

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

AMANDA CATUSSO

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO NA
CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS BRANCOS**

Porto Alegre
Janeiro 2020

AMANDA CATUSSO

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO NA
CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS BRANCOS**

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

Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Coorientadora: Roberta Picanço Casarin

Porto Alegre
Janeiro 2020

AMANDA CATUSSO

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO NA
CARBONATAÇÃO DE CONCRETOS BRANCOS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado como pré-requisito
para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL

Porto Alegre, janeiro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Angela Borges Masuero

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng.^o Rafael Mascolo

Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng.^a Roberta Picanço Casarin

Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que desde criança incentivaram muito meus estudos, me proporcionaram o melhor ambiente e condições para que eu buscasse todos os meus objetivos. Que compreenderam todas minhas ausências durante esses anos, principalmente agora no final. Vocês são meus exemplos maiores de superação e essa conquista tem muito de vocês. E também agradeço ao meu irmão Guilherme, com quem divido a vida em Porto Alegre há 5 anos, neste período o amadurecimento e aprendizado foram constantes e eu sou muito orgulhosa da amizade e parceria que temos hoje. Seu apoio, louças lavadas, jantãs, energéticos e compreensão comigo nesta fase final foram importantíssimos, muito obrigada.

Agradeço imensamente à Professora Denise, que é meu exemplo de engenheira desde quando a ouvi discursar no dia da minha matrícula. Ela, que além de ser minha orientadora neste trabalho também foi minha orientadora na iniciação científica. Uma mulher por quem nutro uma admiração enorme e que tenho a honra de aprender sempre que nos encontramos. Obrigada por todo conhecimento transmitido, pela confiança depositada em mim e por todo o esforço feito para que esse trabalho se realizasse, te admiro cada vez mais.

Também agradeço muito à minha coorientadora, Roberta, que aceitou essa missão, caiu e parafedas e não mediu esforços para que tudo saísse da melhor forma possível. Tua tranquilidade em tratar cada situação adversa que surgia com calma e inteligência me manteve motivada quando nada mais parecia fazer sentido. Tenho muita sorte em tê-la como parceira neste trabalho, obrigada.

Obrigada à Professora Angela, outra mulher que é exemplo e que admiro desde a minha iniciação científica, onde tive a honra de ser orientada por ela também. E que mais uma vez se fez presente, fazendo todo o possível para a realização deste trabalho.

Agradeço também à minha querida amiga Marina, meu exemplo de pesquisadora e também a pessoa responsável por eu me apaixonar por pesquisa. Orientação que virou admiração e que hoje tenho a alegria de chamar de amizade. Obrigada por não deixar a distância e tempo diminuírem a cumplicidade. Obrigada pelas palavras de carinho, por escutar meus surtos, por me guiar em meio aos meus resultados obtidos, por toda tranquilidade transmitida, pelas correções, pelas sugestões e por todo conhecimento transmitido durante todos esses anos. Te admiro muito e sou grata pela nossa amizade.

Agradeço ao amigo Airton, por todo auxílio durante a pesquisa e os ensaios realizados. Também agradeço a todos bolsistas e equipe do grupo NORIE/LAMTAC que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

Às minhas amadas amigas Ana, Luísa e Sibeli, que me acompanham nesta jornada há muito tempo. Suas amizades, apoio e companheirismo fizeram esse caminho muito mais leve. Vocês me inspiram, muito obrigada por me manter focada mesmo quando eu já não sabia para onde seguir.

Agradeço ao Rafa, que fez a semana de concretagem passar da mais horrível do ano para algo muito mais tranquilo de ser encarado. Obrigada por todo amor, pelo apoio incondicional, pela paciência, pela compreensão, por ser tão presente e por fazer de tudo para que essa fase fosse a melhor possível. Sem você não teria sido tão divertido, obrigada por tanto.

Agradeço também à maior atlética do Rio Grande do Sul, AAEE, por tornar o caminho até aqui muito mais alegre e leve, por me proporcionar amizades para uma vida e por me apresentar o esporte que ganhou meu coração. Aqui agradeço também ao San Diego Rugby Club, onde, além de ser muito feliz jogando meu rugbyzinho, encontrei mulheres maravilhosas que nunca me deixaram desacreditar do meu potencial e que sempre estão no meu apoio. Amanda, Carol Conter, Deise e Jezebel, vocês me inspiram, obrigada por tudo sempre.

"O que a literatura faz é o mesmo que acender um fósforo no campo no meio da noite. Um fósforo não ilumina quase nada, mas nos permite ver quanta escuridão existe ao redor."

