ensaio, ao longo do tempo, para a avaliação da autolimpeza proveniente da incorporação do TiO<sub>2</sub>. O detalhamento dos ensaios realizados está ilustrado na Figura 2.

### Estado fresco

O ensaio de índice de consistência de cada argamassa produzida, sem e com a incorporação de TiO<sub>2</sub>, seguiu as prescrições da NBR 13276 (ABNT, 2016), com o uso da mesa para índice de consistência. O índice obtido é resultado da média das três medidas de diâmetro, registradas equidistantes na massa, e o resultado expresso em milímetros.

O ensaio utilizado para a determinação da densidade de massa seguiu as disposições da NBR 13278 (ABNT, 2005c), sendo necessário o uso de uma balança com uma resolução de 0,1g. O resultado da densidade de massa, apresentado em kg/m<sup>3</sup>, foi obtido pela diferença do peso do cilindro vazio comparado ao mesmo preenchido com a argamassa, e esse resultado sendo dividido pelo volume do cilindro. Executou-se o ensaio para uma amostra do traço referência e uma amostra para cada teor de TiO<sub>2</sub>.

Figura 2 - Detalhamento dos ensaios realizados

Estado Fresco	Estado Endurecido	Análise da Autolimpeza
<ul style="list-style-type: none"> <li>Índice de consistência</li> <li>Densidade de massa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistências à tração na flexão e à compressão</li> <li>Absorção de água e coeficiente de capilaridade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Envelhecimento acelerado em câmara UV – análise visual e por espectrofotômetro</li> </ul>

### Estado endurecido

O ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão seguiu a NBR 13279 (ABNT, 2005b), porém, considerando todos os resultados individuais obtidos já que foram tratados e analisados estatisticamente. Os rompimentos foram executados aos 7 e aos 28 dias de idade, em uma prensa Instron Emic DL20000, com uma faixa de velocidade que varia de 0,01 a 500 mm/min.

No ensaio de resistência à tração na flexão, para cada argamassa e em cada idade de ensaio avaliada, foram rompidos 3 corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm). Após a realização deste ensaio, ainda segundo NBR 13279 (ABNT, 2005b), deve-se utilizar cada metade dos corpos de prova rompidos para executar o ensaio de resistência à compressão, totalizando, para este ensaio, 6 corpos de prova por idade (7 e 28 dias), para cada argamassa estudada (0%, 5%, 10% e 15%). O resultado apresentado contemplou a resistência individual de cada corpo de prova e a resistência média.

Ainda, com os corpos de prova prismáticos, realizou-se o registro do comportamento das misturas em relação a absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade, aos 28 dias de idade, seguindo as especificações detalhadas pela NBR 15259 (ABNT, 2005d). O ensaio foi realizado com o uso de uma balança da marca BEL RB 16001H com resolução de 0,1g. Os resultados foram expressos pelos valores individuais e pela média, para cada tempo de leitura.

Por fim, o comportamento da absorção de água também foi verificado pela absorção de água por imersão. Para realizar esse ensaio considerou-se as especificações da NBR 9778 (ABNT, 2005a), utilizando 3 corpos de prova cilíndricos (5 cm x 10 cm), para cada teor de  $\text{TiO}_2$  (0%, 5%, 10% e 15%), aos 28 dias de idade. Para tal, utilizou-se uma balança marca BEL RB 16001H com resolução mínima de 0,05% da massa a ser determinada, uma estufa marca Master ES12 que mantém a temperatura em intervalo de  $105 \pm 5$  °C e recipientes que necessitam ser apropriados para a imersão dos corpos de prova e fervura da água. A avaliação da absorção da água por imersão foi quantificada através da diferença de massa do corpo de prova quando saturado em água e após seco em estufa, e o resultado representado em percentual (%).

Cabe destacar que os resultados dos ensaios no estado endurecido foram submetidos a análise estatística pelo método da análise de variância (ANOVA), com o uso do software Statistica.

### Análise da autolimpeza

A verificação da autolimpeza da argamassa ocorreu pelo ensaio acelerado e, como sugestão de Austria (2015), com exposição das amostras à luz artificial em câmara UV. Para tal, placas com dimensões de 8 cm x 7 cm x 2 cm foram introduzidas na câmara UV, de modelo Equilam EQUV, com definições para luminosidade da lâmpada de 1,25 W/m<sup>2</sup>/nm, o limite disponível pela câmara. Quanto a definição dos tempos de leitura, tomou-se como base, inicialmente, o estudo de Wang *et al.* (2022), que estabeleceu leituras em 0,5 h, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 16 h e 26 horas, porém pela disponibilidade de equipamento e operação do laboratório adaptou-se para realização do ensaio apenas até 2 horas, realizando as leituras nos tempos 10 min, 30 min, 60 min e 120 min.

O manchamento das placas, para ser avaliada a autolimpeza, levou em consideração a metodologia apresentada por Otuka (2022), que considera a imersão das amostras durante 24 horas em uma solução com rodamina B, sendo utilizado 0,5 g/L.

A autolimpeza foi analisada visualmente, por imagens fotográficas e por colorimetria, sendo mensurada a descoloração com o auxílio de um espectrofotômetro, modelo CM-5 da marca Konica Minolta. Para registro das imagens fotográficas manteve-se um padrão na execução, com o posicionamento de um celular, marca Iphone e modelo XR, em suporte adequado para o equipamento.

O resultado foi a avaliação das cores através do método CIELAB, conforme utilizado por Treviso (2016) e Austria (2015), é definido pela Commission Internationale de l'Eclairage, sendo possível mensurar a

autolimpeza através da variação da cor pelo tempo, ao comparar as amostras ensaiadas. A determinação da diferença de cor total ( $\Delta E$ ), entre as amostras analisadas, foi definida pela Equação 1.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad \text{Eq. 1}$$

Na equação as diferenças de cor são definidas pela comparação da amostra com o padrão, e conhecidas como delta ( $\Delta$ ). L representa a luminosidade e  $\Delta L$  a diferença entre claro e escuro, a coordenada a representa o conteúdo de vermelho a verde e  $\Delta a$  corresponde a essa diferença entre vermelho e verde, por sua vez, a coordenada b representa o conteúdo de amarelo a azul e, conseqüentemente,  $\Delta b$  registra a diferença entre amarelo e azul. Neste estudo a diferença de cor ( $\Delta E$ ) foi registrada ao se comparar a amostra exposta aos raios UV com a amostra, do mesmo traço, não posicionada na câmara UV, destacando que todas as amostras foram submetidas ao manchamento prévio.

