

AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE TiO₂ NAS PROPRIEDADES MECÂNICA E DE DURABILIDADE DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Antônio S. Freire, Julia B. Donnard, Luiz A. M. N. Branco e White J. dos Santos*

Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil

Palavras-chave: Argamassa com TiO₂, Reações fotocatalíticas, Argamassas autolimpantes, Argamassas de revestimento.

Resumo. Várias pesquisas realizadas a respeito das argamassas de revestimento contendo TiO₂, geralmente focam nas reações fotocatalíticas e não discutem as propriedades mecânicas e de durabilidade. Este trabalho objetiva estudar propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade em argamassas de revestimento com a variação do teor de adição de TiO₂. Empregou-se CP-II-E-32, cal CH-I, areia natural quartzosa e TiO₂ artificial. Para isto, caracterizou-se os materiais quanto a composição química, física, e fases cristalinas. Nas argamassas foram avaliados: resistências à compressão, tração na flexão e aderência, módulo de elasticidade, absorção de água por capilaridade, fissurabilidade e imagens de microscópio digital. Os resultados demonstraram que somente a compressão e densidade de massa não foram influenciadas pelo teor de adição de TiO₂. Já nas demais, percebe-se uma variação significativa e no sentido de deixar as argamassas mais fracas, menos aderentes e com isto menos durável quanto aos parâmetros analisados. Conclui-se que, para a adição de TiO₂ ser viável, deve-se tomar algumas precauções, como aumentar consumo de cimento e fazer dosagem experimental de modo a avaliar as propriedades mais críticas e assim garantir um revestimento de boa qualidade e durabilidade.

Endereços de e-mail: antonio.asfreire@yahoo.com.br, ju.donnard@hotmail.com, luizmelg@gmail.com, white.santos@demc.ufmg.br*

EVALUATION OF THE ADDITION OF TiO₂ ON THE MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF COATING MORTAR

Keywords: Mortar with TiO₂, Photocatalytic reactions, Self-cleaning mortars, Coating mortars.

Abstract. Several research carried out regarding TiO₂-containing coating mortars generally focus on photocatalytic reactions and do not discuss mechanical and durability properties. This paper aims to study mechanical properties and durability indicators in coating mortars with the variation of TiO₂ addition content. CP-II-E-32, CH-I lime, natural quartz sand and artificial TiO₂ were used. For this, the materials were characterized in terms of chemical and physical composition, and crystalline phases. In the mortars, the following were evaluated: compressive strength, flexural and pull-off strength, modulus of elasticity, water absorption by capillarity, crackability and digital microscope images. The results showed that only compression and bulk density were not influenced by the TiO₂ addition content. In the others, a significant variation can be seen, in the sense of making the mortars weaker, less adherent and, therefore, less durable in terms of the parameters analysed. It is concluded that, for the addition of TiO₂ to be viable, some precautions must be taken, such as increasing cement consumption and carrying out an experimental dosage in order to evaluate the most critical properties and thus guarantee a coating of good quality and durability.

1 INTRODUÇÃO

As argamassas apresentam elevado consumo mundial, podendo ser utilizadas em revestimento de paredes, tetos e pisos ou, assentamentos de alvenarias de vedação e/ou estrutural [33, 40, 41]. Uma parcela significativa destas argamassas possui propriedades mecânica, físicas e químicas muitas vezes insatisfatórias para atender a projetos com grandes cargas e condições ambientais mais severas [34]. Tem-se como principais fatores responsáveis a este cenário: falhas na dosagem, escolha equivocada dos materiais (proporcionamento dos materiais como a definição do teor de cimento e/ou de cal) e deficiências na mistura em canteiros de obras [34, 35]. Gera-se com isto, uma elevada presença de manifestações patológicas em revestimentos de argamassa de edificações como: fissuras disseminadas (65,32%), fissuras mapeadas (9,56%), manchas de umidade (2,13%), vesículas (22,82%), descolamento (3,08%) e outros tipos de fissuras (1,57%) [36, 39].

O adequado desempenho da argamassa ao longo do tempo, ou seja, sua durabilidade, depende da escolha correta do traço e de como os materiais se comportam de forma conjunto no compósito diante da ação dos agentes agressivos [35]. No entanto, na prática observa-se o emprego de traços mais pobres que o necessário [17], o que compromete a qualidade do revestimento. O desempenho da argamassa está condicionado à aspereza, determinada em função da natureza mineralógica e granulometria do agregado [24, 28, 32, 33] acabamento final [22, 32]; resistência mecânica oriunda dos materiais empregados [22]; o proporcionamento de forma eficiente [1, 34, 40] e quantidade de água na mistura [27].

Associado ao comportamento das argamassas ao longo do tempo, tem-se que nos últimos anos, cresceu-se o número estudos acerca dos efeitos da poluição atmosférica nas edificações. Justifica-se estas pesquisas a elevada superfície de contato entre os materiais de construção e os poluentes atmosféricos, existindo maiores problemas de sujeidade e deterioração devido a esses agentes agressivos. Uma das formas de se reduzir estes efeitos é o uso de fotocatalizadores, sendo o mais eficiente e utilizado atualmente é o dióxido de titânio (TiO_2) [23, 30]. As principais aplicações são em revestimentos construtivos exteriores e interiores, construção de estradas, instalações de purificação de ar e outros materiais [27]. Tem-se como princípio a capacidade de decompor matérias nocivas presentes no ar e que entrem em contato com a superfície fotocatalítica gerando a capacidade de autolimpeza do revestimento, bem como interromperem alguns mecanismos responsáveis por esse fenômeno [19, 25].

O TiO_2 é um material com capacidades fotocatalíticas e pela absorção dos raios ultravioletas da luz solar (320-400nm) e presença de moléculas de água [19, 25] leva à formação de compostos que possuem um forte poder oxidante (radicais hidroxila (OH^\cdot) e íons superóxidos (O_2^\cdot), que reagem com a sujeidade ou com outros compostos orgânicos e inorgânicos causando a sua dissociação e contribuindo para a sua desintegração [19]. Aliado a isto, tem-se o efeito de que quando sujeito à radiação ultravioleta reduz-se o ângulo de atrito interno da água tornando a superfície do material hidrofílica, o que contribui para o aumento do efeito autolimpante [21]. Percebe-se que a maioria das pesquisas [19, 21, 23, 25, 31] a respeito das argamassas contendo TiO_2 , focam-se na reação fotocatalítica e descuidam das propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas contendo este material.

Diante deste contexto, este trabalho objetiva estudar argamassas de revestimento com a variação do teor de adição de TiO_2 e avaliar algumas propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade, de modo a identificar seu comportamento e definir possíveis vantagens, desvantagens, indicações e contra-indicações.