William Faulkner

RESUMO

A preocupação com a vida útil das estruturas de concreto armado e os fatores que as afetam faz com que o estudo dos fenômenos que causam a degradação dessas estruturas sejam cada vez mais necessários. Inúmeras pesquisas apontam a corrosão das armaduras como um dos principais fatores de degradação das estruturas de concreto armado. Em ambientes urbanos, a carbonatação é uma das maiores causas responsáveis pela corrosão de armaduras. A NBR 6118 exige premissas, como o cobrimento da armadura, para garantir a proteção da estrutura no ambiente em que será empregada. O presente trabalho tem como objetivo a análise da influência da adição de dióxido de titânio nas profundidades de carbonatação em concretos brancos, e paralelamente, a análise da capacidade de autolimpeza. Para tal foram confeccionados cinco tipos de concretos empregando diferentes formas de tratamento: I – Sem adição de TiO_2 , II – Com adição de 10% de TiO_2 na massa do concreto, III – Camada superficial de argamassa com adição de 10% de TiO_2 , IV – Aspersão de solução aquosa de 10% de TiO_2 24 horas após a concretagem, , IV – Aspersão de solução aquosa de 10% de TiO_2 7 dias após a concretagem. Todas as amostras foram expostas a dois ambientes: natural e acelerado. Foram realizados dois ensaios: a medição da profundidade de carbonatação, e da capacidade de autolimpeza dos tratamentos empregados, com o auxílio de um espectrofotômetro. A partir dos resultados pode-se concluir que a adição de TiO_2 na massa do concreto não influencia nas profundidades de carbonatação e que a aspersão após 24 horas é a melhor opção para o emprego de TiO_2 em concretos no que diz respeito à autolimpeza. Desta forma, a aspersão após 24 horas se mostra a melhor e mais econômica alternativa de emprego do TiO_2 em concretos brancos a fim de torná-los autolimpantes.

Palavras-chave: concreto branco, carbonatação, dióxido de titânio, autolimpeza.

SUMÁRIO

1	Introdução	5
2	Métodos e materiais.....	13
2.1	Método de moldagem e exposição	13
2.2	Materiais utilizados.....	17
2.3	Métodos de caracterização dos concretos e argamassa	20
2.4	Método de análise da carbonatação	20
2.5	Método de análise da capacidade de autolimpeza	23
3	Apresentação e análise dos resultados	24
3.1	Caracterização dos concretos e da argamassa	24
3.2	Carbonatação.....	26
3.3	Ensaio colorimétrico.....	29
4	Conclusões	31
5	Referências bibliográficas.....	33