Para esta análise utilizou-se como referência a NBR 16846 (ABNT, 2020), que designa em números as diferenças perceptíveis na cor em função do tempo, conforme detalha a Tabela 3.

## Resultados e discussões

Para responder aos objetivos estabelecidos pela pesquisa, quanto ao efeito da incorporação do  $\text{TiO}_2$  nas propriedades da argamassa estabilizada, na sequência apresentam-se os resultados obtidos considerando a metodologia já detalhada.

### Índice de consistência e densidade de massa

Os resultados obtidos para o índice de consistência e densidade de massa das argamassas, no estado fresco, estão apresentados na Tabela 4.

Ao analisar o índice de consistência médio das amostras ensaiadas, não foram observadas diferenças representativas entre elas. Esse comportamento registrado mostrou-se diferente ao encontrado por Albuquerque *et al.* (2021), que identificaram uma diminuição na medida de espalhamento a cada aumento no teor de  $\text{TiO}_2$ , tendo uma diferença de 6% da argamassa de referência com a argamassa de 15% de adição de  $\text{TiO}_2$ , no entanto, cabe salientar que os autores utilizaram resíduo proveniente do processo de fabricação do  $\text{TiO}_2$  e não propriamente o  $\text{TiO}_2$ , o que pode justificar, pelos finos incorporados a mistura, essa diferença de comportamento no índice de consistência.

Treviso (2016) registrou um leve aumento no índice de consistência, em 0,04%, da argamassa com 5% de  $\text{TiO}_2$  quando comparada com a de referência, mas o teor de 15% de  $\text{TiO}_2$  registrou uma diminuição de aproximadamente 0,01%. Austria (2015) e Dantas *et al.* (2019) constataram que a presença de  $\text{TiO}_2$  na argamassa demanda a adição de água para manter o espalhamento da argamassa quando comparado com a argamassa referência, correlacionando esse comportamento com maior presença de partículas finas na mistura, também observado por Albuquerque *et al.* (2021), particularmente utilizando resíduo de  $\text{TiO}_2$ , que ainda mencionam o fato da adsorção de água pela maior presença de partículas finas com a incorporação desse resíduo de  $\text{TiO}_2$ .

Tabela 3 - Interpretação da diferença de cor

Diferença de cor total ( $\Delta E$ )	Percepção da diferença de cor
Até 0,2	Não perceptível
$\geq 0,2$ e $< 0,5$	Muito fraca
$\geq 0,5$ e $< 1,5$	Fraca, porém perceptível
$\geq 1,5$ e $< 3,0$	Perceptível
$\geq 3,0$ e $< 6,0$	Muito perceptível
$\geq 6,0$ e $< 12,0$	Forte
Acima de 12,0	Muito forte

Fonte: adaptado da NBR 16846 (ABNT, 2020).

Tabela 4 - Índice de consistência médio e densidade de massa das argamassas no estado fresco

Traço	REF	5% $\text{TiO}_2$	10% $\text{TiO}_2$	15% $\text{TiO}_2$
Índice de consistência (mm)	268,3	266,7	268,3	273,3
Densidade de massa ( $\text{kg/m}^3$ )	1900,0	1895,8	1890,8	1912,1

Ao observar-se os resultados de densidade de massa registrados percebe-se que ficaram um pouco superiores aos padrões estabelecidos pelo fabricante (Tabela 1), que especifica resultados entre 1750 e 1850 kg/m<sup>3</sup>. Pode-se notar, ainda, que com a incorporação do TiO<sub>2</sub> até o teor de 10%, foi registrada uma diminuição na densidade de massa da mistura, sendo diferente do comportamento representado pela argamassa de teor de 15% de TiO<sub>2</sub>, que teve um leve aumento comparado tanto com a argamassa de referência como aos outros teores de adição de TiO<sub>2</sub>. Austria (2015) verificou uma maior densidade de massa a cada aumento do teor de TiO<sub>2</sub>, tanto para uma argamassa caracterizada com traço de 1:2 como para 1:3, analisando que mesmo com um traço mais pobre, a presença do dióxido promove esse aumento na densidade, correlacionando isso a característica física do TiO<sub>2</sub>, pelo fechamento de vazios da mistura. Treviso (2016) corrobora os resultados do atual estudo, no qual os teores de 5% e 10% de TiO<sub>2</sub> diminuíram a densidade de massa quando comparados à argamassa de referência, enquanto houve um aumento para o teor de 15% de TiO<sub>2</sub>, o que pode estar associado a melhor dispersão do TiO<sub>2</sub> na massa da mistura com 15%, preenchendo melhor os vazios da argamassa e, como consequência, aumentando a densidade de massa.

### Resistências à tração na flexão e à compressão

Os resultados mecânicos médios obtidos para as resistências à tração na flexão e à compressão estão apresentados no gráfico da Figura 3.

É possível observar, pelos resultados de resistência médias apresentados na Figura 3, que aos 7 dias a resistência média da amostra de referência, tanto à tração na flexão como à compressão, mostra resultados superiores aos das amostras com incorporação de TiO<sub>2</sub>. O mesmo não ocorre aos 28 dias, registrando um maior ganho percentual médio de resistência dos 7 para os 28 dias para as amostras com TiO<sub>2</sub>. Ainda, os resultados médios obtidos para as resistências atendem a especificação do fabricante (Tabela 1), ao registrar-se aos 28 dias resistência à compressão maiores que 4,0 MPa e à tração na flexão superiores aos 2,0 MPa.

Os dados individuais foram submetidos a análise estatística, e o resultado para a resistência à tração na flexão está registrado na Figura 4.

A análise estatística mostrou que há diferenças significativas em relação ao traço e a idade de ensaio, conforme pode ser visualizado na Figura 4. Para melhor entender esse comportamento entre as variáveis, realizou-se o teste Tukey, detalhado na Tabela 5.