2 MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental deste trabalho consistiu em caracterizar os agregados, cimento e

o TiO_2 e realizar os ensaios necessários para avaliar as características mecânica e indicadores de durabilidade da argamassa conforme se varia o teor de TiO_2 . As argamassas foram dosadas de modo a se obter um traço de uso comum na construção civil, sendo adotado 1:1:6 (cimento:cal:areia) em volume. Empregou-se Cimento CP II-E-32 (comumente utilizado em argamassas de revestimento); Cal CH I (com garantia de 100% de óxidos cálcio hidratados) (Tabelas 1 e 2), agregado miúdo natural quartzoso localizado na zona utilizável inferior (Tabela 1 e Figura 1).

A análise granulométrica do TiO_2 foi realizada por radiação a laser em dois equipamentos: o da marca CILAS 1064, que opera na faixa de 0,04 μm a 500 μm , e o da marca SYMPATEC HELOS 12LA, que tem uma amplitude de faixa bem maior, de 0,01 μm a 8.750 μm . Para a massa específica foi utilizado o aparelho SteroPycnometer, picnômetro a gás He da marca Quantachrome. A área superficial e porosidade utilizou o método BET com multipontos por adsorção e dessorção de nitrogênio, com equipamento da marca Quantachrome NovaWin2, versão 9.0. Para caracterização mineralógica foi utilizado o Difratômetro de raios-X (amostras em pó) da marca Philips (Panalytical), sistema X'Pert-APD, com controlador PW 3710/31, gerador PW 1830/40, goniômetro PW 3020/00 com tubo de cobre ($Z = 29$): $\lambda \text{K}\alpha$ médio = 1,54184 Å - $\lambda\alpha_1 = 1,54056$ Å. Avaliou-se a microestrutura das partículas de TiO_2 através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca FEI, modelo Inspect S50, equipado com o microanalisador, um espectrômetro de raios-X por dispersão de energia da marca EDAX Genesis.

Tabela 1: Composição química e física do cimento e da cal

Material	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	LOI (%)	γ_r (kg/dm^3)	γ_u (kg/dm^3)	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)
Cimento	17.92	4.27	2.94	61.59	3.01	6.35	3.05	1.71	5.3	23	65
Cal	1.88	0.26	0.22	49.35	26.45	21.74	2.24	0.50	0.47	4.28	30.84

γ_r : massas específica real, γ_u : massa específica unitária, LOI: Perda ao Fogo.

Tabela 2: Caracterização dos agregados

Composição granulométrica [15]	
Dimensão máxima característica	4,8 mm
Módulo de finura	2,65
Massa específica real [11]	2,64 kg/dm^3
Massa específica unitária [13]	1,44 kg/dm^3
Teor de argila [9]	Isento
Teor de material pulverulento [12]	4,36%
Impureza orgânica [14]	< 300 ppm
Absorção de água [11]	1,47%
Formas dos grãos	Arredondados

A moldagem das argamassas foi realizada em copos de prova cilíndricos (5x10) cm de forma manual em duas camadas, com 12 golpes cada. A moldagem das formas prismática foi realizada de forma mecânica em duas camadas, com 30 quedas cada uma [2]. A aplicação do revestimento de argamassa nos prismas de alvenaria (40x40) cm foi de forma manual. As amostras permaneceram em ambiente fechado, com temperatura média de 24°C e umidade relativa de 60% por 28 dias antes de serem testadas. Destaca-se que o teor de água foi ajustado para consistência de 260 \pm 10 mm [3]. Os traços foram estruturados mantendo-se a relação constante de aglomerante/agregado e variou-se o percentual de adição, a saber: 0%, 1%, 2% e 3% sobre a massa de cimento.

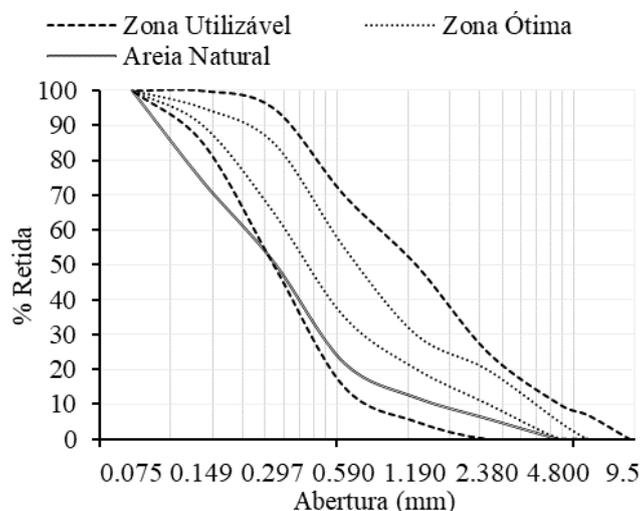


Figura 1: Granulometria do agregado miúdo

Para caracterizar as argamassas avaliou-se a resistência à compressão e tração na flexão [4] aos 7, 14 e 28 dias em amostras de 4x4x16 cm (6 amostras cada) em uma prensa CONTENCO com aplicação de carga de 0,5 MPa e precisão de 10 N. Os ensaios de tração por aderência (A_d) [10] foram avaliados em prismas de blocos de concreto chapiscados com revestimento de argamassa de 1 cm utilizando o equipamento HILTI TE 2M (600 W) com precisão de 0,01 MPa e, 4 pontos foram avaliados nesses prismas para obter o valor médio. O módulo dinâmico de elasticidade (E_d) [8] usou o método de propagação de ondas ultrassônicas com o equipamento TICO da PROCEQ com frequência de 54 kHz em 4 amostras com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A densidade de massa [5] e absorção de água por capilaridade [7] foram medidas em 4 corpos de prova cilíndricos, cada um com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, obtendo-se a quantidade de água que entrava nas amostras, verificada com uma precisão de 0,01 g. Também foi utilizado um microscópio digital de 1000x para analisar imagens da superfície das argamassas e investigar a interferência entre o conteúdo da matriz (cimento e cal) e os agregados nesses compósitos. Por meio do programa de processamento de imagens ImageJ®, foram analisadas imagens das argamassas, extraídas da seção central com serra de diamante e revestidas com areia. Para enfatizar as características estudadas, as amostras foram pintadas com pincel de quadro branco. Após análise e contagem dos pontos no software Excel, o histograma foi calculado e os gráficos foram estruturados, correlacionando o tamanho dos poros e a porcentagem aparente.