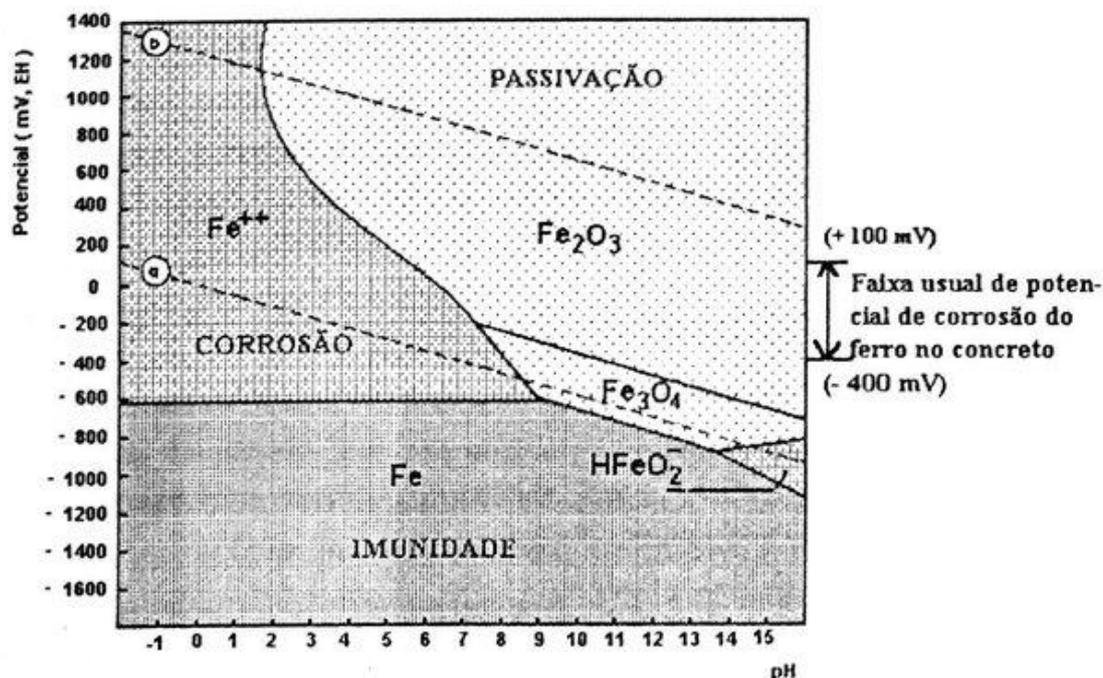
1 Introdução

Tendo em vista a atual e crescente preocupação em garantir a vida útil das estruturas de concreto armado, muito se tem explorado o conhecimento acerca da durabilidade dessas estruturas e dos fatores que contribuem ou afetam negativamente o desempenho das mesmas, como por exemplo a carbonatação. A NBR 15575 (ABNT, 2013) exige que as estruturas de concreto apresentem uma vida útil de projeto igual ou superior a 50 anos, e para tal, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece premissas a serem seguidas como o cobrimento mínimo das armaduras e a relação água/cimento a serem adotados conforme a agressividade dos ambientes de exposição a que essas estruturas serão expostas. Segundo NBR 15575 (ABNT, 2013) entende-se por vida útil o período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com o atendimento aos níveis de desempenho previstos. Diversos autores citam a corrosão das armaduras como um dos principais fatores de degradação das estruturas de concreto armado (CARMONA E MAREGA, 1988; MEHTA, 1993; DAL MOLIN, 1988; ARANHA, 1994; NINCE, 1996; ANDRADE, 1997; STEWART & ROSOWSKY, 1998; MENNUCCI, 2006; CATUSSO *et al.*, 2015; entre outros), com índices variando entre 27% a 64%.

Alguns fatores contribuem para que a deterioração do concreto se dê em períodos de tempo mais curtos, tais como: novas formulações de cimentos (KIRCHHEIM *et al.*, 2015) que atingem maiores resistências mesmo com elevadas relações água/cimento (o que resulta em concretos porosos), métodos de cálculo aprimorados que permitem o projeto de estruturas mais otimizadas e com seções menores, e o aumento dos níveis de poluição que resultam em ambientes de exposição mais agressivos (KULAKOWSKI, 2009). Segundo Tuutti (1982), o concreto oferece uma proteção física e química ao aço. A proteção física se dá através da camada de concreto que protege a armadura da exposição ao ambiente externo, enquanto a química é feita através do pH alcalino do concreto, que cria uma camada de passivação na superfície do metal e o protege da corrosão. No seu diagrama de equilíbrio potencial-pH para um sistema de Fe-H₂O a 25°C (Figura 1), Pourbaix (1974) determina em que condições o ferro, principal componente da liga de aço, está sujeito à corrosão.

A análise do diagrama permite a constatação de que o pH usualmente existente na água de poro do concreto, nas suas primeiras idades, oferece uma situação de passivação para a barra de aço que está em contato com este concreto. Desta forma, a corrosão nas barras de aço pode se dar por duas formas distintas: um ataque pontual à camada passivadora ou diminuição do pH do concreto em contato com a barra, que levaria à destruição da película passivadora.

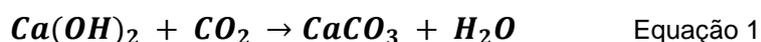
Figura 1 - Diagrama de Pourbaix para o sistema Fe-H₂O, a 25°C, delimitando os domínios de corrosão, passivação e imunidade.



(fonte: Pourbaix, 1974; modificado por Helene, 1996)

Segundo Helene (1993), uma das principais causas da corrosão nas armaduras devido à destruição da sua camada passivadora é a carbonatação, juntamente com a ação de íons de cloreto. Kirchheim (2003) afirma que a análise da carbonatação de concretos é um bom meio para se avaliar a durabilidade das estruturas de concreto sujeitas à corrosão de armaduras em ambientes urbanos. Isso ocorre porque, quando essas estruturas sofrem corrosão das barras de aço em decorrência da carbonatação do concreto, elas têm sua vida útil reduzida devido às consequências geradas na estabilidade global, segurança, estética e no aumento significativo dos custos de manutenção.

A carbonatação em concretos se dá pela reação dos álcalis presentes na pasta hidratada do concreto e o CO₂ presente no ambiente. Essas reações formam carbonato de cálcio (CaCO₃) e reduzem o pH do concreto, que em suas primeiras idades apresenta um caráter altamente alcalino, devido sua água intersticial que possui valores de pH entre 12 e 13, conforme Helene (1993). Essa elevada alcalinidade é resultado dos álcalis presentes no cimento (Na e K) e também da presença do hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂, que é liberado durante a hidratação dos principais compostos do cimento, os silicatos de cálcio, C₂S e C₃S. De maneira simplificada, as reações de carbonatação podem ser descritas da seguinte forma (TUUTTI, 1982; HELENE, 1993):



A entrada do CO₂ no concreto ocorre geralmente por difusão, e a reação começa na superfície externa dos elementos estruturais que estão em contato com a atmosfera e avança de maneira progressiva para o interior do concreto. Este fenômeno, segundo Helene (1993), forma duas zonas de pH muito distintas, sendo uma com pH muito próximo de 13 e a outra com valores próximos a 8. Assim que a reação acontece na região em que o concreto está em contato com a armadura ela é despassivada e, de acordo com Tuutti (1982), existindo umidade e oxigênio suficientes cria-se uma significativa diferença de potencial, gerando uma pilha galvânica, levando à corrosão do aço.