Observa-se que a diferença significativa registrada em relação a idade de ensaio ocorre em função do crescimento de resistência, comportamento esperado para uma mistura cimentícia, dos 7 dias para os 28 dias, já que pelo teste Tukey fica claro que se analisadas, individualmente, em cada idade de ensaio não haveria diferença entre os traços, já que os resultados se mostram iguais tanto aos 7 dias como aos 28 dias.

Figura 3 - Resistências médias à tração na flexão e à compressão das argamassas

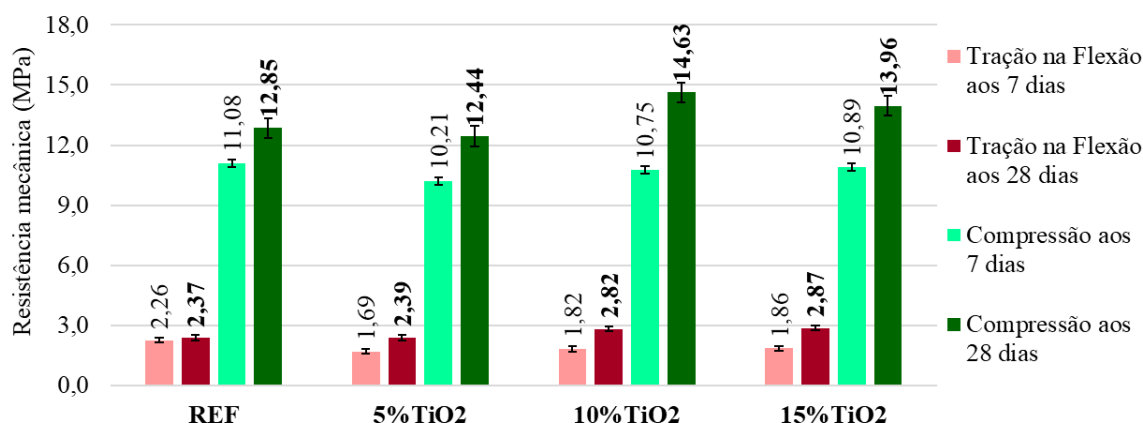
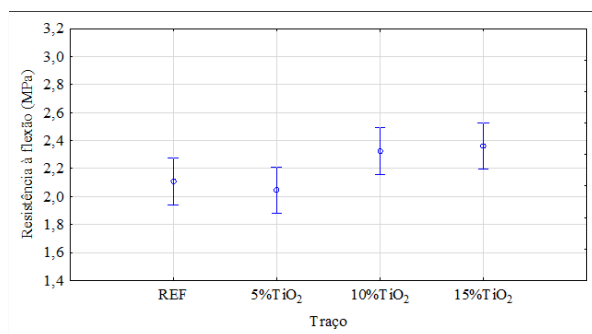




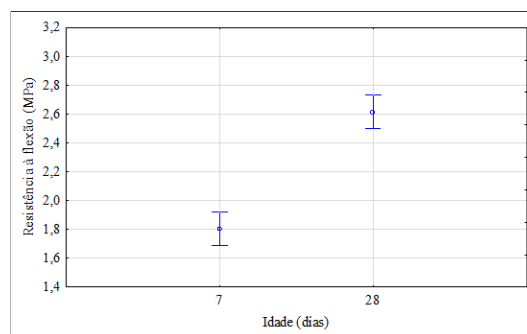
Figura 4 - Resistência à tração na flexão: (a) Resultado da ANOVA, (b) Comportamento em relação ao traço, (c) Comportamento em relação a idade

Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calculado de F	Fator P	Significativo
Traço	0,440	3,000	0,147	3,962	0,027	sim
Idade	3,945	1,000	3,945	106,638	0,000	sim
Traço * Idade	0,258	3,000	0,086	2,329	0,113	Não
Erro	0,592	16,000	0,037			

(a)



(b)



(c)

Tabela 5 - Teste Tukey para os resultados individuais da resistência à tração na flexão

Traço	Idade	Resistência Média	1	2	3	4
5% TiO <sub>2</sub>	7	1,693	****			
10% TiO <sub>2</sub>	7	1,823	****			
REF	7	1,847	****		****	
15% TiO <sub>2</sub>	7	1,853	****		****	****
REF	28	2,370		****	****	****
5% TiO <sub>2</sub>	28	2,397		****		****
10% TiO <sub>2</sub>	28	2,827		****		
15% TiO <sub>2</sub>	28	2,867		****		

Albuquerque *et al.* (2021) evidenciaram um aumento contínuo na resistência à tração na flexão ao adicionar TiO<sub>2</sub> até um teor de 15%, atrelando esse comportamento ao efeito filler proporcionado pelo resíduo de TiO<sub>2</sub> utilizado. No entanto, ao analisar os dados pelo método ANOVA, em cada idade estudada, 3, 7 e 28 dias, registraram que a resistência à flexão para 3 e 28 dias não apresentou diferença significativa, tendo apenas um efeito significativo aos 7 dias de idade. Austria (2015) identificou um comportamento diferente, observando diferença significativa com a presença do TiO<sub>2</sub>, com análise também pelo método ANOVA, ao avaliar dois traços de argamassas distintos caracterizados por 1:2 e 1:3. Adicionalmente, Austria (2015) verificou pelo método de Fischer que nem todos os efeitos foram diferentes estatisticamente entre si, mantendo a resistência à flexão igual entre os traços estudados, ao analisar os teores de adição, 0% e 10% de TiO<sub>2</sub>.

Ainda analisando o comportamento mecânico, os resultados da análise estatística dos dados individuais de resistência à compressão estão detalhados na Figura 5.

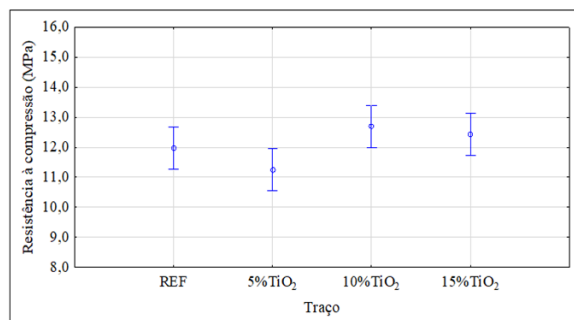
Novamente, para entender melhor essas diferenças significativas em relação ao traço e a idade de ensaio (Figura 5), realizou-se o teste Tukey, detalhado na Tabela 6.