Foi realizada a análise dos resultados por meio de teste estatísticos de Normalidade, ANOVA e Teste t , sendo os resultados expressos como média \pm erro padrão. Os resultados foram avaliados para condições de revestimento externo, com base na ABNT NBR 13281 [6] e bibliografia [18, 33, 34].

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Caracterização do TiO_2

Constata-se pela análise da difração de Raios-X (Figura 2) que a amostra tem um percentual de 81,6% de dióxido de titânio sintético anatásio (A) e 18,4% do rutilo (R), conforme correlação do Icor encontrado pelo valor tabelado pelo ICDD.

O TiO_2 [21] pode cristalizar sob três formas: rutilo, anatase e brooquite. A rutilo é mais estável em termos termodinâmicos e mais disponível no mercado, sendo utilizado para aplicações de pigmentação, já as demais são metaestáveis e podem ser transformadas em rutilo por tratamento térmico. Segundo Rego (2008) a anatásio é a forma estável em baixa temperatura enquanto a rutilo é a forma dominante para altas temperaturas. A anatásio é mais utilizada por ter maior eficiência fotocatalítica que os outros tipos de TiO_2 , cristalizando-se sob o sistema tetragonal, possuindo cor e brilho variável [19].

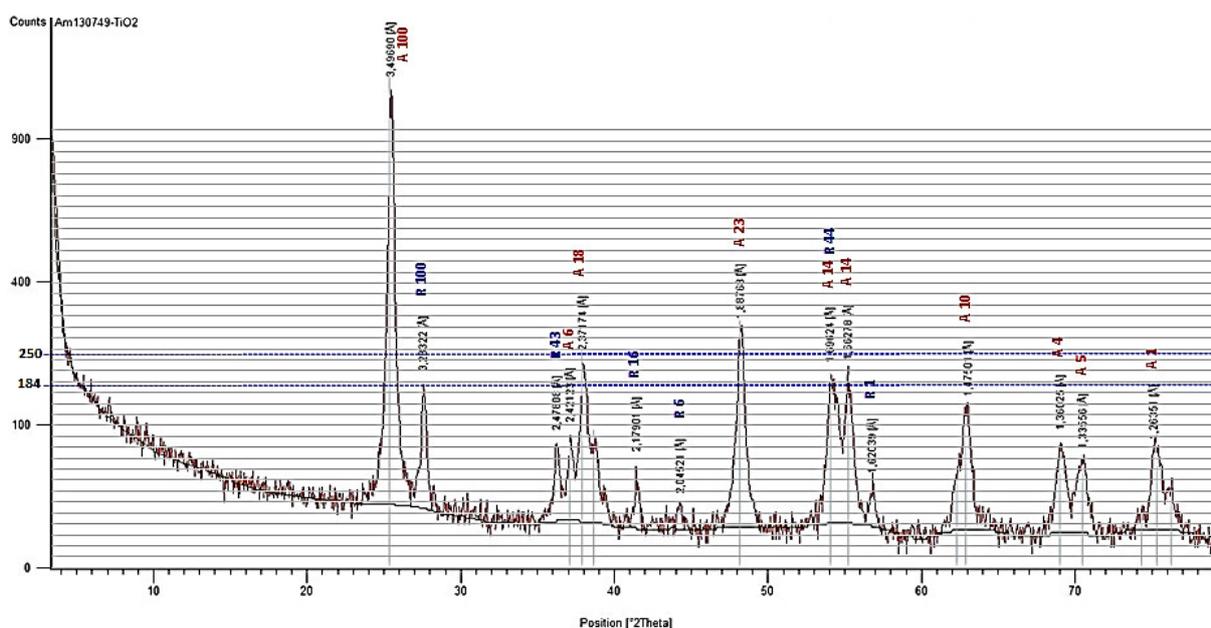


Figura 2: Resultado da difração de Raios-X do TiO_2

Constata-se, pelas Tabela 3 e Figuras 3 e 4, que as medidas da distribuição granulométrica do TiO_2 apresentaram diferença não foi tão expressiva entre os métodos, chegando a no máximo a 7%. Constata-se que estas ocorreram devido, sobretudo ao processo de dissociação das partículas que no caso do SYMPATEC o procedimento de uso de dispersante, agitação e ultrassom promovem uma maior dispersão das partículas, o que não ocorre no CILAS pelo não uso de dispersante, permitindo que algumas partículas ainda permanecessem aglutinadas o que causa erros fornecendo uma medida de diâmetro das partículas ligeiramente aumentada.

Tabela 3: Resultados dos "diâmetros principais" da granulometria do TiO_2 (μm)

	1° SYMPATEC	2° SYMPATEC	SILAS
D_5	0,44	0,47	0,23
D_{10}	0,56	0,61	0,42
D_{16}	0,69	0,76	0,5
D_{50}	1,52	1,71	2,05
D_{84}	3,14	3,52	4,45
D_{90}	3,77	4,17	5,36

Percebe-se ao analisar a Figura 4 (MEV do TiO_2) uma extrema finura do material, que inclusive se apresenta sob a forma de aglomerações de partículas finíssimas, possivelmente de forma equiaxial. Sendo inclusive complicado avaliar uma dimensão para estes grãos devido à dificuldade de se conseguir uma boa resolução da imagem de modo a permitir visualizar das

partículas.