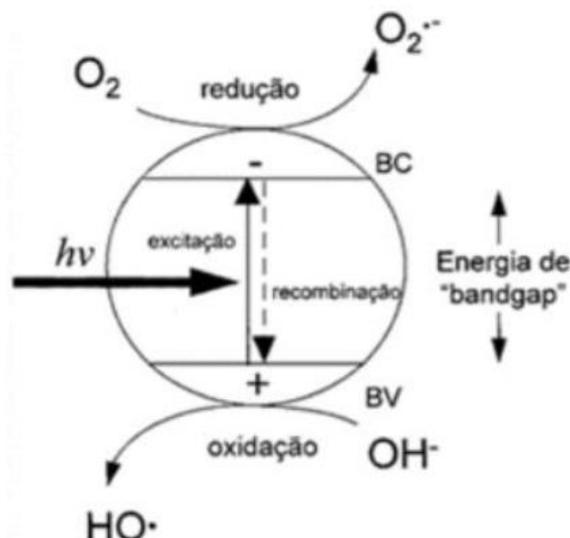
A velocidade com que a corrosão vai acontecer ou o tempo que a reação vai demorar até atingir a armadura do concreto são determinados por vários fatores como: a quantidade de CO₂ presente na atmosfera (que pode variar de 0,03% em ambientes rurais a 1,20% onde há tráfego pesado), a espessura da camada de cobrimento, a relação água/cimento, as propriedades físicas do concreto, as características químicas do cimento, consumo de cimento por m³ de concreto e condições ambientais como temperatura e umidade (KIRCHHEIM, 2003; SANTIS *et al.*, 2007; TORGAL *et al.*, 2012; JAMES *et al.*, 2019, entre outros).

O cimento Portland branco é um tipo de cimento que se destaca pela sua coloração, devido à utilização de matéria prima com baixos teores de óxido de ferro e manganês, e pelas condições especiais durante sua fabricação

(KIRCHHEIM, 2003). Assim como qualquer outro tipo de concreto estrutural, o concreto estrutural feito com cimento branco também necessita de cuidados quanto a sua durabilidade. Como é mais utilizado para obras com cunho arquitetônico, muitas vezes a atenção é dada apenas para sua aparência superficial, preocupando-se com a sujeira e estética da mesma. Tal preocupação com este tema é justificável, mas não só pelo fato de o concreto branco ser utilizado com o intuito de não ser necessária a aplicação de uma camada extra de revestimento, mantendo sua cor original. Deve-se acerrar o fato de que sujeira e manchas são manifestações patológicas que influem diretamente nos custos de manutenção e na durabilidade das edificações (CASARIN, 2019). Além disso, até hoje pouco se estudou quanto aos aspectos que influenciam a durabilidade dos concretos brancos, principalmente no Brasil, onde o cimento branco é mais utilizado para argamassas e revestimentos.

Sobre esse tema, muitas pesquisas recentes indicam o dióxido de titânio como um produto fotocatalisador ideal para a obtenção de superfícies autolimpantes, conforme a Tabela 1. A fotocatalise consiste num processo natural que ocorre com semicondutores, os quais possuem uma camada de valência incompleta e uma camada condutora. O deslocamento dos elétrons da camada de valência para a camada condutora devido à incidência de raios UV resulta na fotocatalise, que por sua vez origina dois fenômenos simultâneos: reação de oxirredução de substâncias adsorvidas na superfície e aumento da hidrofobicidade (redução do ângulo de contato da água com a superfície). Isso acontece nos semicondutores porque a camada de valência incompleta e a camada condutora são separadas por uma “band-gap” (Figura 2), uma lacuna compatível com a energia fornecida pelos raios UV (MARANHÃO, 2009).

Figura 2 - Esquema de oxirredução de semicondutores, BV = Banda de Valência e BC = Banda Condutora



(fonte: Maranhão, 2009)

Como o dióxido de titânio, principalmente na forma anatase, se mostra como um semicondutor de baixa toxicidade, com elevado poder fotocatalítico e com grandes reservas no mundo (MARANHÃO, 2009), sua adição em superfícies cimentícias é uma boa alternativa para a diminuição da sujeira e os manchamentos das estruturas e fachadas. Como ilustra a Figura 3, cria-se a ação de autolimpeza na superfície através da atividade fotocatalítica do dióxido de titânio (TiO_2), induzida pela presença da radiação ultravioleta e da água. Devido ao processo de hidrofília são formadas lâminas d'água ao invés de gotas na superfície, decorrentes do fato de que o ângulo de contato da água com a superfície fica próximo de 0° .

Figura 3 - Mecanismo de autolimpeza em superfícies com TiO_2 devido à fotocatalise.