Analogamente ao registro da tração na flexão, na compressão também se observa diferença significativa em relação a idade e ao traço (Figura 5). Também, o teste Tukey mostra que entre cada idade de ensaio não há diferenças significativas, já que os resultados aos 7 dias se mostram iguais, assim como aos 28 dias de idade, identificando diferença significativa para o traço quando se compara os resultados entre as diferentes idades. Quando a diferença significativa registrada em relação a idade, o comportamento é esperado já que a resistência do concreto aumenta com a idade de cura.

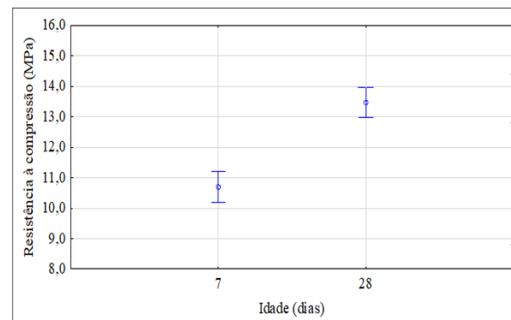
Figura 5 - Resistência à compressão: (a) Resultado da ANOVA, (b) Comportamento em relação ao Traço, (c) Comportamento em relação a idade

Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calculado de F	Fator P	Significativo
Traço	14,339	3,000	4,780	3,331	0,029	sim
Idade	92,019	1,000	92,019	64,139	0,000	sim
Traço * Idade	7,387	3,000	2,462	1,716	0,179	Não
Erro	57,388	40,000	1,435			

(a)



(b)



(c)

Tabela 6 - Teste Tukey para os resultados individuais da resistência à compressão

Traço	Idade	Resistência Média	1	2	3
5% TiO <sub>2</sub>	7	10,062		****	
10% TiO <sub>2</sub>	7	10,755	****	****	
15% TiO <sub>2</sub>	7	10,892	****	****	
REF	7	11,080	****	****	
5% TiO <sub>2</sub>	28	12,437	****		****
REF	28	12,847	****		****
15% TiO <sub>2</sub>	28	13,955			****
10% TiO <sub>2</sub>	28	14,627			****

Albuquerque et al. (2021), ao analisar nas idades de 3, 7 e 28 dias, não constatarem diferença significativa ao analisar a resistência à compressão das misturas estudadas. No entanto, corroborando o comportamento da atual pesquisa, Austria (2015) registrou estatisticamente um efeito significativo, ao analisar dois traços de argamassa 1:2 e 1:3, quanto ao TiO<sub>2</sub> incorporado, mas também identificou efeito significativo na interação entre essas variáveis, traço x TiO<sub>2</sub>, para a idade de 28 dias. Em particular, após análise pelo método Fischer, fica evidente que com o aumento do teor de TiO<sub>2</sub> na argamassa há um aumento contínuo da resistência à compressão para a argamassa caracterizada com o traço 1:2, porém para o traço 1:3 não se verifica diferença significativa (Austria, 2015).

Considerando o uso do TiO<sub>2</sub> dissolvido em água e incorporado à mistura, Jiang *et al.* (2023) registraram um aumento no desempenho mecânico das argamassas com a presença do fotocatalisador, na idade analisada de 28 dias. O estudo registrou um aumento de 20% na resistência à tração da argamassa com TiO<sub>2</sub> em comparação com a amostra de referência, e para a resistência à compressão esse ganho de resistência foi de 67%. Os autores atribuem esse resultado à dispersão do TiO<sub>2</sub> na mistura, proporcionando uma microestrutura mais densa e redução de porosidade.

## Absorção de água por imersão e índice de vazios

Os resultados médios para a absorção de água por imersão e índice de vazios, realizado com os corpos de prova cilíndricos, estão registrados na Figura 6.

Pela Figura 6, a cada aumento do teor de TiO<sub>2</sub> incorporado na argamassa registra-se uma menor média no índice obtido tanto para a absorção de água quanto para o índice de vazios, aos 28 dias de idade. Para entender melhor esse efeito, a Figura 7 retrata o resultado da análise estatística para os resultados individuais dessas propriedades.

Figura 6 - Resultados médios de absorção de água por imersão e índice de vazios

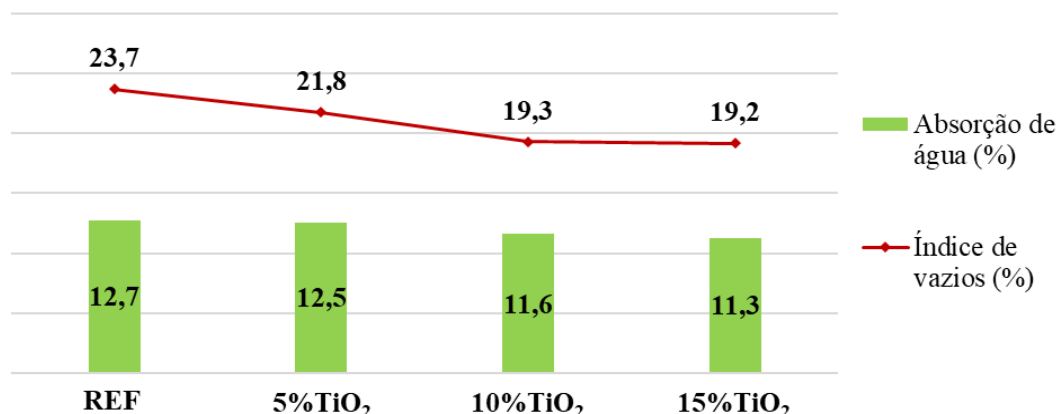


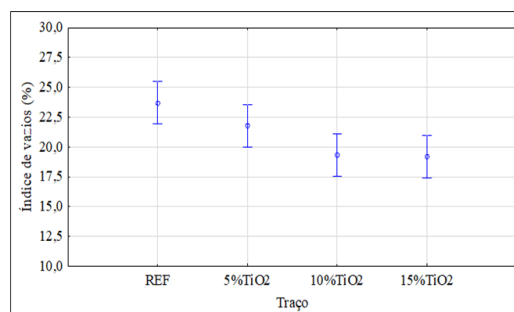
Figura 7 - (a) ANOVA para o índice de vazios, (b) ANOVA para a absorção de água por imersão, (c) Comportamento do índice de vazios

Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calc. de F	Fator P	Significativo
Traço	42,591	3,000	14,197	7,938	0,0088	Sim
Erro	14,308	8,000	1,788			

(a)

Variáveis	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calc. de F	Fator P	Significativo
Traço	4,582	3,000	1,527	2,580	0,1262	não
Erro	4,736	8,000	0,592			

(b)



(c)

Logo, observa-se que a presença do TiO<sub>2</sub> não tem efeito significativo na absorção de água por imersão (Figura 7a), no entanto, em relação ao índice de vazios a análise mostra que há diferença significativa (Figura 7b), mostrando a redução deste índice com o aumento do teor de TiO<sub>2</sub> na mistura (Figura 7c). Para melhor entender esse comportamento do índice de vazios realizou-se o teste Tukey, detalhado na Tabela 7.

Analisando o teste de Tukey, é possível identificar que a diferença significativa registrada se dá em função dos traços com teores de 10% e 15% que se mostram significativamente menores que o traço referência, evidenciando, neste estudo, que maiores teores de TiO<sub>2</sub> reduzem o índice de vazios da matriz.

Hatori *et al.* (2023) visualizaram acréscimo na absorção total de água e no índice de vazios pelo método ANOVA com o aumento de TiO<sub>2</sub> ao comparar os traços com 0%, 5% e 10%, confirmando, pelo método de Fisher, que existe diferença em todas as argamassas para a absorção total de água, já para o índice de vazios foi considerado diferente apenas o teor de 10%. Comportamento coerente com o presente estudo, já que para 5% não se identificou diferença e para 10% houve diferença significativa em comparação com a amostra referência de 0%.

Ribeiro e Serafim (2021), analisando argamassas com a adição de TiO<sub>2</sub>, em teores de 0%, 1%, 3%, 5% e 10%, nas fases cristalinas anatase e rutilo, também identificaram, ao comparar os índices de vazios, que para as argamassas de 10% houve uma diminuição no índice de vazios, justificando o comportamento pelo efeito fíller que ocorre nessas argamassas. Ainda, identificaram uma maior absorção de água por imersão para o teor de 5%, o que contraria a tendência esperada, já que, segundo os autores, as argamassas com maiores teores de TiO<sub>2</sub> deveriam apresentar maiores absorções de água pela maior quantidade de partículas finas incorporadas à mistura.

Também analisando o uso do TiO<sub>2</sub> nas fases anatase e rutilo, para um teor fixo de 5%, Clovandi, de Carvalho e de Souza Serafim (2021) registraram que, assim como a absorção, o índice de vazios também apresentou resultados melhores na argamassa com TiO<sub>2</sub>, em particular na fase anatase, quando comparados com a argamassa, tendo uma diminuição nos valores.

Tabela 7 -Teste Tukey para os resultados individuais do ensaio de índice de vazios

Traço	Índice de Vazios	1	2
15% TiO <sub>2</sub>	19,163	****	
10% TiO <sub>2</sub>	19,310	****	
5% TiO <sub>2</sub>	21,767	****	****
REF	23,717		****

## Absorção de água por capilaridade

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade, realizado aos 28 dias de idade, estão detalhados na Figura 8.

Os dados individuais do coeficiente de capilaridade foram submetidos a análise estatística e o comportamento está detalhado na Tabela 8.

Pode-se afirmar que, mesmo com a incorporação de TiO<sub>2</sub> na mistura, não há diferença significativa na absorção de água por capilaridade analisando o coeficiente de capilaridade registrado no ensaio.

Esse comportamento se mostra contrário ao registrado por Austria (2015) que, ao analisar o coeficiente de capilaridade para as argamassas acrescidas de TiO<sub>2</sub>, identificou diferenças significativas com a presença do TiO<sub>2</sub>, registrando aumento do coeficiente com a presença do TiO<sub>2</sub> incorporado na argamassa. Corroborando, Dantas *et al.* (2019) que avaliaram duas diferentes amostras comerciais de TiO<sub>2</sub>, também registraram diferença significativa nos resultados, com aumento na absorção de água para as argamassas com a presença do TiO<sub>2</sub>.

Por outro lado, Fernandes (2017) identificou um comportamento diferente, registrando redução da absorção de água com o aumento do teor de TiO<sub>2</sub> na mistura. Esse diferente comportamento registrado, para a absorção de água por capilaridade, pode estar associado aos diferentes teores de material pulverulento presentes na amostra de TiO<sub>2</sub> utilizada, conforme também destaca Fernandes (2017).

## Efeito da autolimpeza pelo fotocatalisador

Essa análise foi realizada em placas machadas com uma solução de rodamina B. A avaliação visual da autolimpeza da argamassa está representada na Figura 9, ilustrando a variação das cores através do registro fotográfico para cada tempo analisado, observando que para cada traço foram analisadas duas amostras, posicionadas na imagem, a esquerda a amostra 1 e a direita a amostra 2, ao longo dos tempos analisados.

É possível visualizar (Figura 9) uma variação na cor através do tempo, principalmente aos 120 min, identificando uma descoloração mais rápida nas placas de teor de 15%. A diferença na observada nas amostras para a argamassa 15% TiO<sub>2</sub> pode estar associada a uma possível diferença na concentração do TiO<sub>2</sub> presente na amostra, já que esta representa uma parcela da massa total de argamassa utilizada no estudo.

Treviso (2016) avaliou a autolimpeza de placas submetidas ao ambiente natural, também com o uso de rodamina B, por registros fotográficos para 0, 3, 7, 14, 21, 28, 42, 56, 70 e 84 dias, para diferentes posicionamentos da placa manchada em relação a disposição do sol. O estudo mostrou que as placas com adição de TiO<sub>2</sub> tiveram uma maior descoloração superficial junto da exposição mais direta a intensidades dos raios ultravioletas. Austria (2015) ao analisar as imagens de seu estudo, utilizando azul de metileno, um corante orgânico assim como a rodamina B, para o manchamento das placas, visualizou que o teor de 5% registrou uma limpeza mais rápida quando comparado aos traços com 0% e 10% de incorporação de TiO<sub>2</sub>.