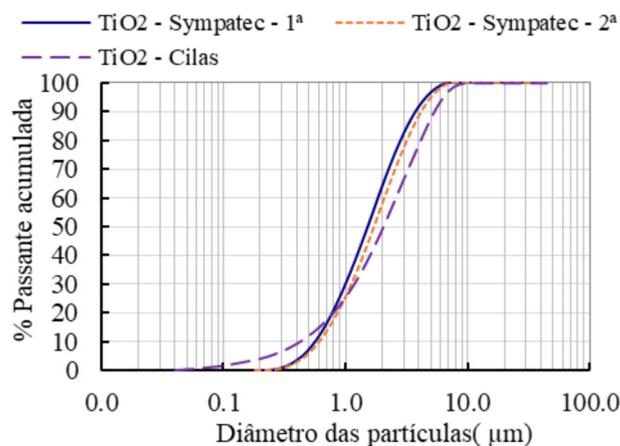


Figura 3: Curvas granulométrica do TiO_2 para os equipamentos SYMPATEC e CILAS

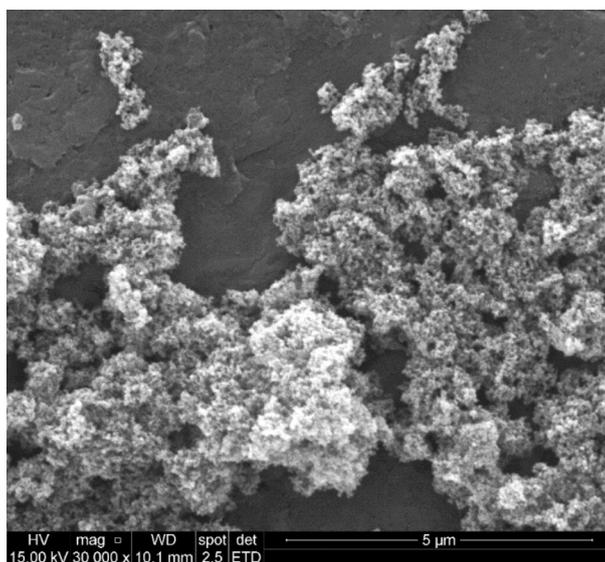


Figura 4: Microestrutura do TiO_2 por Microscopia eletrônica de varredura – MEV

Correlacionando esta imagem com o ensaio de granulometria (Figura 3 e Tabela 3) por difração da radiação laser, constata-se que realmente o tamanho das partículas é muito pequeno, sendo que neste, o diâmetro médio foi de aproximadamente $1,62 \mu\text{m}$, o que permite pensar que na verdade a medida realizada pode ter analisado aglomerações deste material e não partículas dispersas, não descrevendo assim o diâmetro real destas partículas. Percebe-se que mais de 90% do material apresenta granulométricas abaixo do $5 \mu\text{m}$ e pelas imagens de MEV, conclui-se que os tamanhos são ainda menores que os aferido pelos ensaios de difração por radiação laser, dando característica nanométricas (10^{-9} mm) a este material, conforme bibliografia [23, 30]. Nestas condições o termo mais aceito para aferir a finura do material seria a área superficial (Figura 5).

O TiO_2 apresentou uma grande área superficial específica ($42,401 \text{ m}^2/\text{g}$) devido ao tamanho reduzido de suas partículas [21, 26], mas apresentam pouca porosidade, o que pode ser constatado pela sobreposição da curva de adsorção e dessorção (Figura 4), não havendo histerese, que seria o indício de que não haveria poros na superfície dos grãos. Ressalta-se que informações quanto a presença de poros leva em conta a capacidade de medidas dos

equipamentos e procedimentos utilizados. Caso existam poros menores que a capacidade detectável destes aparelhos e métodos estes não seria reconhecido. O TiO_2 analisado apresentou massa específica próximo ao informado pela bibliografia [21, 23], com valor de $1,200 \text{ g/dm}^3$.

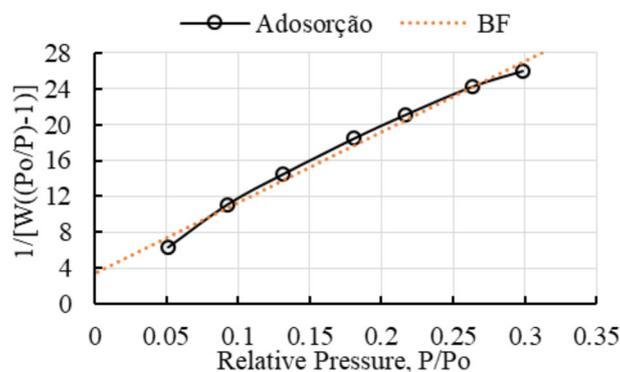


Figura 5: Adsorção e dessorção do TiO_2

3.2 Análise de argamassa de revestimento com adição de TiO_2

A resistência compressão (Figuras 6 e 7) apresentou que o aumento do teor de TiO_2 tende a reduzir ($\approx 12\%$) o ganho de resistência inicial das argamassas de revestimento, diferente do encontrado na bibliografia [19, 23, 27] que demonstra o aumento de resistência inicial e final. No caso deste trabalho, percebeu-se que a presença de TiO_2 estudado influenciou somente nas primeiras idades, devido ao envolvimento de algumas partículas de cimento [17, 23], contudo o processo de hidratação continuou e aos 28 dias de idade, percebe-se valores semelhantes (iguais estatisticamente – teste t). Todas as argamassas podem ser classificadas como P4 a P6, ou seja, de média a alta resistência a compressão com indicação para revestimentos externos [6, 17].

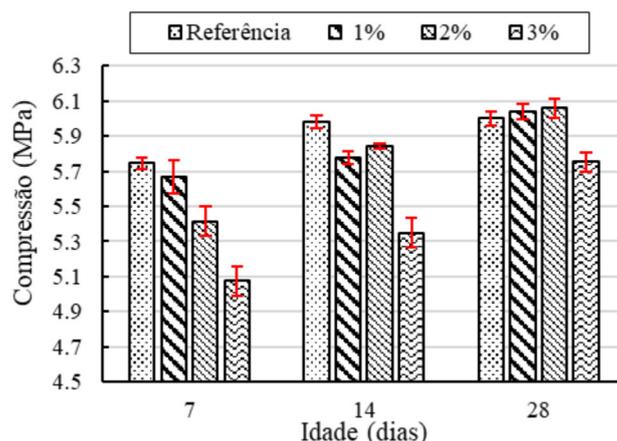


Figura 6: Resultados de compressão das argamassas em relação a idade e ao teor de TiO_2

Somente em 3% de TiO_2 se percebeu uma maior variação aos 28 dias, apresentando uma queda de 4,11% em relação ao traço de referência. Tanto que a correlação quadrática gerada pela linha de tendência tende a constância próximo a 6 MPa. Estes resultados demonstram que a compressão não foi influenciada pela adição do TiO_2 para os teores testados, logo não se identificou ganhos ou perdas a serem considerados, permitindo o uso desta adição até o teor

avaliado de 3%.