(fonte: Maranhão, 2009)

Ao que diz respeito a argamassas de revestimento com cimento branco, pode-se verificar que existe uma grande quantidade de pesquisas já relacionadas ao uso do dióxido de titânio como substância fotocatalisadora buscando a ação de autolimpeza. Como se observa na Tabela 1, pesquisas que investigam o uso de TiO_2 em concreto são mais raras. Também se percebe que a investigação da carbonatação em concretos incorporados com dióxido de titânio é raríssima, sendo uma lacuna de pesquisa. Desta forma, este trabalho tem como objetivo principal analisar a influência do dióxido de titânio nas profundidades de carbonatação de concretos brancos, através de diferentes formas de aplicação (diretamente na massa, como camada superficial e com aspersões aplicadas em diferentes idades). De forma secundária, também foi analisada a capacidade de autolimpeza desses concretos comparando as diferentes formas de emprego do dióxido de titânio nas amostras.

Tabela 1 - Revisão bibliográfica sobre uso de TiO₂ em materiais cimentícios

Ano	Autor	Título	Objetivo	Metodologia	Conclusões
2000	Benedix <i>et al.</i>	Application of titanium dioxide photocatalysis to create self-cleaning building materials	Obter superfícies autolimpantes através do emprego do TiO ₂ em materiais de construção tradicionais.	Aplicação do TiO ₂ sobre vidros, azulejos, cerâmicos e plásticos.	Quando exposto à luz, o TiO ₂ decompõe graxas, sujeira e contaminantes orgânicos, permitindo que estes materiais sejam carregados pela ação da chuva que é intensificada pela superhidrofilicidade.
2009	Husken <i>et al.</i>	Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification	Avaliação das propriedades de purificação do ar em produtos de concreto fotocatalítico.	Teste de degradação do NO induzida por UV-A e orientada no padrão ISO 22197-1: 2007	Aumento da irradiância e da quantidade de TiO ₂ melhoram o desempenho da degradação do NO, enquanto o aumento da umidade reduz a degradação. Superfícies com maior rugosidade se mostram mais ativas que superfícies lisas.
2009	Pereira <i>et al.</i>	Argamassas aditivadas com dióxido de titânio: uma solução eficaz no combate aos graffitis	Análise da influência do teor de TiO ₂ e da rugosidade da superfície na eficácia da autolimpeza de argamassas.	Manchamento das amostras com tinta e exposição à luz que simulava a radiação solar com variação dos ângulos de inclinação das amostras e dos traços das argamassas	As argamassas com a superfície mais lisa apresentam menor eficácia de autolimpeza. Assim como aquelas que ficam na posição vertical.
2012	Cézar Augusto Casagrande	Estudo da incorporação de partículas de titânio em argamassas fotocatalíticas	Mostrar a viabilidade de se usar partículas de TiO ₂ como adição a argamassas cimentícias para fins fotocatalíticos e matéria-prima alternativa.	Caracterização por DRX, fluorescência de raios-X (FRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), distribuição de tamanho de partícula (DTP), potencial Zeta (PZ) e área específica (BET). Ensaios de degradação de NOx nas titânias que foram incorporadas nas argamassas.	Degussa P25 apresentou os melhores resultados de degradação de NOx consumindo 100% da concentração de NOx do fluxo gasoso. Condições como umidade relativa, fluxo gasoso e intensidade de radiação se fazem relevantes quando se trata da eficiência na fotocatalise.
2012	Nuno Rafael Marinho Gomes	Estudo de argamassas eco eficientes	Desenvolver uma argamassa de revestimento com propriedades multifuncionais como a capacidade fotocatalítica, a função autolimpante e o melhoramento da capacidade térmica.	Aspersão de uma solução aquosa de nanopartículas de TiO ₂ com concentração de 10 g/L e pH de 3 e de 8 sobre a superfície da argamassa.	Inclusão das nanopartículas de TiO ₂ de forma aspergida não produz variações significativas nas propriedades físicas e mecânicas. A aspersão gera fotodegradação elevada, porém ensaios térmicos não indicam melhoras nas suas capacidades térmicas.
2013	Lorenzo Graziani <i>et al.</i>	Durability of self-cleaning TiO ₂ coatings on fired clay brick façades: effects of UV exposure and wet & dry cycles	Investigar as propriedades fotocatalíticas do TiO ₂ aplicado em superfícies de tijolos de barro, tanto após a deposição quanto após o processo de envelhecimento.	Caracterização do TiO ₂ , análise de sua morfologia, molhabilidade e eficiência de autolimpeza antes do teste de durabilidade. Avaliação da capacidade de autolimpeza utilizando um colorímetro portátil.	A eficiência fotocatalítica das amostras de tijolos de argila tratadas com TiO ₂ é sete vezes maior que as amostras não tratadas e se mostra estável após o envelhecimento.

continua...