Além dessa análise visual das imagens (Figura 9), as amostras foram submetidas ao ensaio de colorimetria. O resultado deste ensaio, medições da variação da cor ( $\Delta E$ ) através do tempo, comparando as coordenadas cromáticas, da amostra referência com as amostras machadas para os diferentes teores estudados, ao longo do tempo, para os quatro tempos estabelecidos (10 min, 30 min, 60 min e 120 min), está apresentado na Figura 10.

A Figura 10 mostra que a argamassa com o teor de 15% de TiO<sub>2</sub>, exceto para leitura inicial de 10 min, apresentou uma variação média maior na sua coloração, comparado ao demais traços, o que reflete melhor autolimpeza da placa. Além disso, observa-se que a argamassa de referência (REF) apresentou melhor autolimpeza quando comparada a argamassa com 5% de TiO<sub>2</sub>, exceto para o tempo de 30 min, considerando os resultados médios das duas amostras analisadas.

Figura 8 - Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade

Traço	Absorção 10min (g/cm <sup>2</sup> )	Absorção 90min (g/cm <sup>2</sup> )	Coef. Capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )
REF	0,265	0,565	0,300
5%TiO <sub>2</sub>	0,238	0,531	0,294
10%TiO <sub>2</sub>	0,179	0,450	0,271
15%TiO <sub>2</sub>	0,208	0,527	0,319

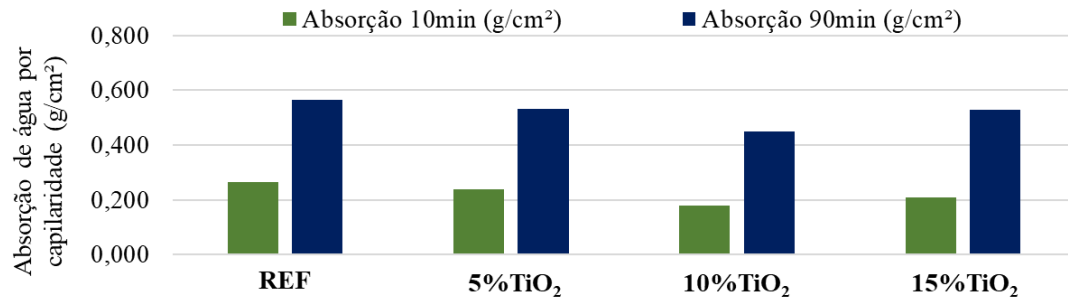


Tabela 8 - Resultado da ANOVA para o coeficiente de capilaridade

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calc. de F	Fator P	Significativo
Traço	0,004	3,000	0,001	1,030	0,4296	Não
Erro	0,009	8,000	0,001			

Figura 9 - Avaliação visual da autolimpeza das argamassas ao longo do tempo

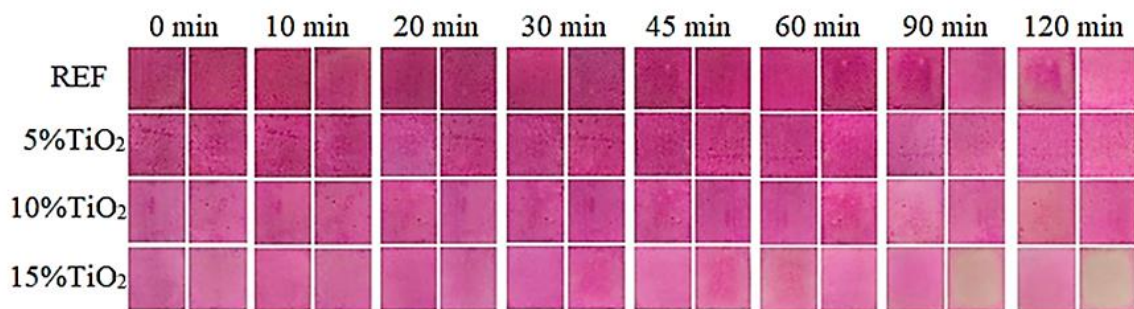
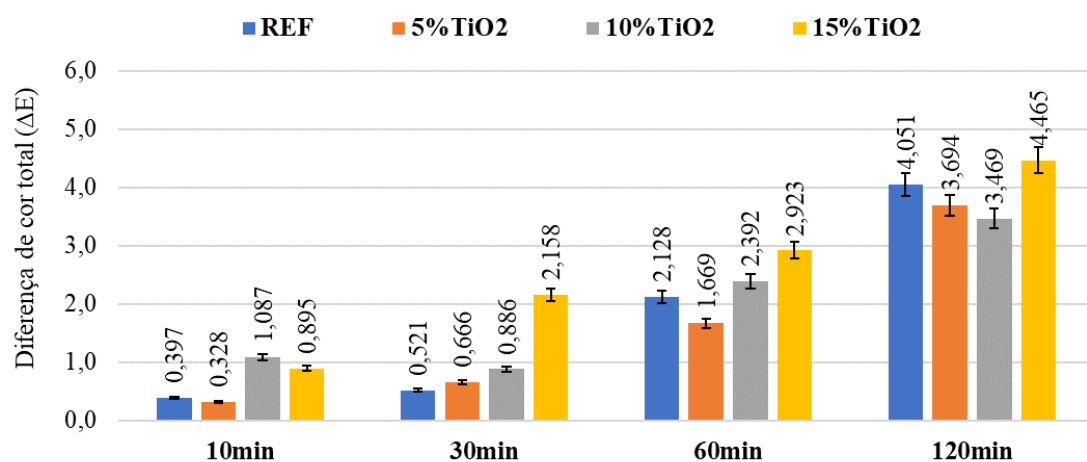


Figura 10 - Resultados para as medições de colorimetria através do tempo.



Os dados individuais, amostra 1 e amostra 2, registrados para cada traço, foram submetidos a análise estatística para verificar aos 120 minutos existe ou não diferença significativa no efeito de autolimpeza segundo medições da colorimetria (Tabela 9).