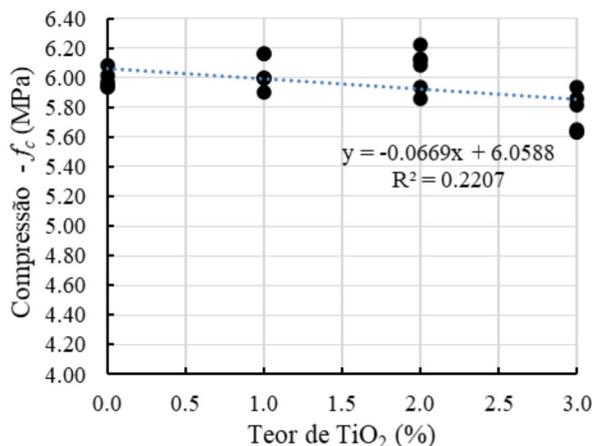


Figura 7: Correlação entre a variação do teor de adição de TiO₂ e a resistência à compressão

Já a resistência a tração na flexão (Figuras 8 e 9) se mostrou mais influenciada do que a compressão, chegando a uma redução de 36% com 3% de TiO₂ na resistência inicial e 42% na final. Percebe-se que com o aumento do teor TiO₂ tende a diminuir mais a resistência tração na flexão nas idades maiores (28 dias). Consta-se que a presença de TiO₂, mesmo em um teor pequeno e devido a sua elevada área superficial recobriu as partículas de cimento e reduziu a capacidade de ancoragem gerada pela etringita e C-S-H no agregado, o que convergiu para redução desta propriedade [26]. A correlação aos 28 dias (Figura 8) demonstra um comportamento linear da resistência a tração na flexão com o teor de adição de TiO₂. Os resultados indicam uma argamassa de média (referência) a baixa (3% de TiO₂) resistência a tração na flexão se enquadrando com R1-R2 [6, 16, 17] e sendo indicada somente para ambiente internos quando o teor de TiO₂ for de até 1%.

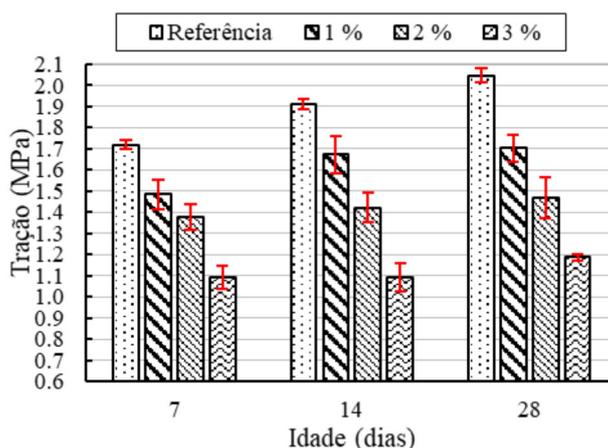


Figura 8: Resultados da tração na flexão das argamassas em relação a idade e ao teor de TiO₂

Resultado semelhante ao de f_t foi o de aderência (Figura 10) que gerou uma redução de 16% no valor com adição de 3% de TiO₂. Apesar da redução ser pequena transformou uma argamassa que atendia para revestimento externo (A3) em uma que só pode ser utilizada em ambientes internos (A2) [6, 16, 17]. Destaca-se que estas propriedades são mais importantes do que a compressão para os revestimentos argamassados, porque representa a capacidade do revestimento acompanhar as deformações do substrato e mesmo da variação térmica de forma aderida a este e sem fissurar. Logo os valores de tração e aderência mais elevados são

melhores e, percebe-se que a adição de TiO_2 , mesmo em pequenos teores (1% - 14% de redução da aderência) se mostrou expressivamente prejudicial.

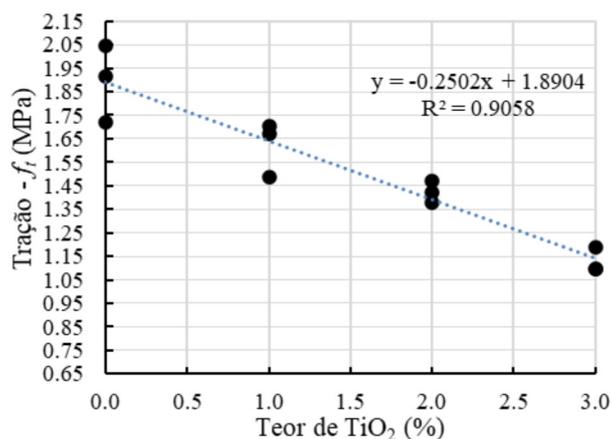


Figura 9: Correlação entre o teor de adição de TiO_2 e a tração na flexão

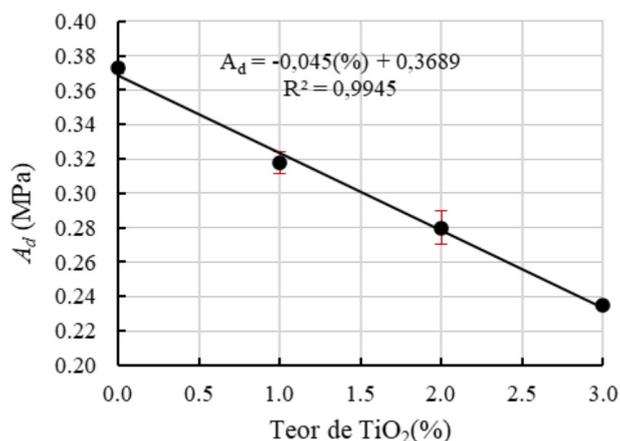


Figura 10: Resultados de tração por aderência das argamassas com a variação do teor de adição de TiO_2

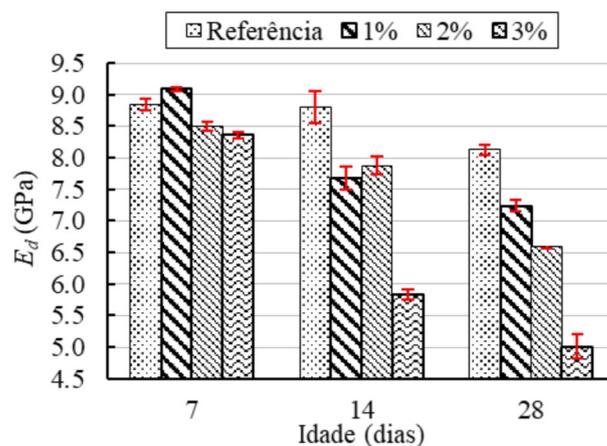


Figura 11: Resultados de módulo de elasticidade em relação a idade e ao teor de adição de TiO_2

Pelas Figuras 11 e 12, pode-se analisar o módulo de elasticidade e perceber uma redução com o tempo de cura ocasionada pela água aprisionada durante o processo de mistura. Esta foi

de forma mais evidente para os traços com adição de dióxido de titânio, no qual se percebeu uma variação de 11%, 19% e 39% aos 28 dias para os teores de 1%, 2% e 3% de adição, respectivamente. Percebe-se que presença destes materiais incorporaram ar a mistura e deixaram a mistura mais deformável, tornando-a uma argamassa com baixa propensão a fissuração ($E_d \leq 7$ GPa) [20]. Contudo quando se avalia pela relação E_d/f_t , percebe-se que a presença de TiO_2 aumenta (12%) a propensão a fissuração [20], sobretudo nas primeiras idades, demonstrando que se deve tomar mais cuidado com as argamassas com adição deste material durante o período de cura de modo a evitar danos.