Ano	Autor	Título	Objetivo	Metodologia	Conclusões
2013	Smits <i>et al.</i>	Effect of process parameters on the photocatalytic soot degradation on self-cleaning cementitious materials	Análise da eficiência da degradação fotocatalítica de fuligem.	Manchamento das amostras com fuligem, exposição a lâmpadas para teste sob irradiação UV-A e realização de medidas fotométricas para análise do desempenho fotocatalítico das amostras.	As concentrações de fuligem que ocorrem em situações do mundo real não inibem o fotocatalisador a ser ativado pela luz. A eficiência fotônica aumenta para relações água/cimento menores.
2015	Gabriela Cortes Austria	Argamassa autolimpante para revestimento e fachadas: o efeito das propriedades fotocatalíticas de dióxido de titânio (TiO ₂)	Verificar a obtenção de superfícies autolimpantes a partir da adição de TiO ₂ em revestimentos de argamassa branca.	Argamassas com diferentes traços e teores de TiO ₂ , aspergidas com diferentes agentes manchantes e expostas a condições ambientais urbanas. Realização de leituras com espectrofotômetro portátil.	Manchas que geram uma película dificultam o efeito autolimpante.
2016	João Pedro Marins Treviso	Avaliação da eficiência de autolimpeza em argamassas e pastas contendo TiO ₂ expostas ao microclima urbano	Avaliar a capacidade autolimpante de argamassas e coberturas fotocatalíticas de c expostas a diferentes configurações de posicionamento no microclima urbano da cidade de Porto Alegre	Amostras cobertas com pasta ou argamassa contendo diferentes teores de TiO ₂ , manchadas com Rodamina B e lodo de cinzas de queima de eucalipto expostas sob diferentes condições de posicionamento e inclinação. Leituras cromáticas (sistema CIELab)	Para a Rodamina B, a degradação do corante se mostrou mais eficiente nas argamassas com maiores teores de TiO ₂ e nos posicionamentos com maior incidência de radiação solar.
2016	Fernanda Lamego Guerra	Avaliação da eficiência do TiO ₂ contra fungos filamentosos normalmente encontrados em argamassas típicas de edificações históricas	Análise das argamassas típicas de revestimento interiores de edificações históricas, principalmente do final do século XIX, início do XX, com relação ao fenômeno da biodeterioração por microrganismos, ênfase em fungos filamentosos. Eficiência do fotocatalisador TiO ₂ contra isolados fúngicos selecionados.	Confecção de amostras de argamassas de revestimento, com propriedades semelhantes às empregues neste período, inoculação com os fungos isolados e identificados como os mais ativos. Avaliação da aplicação superficial de TiO ₂ quanto à sua eficiência autolimpante e biocida em condições laboratoriais e expostas à radiação UVA.	O fotocatalisador provocou um comportamento diferenciado entre os diferentes isolados analisados, demonstrando maior efetividade contra o fungo <i>Aspergillus niger</i> e quando exposto a períodos prolongados de luz UV-A (4h/dia).
2017	Cristiane do Nascimento Fernandes	Estudo sobre a incorporação de nanopartículas de dióxido de titânio em argamassas fotocatalíticas	Verificar o efeito fotocatalítico do TiO ₂ em argamassas, com o intuito de promover a degradação do dióxido de enxofre (SO ₂),	Exposição em câmara de SO ₂ (gás poluente), para envelhecimento acelerado, amostras foram umedecidas e expostas à radiação ultravioleta, para verificação da eficiência do TiO ₂ quanto à degradação de SO ₂ . Utilizou-se as técnicas de MEV/EDS e Infravermelho com Transformada de Fourier.	Argamassas com maior teor de TiO ₂ foram as que apresentaram melhores propriedades físicas e também maior eficiência na liberação do SO ₂ das argamassas contaminadas.

continua...

Ano	Autor	Título	Objetivo	Metodologia	Conclusões
2019	Roberta Picanço Casarin	Análise da eficiência da ação autolimpante em diferentes tipos de acabamentos superficiais de argamassas com adição de TiO_2	Investigar a influência de diferentes acabamentos superficiais em argamassas com TiO_2 , em adições de 5% e 10% sob a massa de cimento.	Exposição das amostras com manchamento (fuligem, cinza da queima de eucalipto e Rodamina B) em câmaras de intemperismo e ambiente natural com inclinação de 45° e 90° . Medições de cor por espectrofotometria.	A adição de 10% de TiO_2 produz melhores resultados na eficiência da autolimpeza, o acabamento superficial friccionado apresenta um valor mais elevado de mudança de cor, e a inclinação de 45° é a mais eficiente no ambiente urbano.