Observa-se que estatisticamente não há diferença significativa entre os traços estudados. Entretanto cabe salientar que para a amostra com 15% de incorporação de  $\text{TiO}_2$  há uma diferença de leitura muito discrepante ao se observar os resultados entre as duas amostras o que refletiu neste comportamento da ANOVA. Registrou-se um coeficiente de variação de 56,8% nas amostras do traço 15%  $\text{TiO}_2$ , evidenciando, conforme já destacado, uma deficiência na dispersão de  $\text{TiO}_2$  em uma das amostras ensaiadas já que o resultado foi consideravelmente inferior a outra amostra desse mesmo traço, 15%  $\text{TiO}_2$ , e, inclusive, bem inferior a todas as demais leituras registradas para os demais traços estudados.

Para materiais a base de cimento, a exemplo da argamassa estudada nesta pesquisa, Bezerra et al. (2023) reporta sobre a preocupação quanto a aglomeração de partículas do fotocatalisador na mistura, reduzindo a área de superfície para absorção e subsequente atividade fotocatalítica reduzida. Pelos resultados do presente estudo, evidencia a necessidade de estudos adicionais avaliando o processo de mistura e dispersão do fotocatalisador na argamassa.

Considerando os resultados obtidos para a diferença de cor total ( $\Delta E$ ), apresentados na Figura 10, realizou-se a avaliação seguindo os critérios (Tabela 3) apresentados na NBR 16846 (ABNT, 2020), estando essa análise registrada na Tabela 10.

Pelos critérios apresentados na NBR 16846 (ABNT, 2020), observa-se que aos 30 minutos a diferença da cor total é perceptível, mesmo sendo fraca, com registro de diferença muito perceptível ao final do ensaio, em 120min, para todos os teores.

Austria (2015), comparou as aferições diretamente com a argamassa antes do manchamento e, com o tempo de exposição, quanto mais próximo do valor da leitura inicial, maior descoloração registrava-se. Foi visualizado maiores alterações aos 7 dias, as quais ocorreram para teores de 5 e 10%. O ensaio contemplou 84 dias de análise e ao decorrer dos dias até chegar ao final do ensaio, foi ocorrendo gradativamente descoloração, visualizando, na leitura final do manchamento, que os resultados foram bem próximos ao da placa inicial.

Treviso (2016) visualizou que existe uma maior variação de cor para as argamassas que tem em sua presença o  $\text{TiO}_2$ , registrando que a argamassa de 5% superou a de referência em aproximadamente 14% em comparação as médias calculadas. O estudo ainda destaca que a argamassa com 5% de  $\text{TiO}_2$  ficou apenas 3,7% abaixo da de 15%, mostrando-se, com isso, uma argamassa mais viável economicamente ao se considerar a questão de custo-benefício.

Tabela 9 - Resultado da ANOVA para colorimetria aos 120 min

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Calc. de F	Fator P	Significativo
Traço	1,1383	3,000	0,3794	0,2313	0,8705	Não
Erro	6,5627	4,000	1,6407			

Tabela 10 - Definição da percepção da diferença de cor conforme NBR 16846 (ABNT, 2020)

Traço	Diferença de cor total ( $\Delta E$ )			
	10 min	30 min	60 min	120 min
REF	Muito fraca	Fraca, porém perceptível	Perceptível	Muito perceptível
5% $\text{TiO}_2$	Muito fraca	Fraca, porém perceptível	Perceptível	Muito perceptível
10% $\text{TiO}_2$	Fraca, porém perceptível	Fraca, porém perceptível	Perceptível	Muito perceptível
15% $\text{TiO}_2$	Fraca, porém perceptível	Perceptível	Perceptível	Muito perceptível

## Conclusões

O comportamento do revestimento em fachadas de edifícios caracteriza-se como um importante subsistema que contribui para o desempenho da edificação. Neste aspecto, a busca por soluções que agreguem qualidade e durabilidade ao sistema são fundamentais, a exemplo do uso de fotocatalisador incorporado a argamassa de revestimento, já que promove a autolimpeza mantendo a aparência e funcionalidade das fachadas por mais tempo, reduzindo manutenções.

Considerando os materiais e métodos detalhados neste estudo, é possível concluir que não houve mudanças consideráveis nas propriedades analisadas no estado fresco para a argamassa estabilizada ao se incorporar  $\text{TiO}_2$  em teores de até 15% na mistura.

No estado endurecido das argamassas, não se registrou diferenças significativas para as resistências mecânicas, tração na flexão e compressão, quando analisadas em uma mesma idade de ensaio. Ainda, o índice de vazios reduziu significativamente com o aumento do teor de  $\text{TiO}_2$  na mistura, no entanto esse comportamento não foi identificado na absorção de água, já que para essa propriedade a análise estatística não mostrou diferenças significativas.

Quanto ao efeito fotocatalítico, através do registro da colorimetria, que considera a variação da cor total, não houve diferença significativa entre os traços estudados, para exposição de 120 min. Porém, pelos registros fotográficos, visualizou-se que para uma das amostras do teor de 15% foi registrada uma vantagem se comparados aos outros teores. É importante observar que a eficácia do fotocatalisador pode variar em função de sua composição, processo de mistura e ambiente de exposição, sendo assim mostra-se necessária uma análise mais completa desse efeito da autolimpeza, considerando idades superiores, aos 120 min aqui analisados, de exposição a raios UV, assim como submeter as amostras à exposição da radiação UV naturalmente.

## References

- ALBUQUERQUE, D. D. M *et al.* Performance and radiological implications of using residue from  $\text{TiO}_2$  production as a component of coating mortars. **Construction and Building Materials**, v. 306, 2021.
- ANFAPA & ITec. **Morteros monocapa revestimientos de fachada**. Barcelona: Servicio Editorial del Itec, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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, 2005c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16846**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da cor e da diferença de cor por medida instrumental. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005a.
- AUSTRIA, G. C. **Argamassa autolimpantes para revestimento de fachadas**: o efeito das propriedades fotocatalíticas do dióxido de titânio. Porto Alegre, 2015. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- BAUER, E. *et al.* Comportamentos e propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 13., São Paulo, 2017. **Anais [...]** São Paulo, 2017.
- BAUER, R. J. F. Patologia em revestimentos de argamassa inorgânica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., Salvador, 1997. **Anais [...]** Salvador: CETA, ANTAC, 1997.