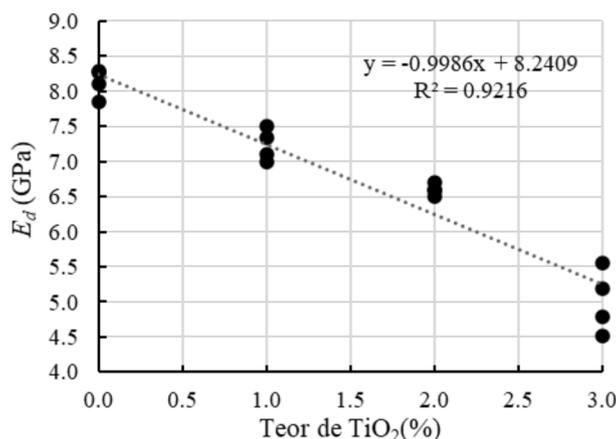


Figura 12: Correlação entre o teor de adição de TiO_2 e o módulo de elasticidade

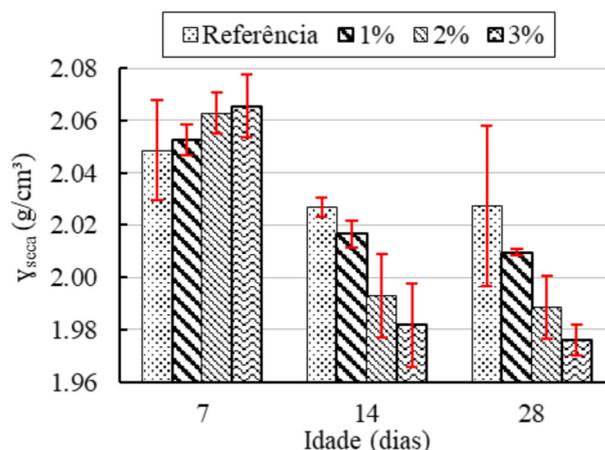


Figura 13: Resultados de densidade de massa em relação a idade e ao teor de adição de TiO_2

A massa específica (Figuras 13 e 14) do TiO_2 ($1,200\text{kg}/\text{dm}^3$) e bem menor que os demais materiais (cimento – $3,15\text{ kg}/\text{dm}^3$, cal – $2,8\text{ kg}/\text{dm}^3$ e areia – $2,64\text{ kg}/\text{dm}^3$), contudo a densidade de massa da argamassa variou pouco (3%), demonstrando que a presença desta adição nos teores avaliados não influencia esta propriedade. Estas argamassas, de fora geral, apresentam de média a elevada densidade [6, 17], sendo sua aplicação executada com cuidado de modo a garantir espessuras menores e assim reduz a carga na argamassa durante sua pega evitando o descolamento do substrato [38].

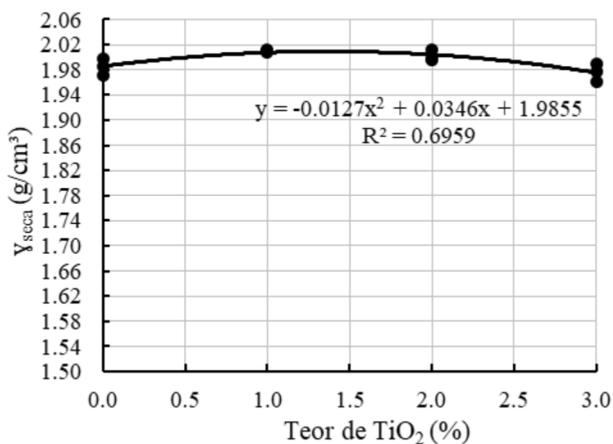


Figura 14: Correlação entre o teor de adição de TiO₂ e a densidade de massa

Avaliou-se a absorção de água por capilaridade (Figuras 15 e 16) e percebe-se que a adição de dióxido de titânio influencia nestas propriedades (aumento de 40 a 47% com o aumento do TiO₂), com a redução do tamanho dos poros (Figura 17) e aumento da condutividade dos mesmos [29].

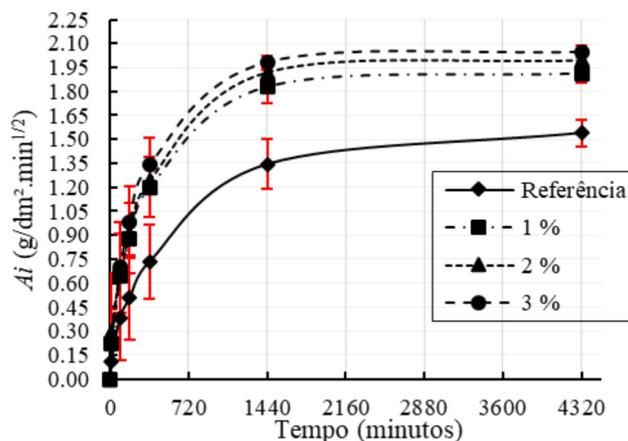


Figura 15: Resultado da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade em relação ao teor de adição de TiO₂

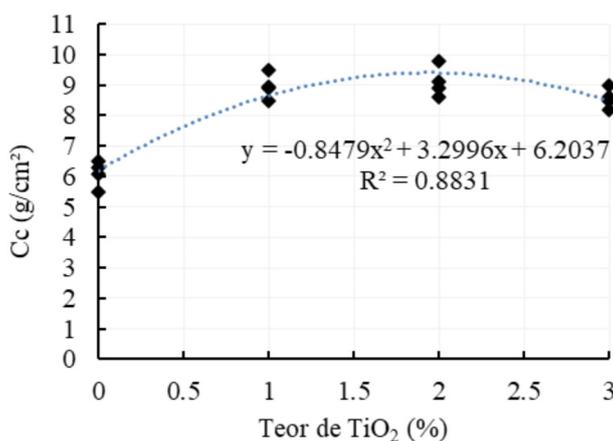


Figura 16: Correlação entre o teor de adição de TiO₂ e o coeficiente de capilaridade

Destaca-se a importância desta propriedade no que tange a permeabilidade da argamassa, uma vez que esta permitirá a entrada de agentes agressivo [17, 34], mas também permitirá a percolação de água [16] e CO_2 [37] que garantirá a carbonatação da cal. Logo, o elevado coeficiente de capilaridade (C4-C5) encontrado para os traços com adição de TiO_2 demonstram que se obteve argamassas qualidade não assegurada para uso na construção civil em revestimentos de fachadas que são os mais submetidos aos agentes agressivos e umidade [6, 17, 34] e que mais justificam o uso do fotocatalisadores.