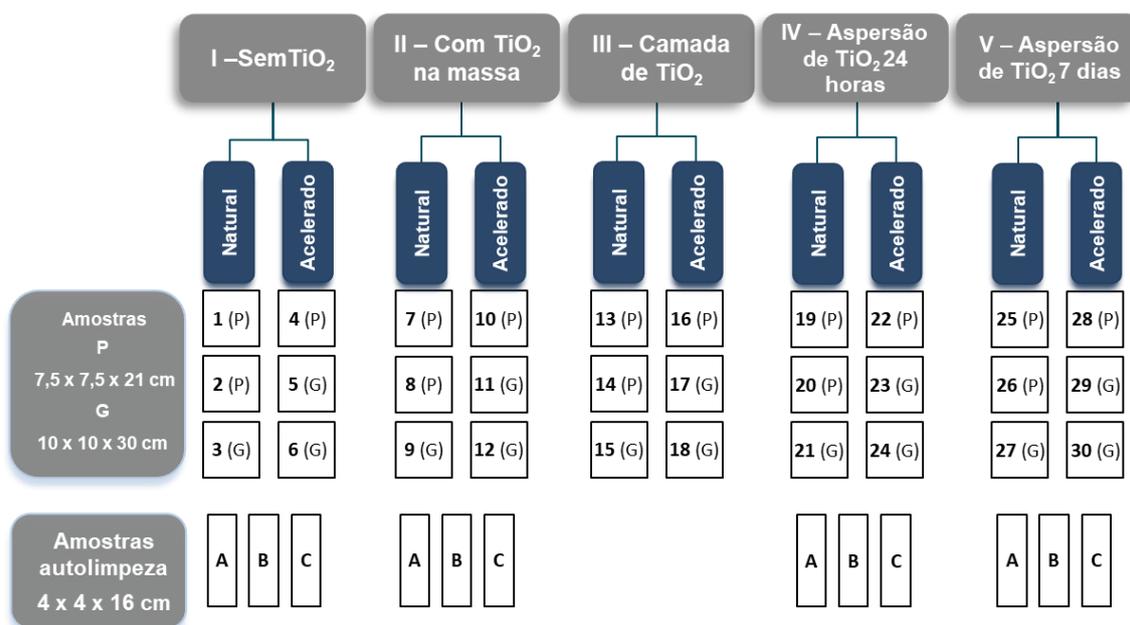
(fonte: elaborada pela autora)

2 Métodos e materiais

2.1 Método de moldagem e exposição

Para a realização das análises foram confeccionados corpos de prova com cinco formas diferentes de incorporação de dióxido de titânio nomeados conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Esquema das amostras e ambientes de exposição.



(fonte: elaborado pela autora)

Desta forma, aplicou-se o mesmo traço para todos os corpos de prova, que foi o de um concreto convencional de cimento:areia:brita de 1:3,2:3,3 (em massa de materiais secos). Foram realizadas cinco betonadas e, na 2ª betonada, referente aos corpos de prova do tipo II, foi utilizado o mesmo traço, porém com 10% de TiO_2 . Por se tratar de um material nanométrico, o dióxido de titânio se aglomera facilmente, então optou-se por fazer sua dispersão na água de amassamento do concreto com o auxílio de um misturador de argamassa conforme Figura 5.

Figura 5 - Dispersão do TiO_2 com auxílio de um misturador de argamassa.



(fonte: autora)

Foi fixada uma relação água/cimento igual a 0,65 (limite permitido pela norma NBR 6118) com a finalidade de reproduzir um concreto bastante poroso, logo, mais susceptível à penetração do CO_2 , a fim de atingir profundidades de carbonatação significativas em um intervalo de tempo menor.

Os corpos de prova foram expostos a dois ambientes: natural e câmara acelerada de CO_2 . O ambiente natural consiste no topo de um prédio localizado na região urbana e central de Porto Alegre, durante o período de outubro a dezembro, onde os exemplares estavam expostos a todas intempéries, porém isolados de qualquer interação com a população local (Figura 6). Já a câmara

acelerada consiste em um ambiente controlado, onde a concentração de CO₂ é mantida igual a 5%. Para cada tipo de emprego do dióxido de titânio foram moldados 3 exemplares por ambiente de exposição, totalizando assim 30 corpos de prova distribuídos igualmente entre ambiente natural e câmara acelerada. Por questões de disponibilidade de fôrmas prismáticas os corpos de prova foram moldados em dois tamanhos distintos. Desta forma, 15 exemplares possuíam suas dimensões iguais a de 10 x 10 x 35 cm, enquanto os outros 15 possuíam 7 x 7 x 21 cm. Como cada tipo de corpo de prova possuía 3 exemplares do tamanho menor e 3 do tamanho maior, optou-se por expor 2 grandes e 1 pequeno na câmara acelerada, enquanto no ambiente natural se expôs 1 grande e 2 pequenos, conforme Figura 4. Tal escolha justifica-se pelo fato de se esperar que os exemplares expostos à câmara acelerada apresentem maiores profundidades de carbonatação que os expostos ao ambiente natural, no mesmo intervalo de tempo de exposição.

Figura 6 - Corpos de prova em ambiente natural.