BENEDITO, R. M. **Sistemas de fachada: uma análise dos custos de manutenção de edifícios localizados na Universidade Federal de Santa Catarina**. Florianópolis, 2017. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

BEZERRA, A. C. S. Compósito cimentício co-carregado com  $\text{TiO}_2/\text{Nb}_2\text{O}_5$ : cinética de reação e microestrutura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DO CIMENTO, 1., São Paulo, 2023. **Anais [...]** São Paulo, 2023.

CAMPOS, R. G. S. **Manutenção e reparo de fachadas de prédios comerciais no Rio Grande do Sul: procedimentos e custos envolvidos**. Porto Alegre, 2009. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIAS, G. C. (ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. São Paulo: Ispis Gráfica e Editora, 2010.

CASALI, J. M. *et al.* Influence of cement type and water content on the fresh state properties of ready mix mortar. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 33-52, abr./jun. 2018.

CASARIN, R. P. *et al.* Comparação da eficiência da escovação na rápida mudança de cor em parede externa pela aplicação de dispersão de nano- $\text{TiO}_2$  e de solução de  $\text{NaClO}$ . In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., Canela, 2022. **Anais [...]** Canela, 2022.

CASSAR, L. Photocatalysis of cementitious materials: clean buildings and clean air. **MRS Bulletin**, v. 29, p. 328-331, 2004.

CINCOTTO, M. A. **Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações**. São Paulo: PINI, 1988.

CLOVANDI, G. M.; de CARVALHO, I. V.; de SOUZA SERAFIM, M. J. **Avaliação do desempenho da substituição parcial de cimento portland pela cinza de casca de arroz e dióxido de titânio nas propriedades físicas de argamassa**. Programa de Iniciação Científica-PIC/UniCEUB-Relatórios de Pesquisa, 2021.

CHEN, J.; POON, C. Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications, **Building and Environment**. v. 44, p. 1899-1906, 2009.

DANTAS, S. R. A. **Avaliação do efeito de tratamentos com  $\text{TiO}_2$  sobre as refletâncias a radiação solar e luminosa de argamassas de revestimento**. São Paulo, 2021. Teses (Doutorado em Engenharia Civil) – Univeridade de São Paulo, São Paulo, 2021.

DANTAS, S. R. A. *et al.* Influence of the nano  $\text{TiO}_2$  dispersion procedure on fresh and hardened rendering mortar properties. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 544–556, 2019.

FERNANDES, C. N. **Estudo sobre a incorporação de nanopartículas de dióxido de titânio em argamassas fotocatalíticas**. Fortaleza, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

HATORI, A. *et al.* Avaliação das propriedades mecânicas e de absorção de água de argamassas com adição de dióxido de titânio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 14., João Pessoa, 2023. **Anais [...]** João Pessoa, 2023.

JIANG, J. *et al.* Enhanced mechanical and photocatalytic performance of cement mortar reinforced by nano- $\text{TiO}_2$  hydrosol-coated sand. **Cement and Concrete Composites**, v. 137, p. 104906, 2023.

LIU, D. *et al.* Self-cleaning performance of photocatalytic cement mortar: synergistic effects of hydration and carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 162, p. 107009, 2022.

NETO, F. M. *et al.* Perícias em Patologias de Revestimentos em Fachadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS, 10., Porto Alegre, 1999. **Anais [...]** Porto Alegre, 1999.

OTUKA, P. H. **Argamassa autolimpante por meio da aspersão superficial de dióxido de titânio**. Ilha Solteira, 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2022.

PRUDENTE, I. N. R. **Influência de adições de grafeno e nanocompósitos Cds-diatomita nas propriedades autolimpantes de argamassa para rejuntamento**. São Cristóvão, 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.



- RAMOS, M. *et al.* Efeito do tipo de mistura manual e mecânica nas propriedades de argamassa industrializada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 13., São Paulo, 2017. **Anais [...]** São Paulo, 2017.
- RIBEIRO, K. B.; SERAFIM, M. J. S. **Influência da substituição de cimento por dióxido de titânio e nanossílica ativa na resistência à compressão de argamassas.** Programa de Iniciação Científica-PIC/Uniceub-Relatórios de Pesquisa, 2021.
- SÁ, G. *et al.* Statistical survey on inspection, diagnosis and repair of wall rendering. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 21, p. 623-636, 2015.
- SAI GLOBAL. **UNI 11259**: determination of the photocatalytic activity of hydraulic binders-rodamin test method. Roma, 2016.
- SALGADO, J. C. P. **Técnicas e práticas construtivas para edificações.** 2. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2009.
- SPINELLI, L. **Pichação e comunicação: um código sem regra.** Logos, v. 14, n. 1, p. 111-121, 2015.
- TREVISIO, J. P. M. **Avaliação da eficiência de autolimpeza em argamassas e pastas contendo TiO<sub>2</sub> expostas ao microclima urbano.** Porto Alegre, 2016. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016.
- VIAPIANA, C. *et al.* Avaliação das propriedades autolimpantes da dispersão de dióxido de titânio em água quando aplicada em detalhe de fachada de prédio histórico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 13., São Paulo, 2017. **Anais [...]** São Paulo, 2017.
- WANG, Z. *et al.* Variation of self-cleaning performance of nano-TiO<sub>2</sub> modified mortar caused by carbonation: from hydrates to carbonates. **Cement and Concrete Research**, v. 158, 2022.

**William José Kappes Fleck**

Conceitualização; Curadoria de dados; Análise dos dados; Pesquisa; Metodologia; Design da apresentação de dados; Validação de dados e experimentos; Redação do manuscrito original.

Instituto de Ciências Criativas e Tecnológicas | Universidade FEEVALE | ERS-239, 2755 | Novo Hamburgo - RS - Brasil | CEP 93525-075 | Tel.: (51) 3586-8800 | E-mail: william.3fleck@gmail.com

**Eduardo Polesello**

Conceitualização; Curadoria de dados; Análise dos dados; Validação de dados e experimentos; Redação - revisão e edição; Supervisão.

Instituto de Ciências Criativas e Tecnológicas | Universidade FEEVALE | E-mail: eduardopolesello@feevale.br

**Felipe Augusto Leão**

Análise dos dados; Validação de dados e experimentos.

Instituto de Ciências Criativas e Tecnológicas | Universidade FEEVALE | E-mail: felipeleao.nh@gmail.com

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

**Ambiente Construído**

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.