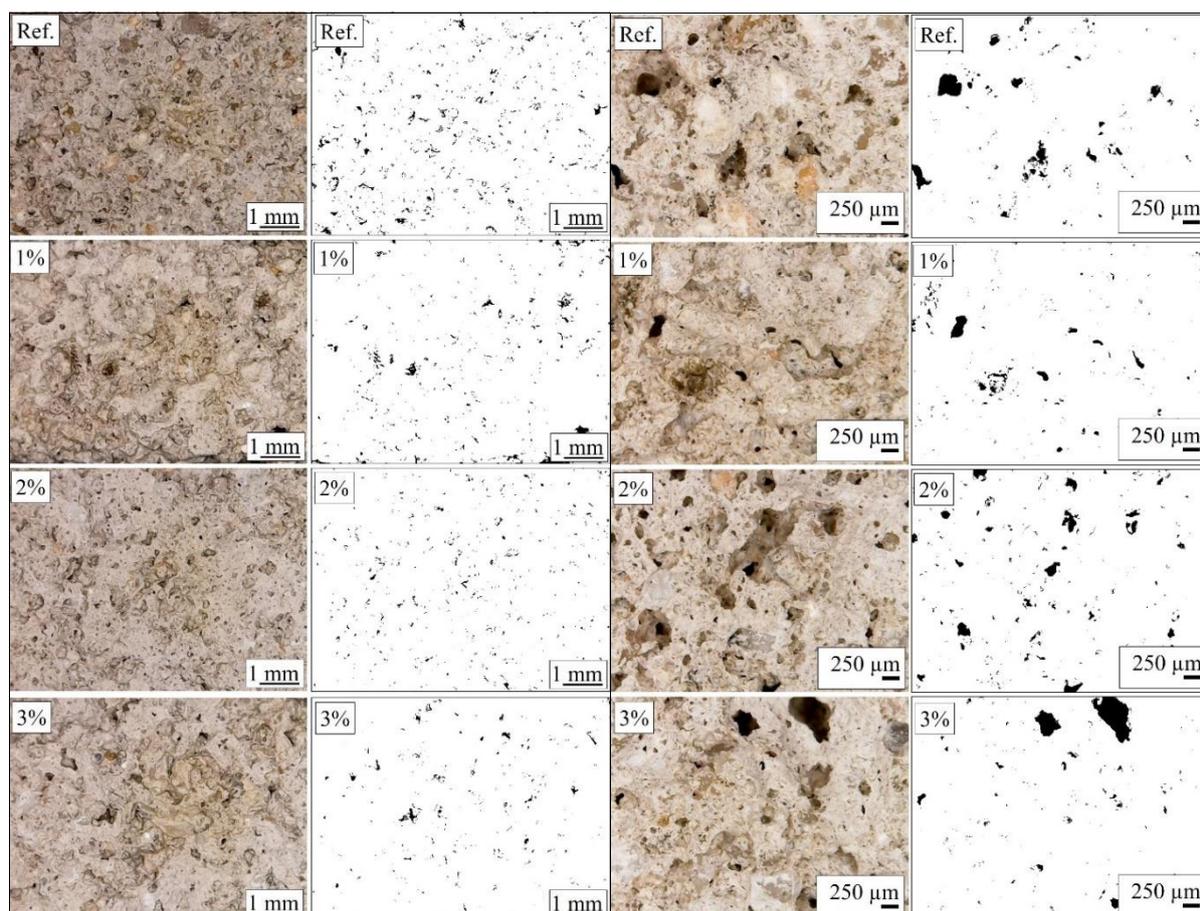


Figura 17: Imagens de microscópio digital das argamassas com o teor de adição de TiO_2 – aproximação de 1 mm e de 250 μm

Pode-se destacar que a presença de adição de TiO_2 gera um aumento, contudo não foi possível encontrar uma correlação entre este e o coeficiente de capilaridade. Ressalta-se ainda que apesar da variação percentual os valores encontrados na capilaridade são baixos para argamassas de revestimento [6, 17, 34], demonstrando que os poros são percoláveis na superfície, contudo se mostram isolados no interior das amostras como pode ser visto na Figura 17.

Pela análise das imagens de microscópio digital (Figura 17) com aproximação de 1000x e de 250 μm , percebe-se uma tendência de os poros diminuírem nos traços com 1% e 2% de TiO_2 , e ser maior nos traços de referência e com adição de 3% de TiO_2 , semelhante ao percebido no ensaio de capilaridade (Figura 16). Não é possível visualizar as partículas de dióxido de titânio, devido ao seu tamanho reduzido, contudo é possível inferir que a presença deste material, não influenciou significativamente na macroestrutura da argamassa no que tange aspectos visual, logo deve-se verificar alterações em escalas mais reduzidas analisando

o cimento e a adição e possíveis reações entre estes compostos.

Realizou-se o texto ANOVA nos dados e equações encontradas em cada correlação e, percebe-se que somente a compressão e densidade de massa não se mostraram influenciadas pelo teor de adição de TiO_2 , ou seja, nas variações deste trabalho não se percebeu variações significativas nestas propriedades. Já nas demais, percebe-se uma variação significativa e no sentido de deixar as argamassas mais fracas, menos aderentes e com menor durabilidade quanto aos parâmetros analisados.

4 CONCLUSÕES

Conclui-se que a adição de TiO_2 é uma alternativa viável no que tange a propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade, desde que, seja tomando algumas precauções:

- deve-se aumentar consumo de cimento com o viés de maximizar a resistência a tração e de aderência da argamassa de revestimento – indica-se dosagem experimental para aferir melhor esta propriedade;
- este aumento deixará a argamassa menos deformável, exigindo-se avaliar corretamente o posicionamento de juntas de movimentação. Para tal, deve-se verificar os valores do módulo de elasticidade com o teor de adição, uma vez que mais cimento aumenta o módulo e o aumento da adição o reduz;
- no que tange a capilaridade, constatou-se influência significativa pela adição de TiO_2 , contudo possíveis aumentos do teor de cimento podem reduzir este parâmetro e aumentar a durabilidade; e
- utilizar as curvas de correlação como primeira aproximação das propriedades, de forma a se buscar os melhores teor de cimento e adição para garantir a propriedades.

Acredita-se que este trabalho possibilite aos profissionais e pesquisadores da área de construção civil uma fonte extra de informações para auxiliar na dosagem de argamassas com adição de dióxido de titânio. Pode-se ainda, auxiliar nos cuidados do uso destes compósitos aderidos aos revestimentos argamassas e assim considerar possíveis influências deste no substrato.

Agradecimentos

A equipe de pesquisa agradece às agências de fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio prestado a este estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] J. M. Allwood, M. F. Ashby, T. G. Gutowski e E. Worrell. Material efficiency: a white paper. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3):362–381, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.002>.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 7200:1982 – Revestimento de paredes e tetos com argamassas. Materiais, preparo, aplicação e manutenção*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 1982.
- [3] _____. *ABNT NBR 13276:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2005.

- [4] _____. *ABNT NBR 13279:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2005.
- [5] _____. *ABNT NBR 13280:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2005.
- [6] _____. *ABNT NBR 13281:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2005.
- [7] _____. *ABNT NBR 15259:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2005.
- [8] _____. *ABNT NBR 15630:2009 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2009.
- [9] _____. *ABNT NBR 7218:2010 – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2010.
- [10] _____. *ABNT NBR 13528:2010 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência potencial de aderência à tração*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2010.
- [11] _____. *ABNT NBR 16916:2021 – Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2021.
- [12] _____. *ABNT NBR 16973:2021 – Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira 75 μm por lavagem*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2021.
- [13] _____. *ABNT NBR 16972:2021 – Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2021.
- [14] _____. *ABNT NBR 17053:2022 – Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2022.
- [15] _____. *ABNT NBR 17054:2022 – Agregado – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio*. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2022.
- [16] L. L. M. Baía e F. H. Sabbatini. *Projeto e execução de revestimentos de argamassa*. Editora O Nome da Rosa. 4a edição, 2008.
- [17] H. Carasek. *Argamassa*. In: G. C. Isaia. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. Ibracon, 2010.
- [18] H. Carasek, R. C. Araujo, O. Cascudo e R. Angelim. Sand parameters influencing the consistency and bulk density of renderings mortars. *Revista Matéria*, 21(3):714–732, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0068>.

- [19] C. A. Casagrande. *Estudo da incorporação de partículas de titânia em argamassas fotocatalíticas*. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis – SC, Brasil, 2012.
- [20] Centre Scientifique et Technique du Batiment. *Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation – Cahier MERUC*. Livraison 341, cahier 2669–3. Paris, 1993.
- [21] M. Diamanti, M. Ormellese e M. Pedferri. Characterization of photocatalytic and superhydrophilic properties of mortars containing titanium dioxide. *Cement and Concrete Research*, 38(11):1349–1353, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.07.003>.
- [22] P. Faria, T. Santos e J. Aubert. Experimental characterization of an earth eco-efficient plastering mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28:1–9, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001363](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001363).
- [23] A. F. Folster. *Efeitos da adição de nanotitânia em uma argamassa de Revestimento*. Monografia de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville – SC, Brasil, 2015.
- [24] L. D. O. Haddad, C. M. Costa, P. H. P. Lopes, A. N. de Carvalho Jr. e W. J. dos Santos. Analysis of influence of the fine aggregate particle size in the mechanical properties and durability of coating mortar. *Science & Engineering*, 25(1):7–16, 2016.
- [25] G. Hüsken, M. Hunger e H. J. H. Brouwers. Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification. *Building and Environment*, 44(12):2463–2474, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.04.010>.
- [26] E. H. Kadri e R. Duval. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. *ACI Materials Journal*, 99(2):138–142, 2002. <https://doi.org/10.14359/11705>.
- [27] F. Larrard. Concrete optimisation with regard to packing density and rheology. In: *3rd International RILEM Symposium on Rheology of Cement Suspensions such as Fresh Concrete*, France, 1(1):1–8, 2009.
- [28] L. Meng, P. Lu, S. Li, J. Zhao e T. Li. Shape and size effects on the packing density of binary spherocylinders. *Powder Technology*, 228:284–294, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.05.033>.
- [29] M. R. Nokken e R. D. Hooton. Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete. *Materials and Structures*, 41:1–16, 2008. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9212-y>.
- [30] J. Paramés e J. de Brito. Self-cleaning nanotechnologic construction materials. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, 15:55–62, 2010.
- [31] E. B. M. Rego. *Fotodegradação de soluções de laranja II e efluentes da indústria têxtil por camadas de TiO₂ e ZnO, serigrafadas em peças cerâmicas*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro, Portugal, 2008.
- [32] M. Sahmaran, M. Lachemi, K. M. A. Hossain, R. Ranade e V. C. Li. Influence of aggregates type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 106:308–316, 2009.
- [33] W. J. dos Santos, R. C. S. Alvarenga, R. C. Silva, L. G. Petroti, A. T. Souza e A. S. Freire. Analysis of the influence of fine aggregate type on the characteristics and dosage

- of mixed mortar. *Ambiente Construído*, 19(4):271–288, 2019. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9956993.v1>.
- [34] W. J. dos Santos, R. C. S. S. Alvarenga, L. G. Pedroti, R. C. Silva, A. S. Freire, B. A. Moraes e C. C. Carvalho. Proposal for a mix design method for coating mortar with artificial crushing sand. *Ambiente Construído*, 18(1):225–243, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100218>.
- [35] W. J. dos Santos, E. V. M. Carrasco, J. N. R. Mantilla, E. M. Piancastelli, A. G. Magalhães, F. J. Silva e M. A. P. Rezende. Study of the effects of excessive cement or lime in mechanical properties and durability of the mortar coating. *International Journal of Development Research*, 09(09):29923–29927, 2019.
- [36] G. T. Segat, *Manifestações patológicas observadas em revestimento de argamassa: um estudo de caso em conjunto habitacional na cidade de Caxias do Sul*. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade do Rio Grande do Sul, Caxias do Sul – RS, Brasil, 2005.
- [37] J. Sim e C. Park. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste management*. 31(11): 2352–2360, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.014>.
- [38] J. G. G. Sousa e P. L. O. Lara. *Reologia e trabalhabilidade das argamassas*. In: E. Bauer. *Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades*, 23–29. 2007.
- [39] A. T. Souza, L. A. Riccio, G. C. Laquini e W. J. dos Santos. Behavior of mortar coatings subjected to extreme conditions: Lack of curing and no substrate moistening. *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 7(75):53–59, 2018.
- [40] A. T. Souza, T. F. Barbosa, L. A. Riccio e W. J. dos Santos. Effect of limestone powder substitution on mechanical properties and durability of slender precast components of structural mortar. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1):847–856, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.024>.
- [41] A. T. Souza, C. de A. Carvalhais e W. J. dos Santos. Analysis of chemical admixtures combination on coating mortar using Simplex network method, *Construction and Building Materials*, 239:117796, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117796>.