(fonte: autora)

A fim de garantir a cor do concreto o mais próximo do branco possível, as fôrmas foram forradas com plástico filme ao invés de utilizar-se desmoldante convencional. Os concretos do tipo III receberam uma camada de argamassa com adição de dióxido de titânio no fundo da forma previamente ao recebimento

do concreto. Esta camada possuía uma espessura 5 mm e o traço empregado foi 1:3,89 (cimento:areia, em massa de materiais secos) com adição de dióxido de titânio igual a 10% da massa de cimento empregado e relação água/cimento de 1,09. A argamassa foi moldada conforme os procedimentos descritos na NBR 7215 (ABNT, 2019). Todos os corpos de prova foram moldados respeitando os critérios estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015), exceto os do tipo III que antes de colocar o concreto na fôrma receberam a camada de argamassa. A escolha de se estudar essa forma de aplicação do dióxido titânio é justificada pela busca da redução do consumo de material, visto que no Brasil os preços do TiO_2 ainda são bem elevados (chegando a ser 1250% mais caro que o cimento), bem como pelo fato de somente a camada superficial ser efetiva na autolimpeza. Desta forma, seria empregada apenas a quantidade de material necessária para esta camada superficial, representada pela argamassa, ao invés da adição em toda a massa do concreto, onde o material não exerceria sua função fotocatalítica, pois esta ocorre apenas na superfície que se encontra em contato com a radiação ultravioleta e a água.

Adicionalmente foram moldados corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm para caracterização do concreto quanto a sua resistência à compressão aos 28 dias (um exemplar por betonada). Também foram confeccionados 3 exemplares com dimensões iguais a 4 x 4 x 16 cm para cada tratamento aplicado (exceto tipo III) para realização das análises de autolimpeza após manchamento. Não foram moldados corpos de prova do tipo III por dois motivos: as dimensões das fôrmas dificultariam a execução da camada de TiO_2 (que será explicada em seguida) e porque essa camada consistia em uma argamassa usual com 10% de TiO_2 , visto que este tema já foi bastante estudado e o presente estudo é focado em concreto. Optou-se por não se analisar essas amostras quanto à capacidade de autolimpeza.

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e levados para câmara úmida para cura, exceto os exemplares do tipo IV que receberam aspersão de dióxido de titânio e foram levados para cura apenas 24 horas após a aspersão. O mesmo ocorreu com os exemplares do tipo V, que aos 7 dias de cura receberam aspersão de TiO_2 e foram expostos ao ambiente natural apenas 24 horas após esse procedimento, 8 dias após a moldagem. A aspersão de dióxido de titânio consistia em uma solução de água com uma adição do material

em 10% sobre a massa de água com o auxílio de um misturador elétrico modelo Makita RT0700C adaptado. Essa solução aquosa foi aplicada com um aspersor elétrico Vonder PEV 400W em todas as faces dos corpos de prova, de forma que buscou-se sempre manter a distância e velocidade de aplicação constantes para garantir que as amostras tivessem a aplicação mais homogênea possível. O estudo do emprego do dióxido de titânio através de aspersões é justificado, novamente, pela busca de uma alternativa com menor custo e maior praticidade para a obtenção de uma superfície autolimpante. Neste caso, buscou-se analisar se há diferença na idade em que o concreto recebe a aspersão.

Os demais exemplares, ao atingirem 7 dias de cura, foram expostos ao ambiente natural e à câmara acelerada de carbonatação, enquanto os exemplares do tipo V só foram expostos no oitavo dia devido a aplicação da aspersão. Entretanto, constatou-se que os exemplares estavam influenciando a umidade interna da câmara, fazendo com que ela atingisse valores superiores a 90%, valor este que, segundo a literatura (HELENE, 1993; KIRCHHEIM, 2003; ŠAVIJA & LUKOVIC, 2016; JAMES *et al.*, 2019) não favorece a carbonatação. Então optou-se por colocar esses exemplares em uma estufa a 40°C por 5 dias. E posteriormente eles foram devolvidos à câmara e não voltaram a influenciar sua umidade. Os corpos de prova expostos ao ambiente natural estavam sujeitos a todas intempéries, conforme mostra a Figura 6, na região central de Porto Alegre, e em ambos os ambientes, natural e acelerado, preocupou-se em garantir uma distância mínima de 3 cm entre as faces de um exemplar e outro para garantir o contato de todas com a atmosfera do ambiente.

2.2 Materiais utilizados

A caracterização dos materiais utilizados é apresentada nas Tabelas 2, 3 e 4 (cimento, areia e brita). O agregado graúdo empregado é de origem basáltica, enquanto a areia é quartzosa. A água de amassamento foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Porto Alegre.

Tabela 2 - Caracterização cimento branco.

Cimento branco	
Tipo	CEM I 52.5 R
Classe de força	52.5 R
C ₃ A	0,05
Teor alcalino	0.2 - 0.3%
SO ₃	1.8 - 2.3%
Cloreto	0 - 0.02%
Densidade específica	3120 - 3180
Densidade aparente	1100,00

(fonte: fornecido pelo fabricante)

Tabela 3 - Caracterização agregado miúdo.

Tipo de caracterização	Método de ensaio	Resultados		
		Abertura da peneira ABNT (mm)	Porcentagem retida (%)	
			Individual	Acumulada
Composição granulométrica	NBR NM 248/2003	4,75	1	1
		2,36	16	17
		1,18	43	60
		600	16	76
		300	10	86
		150	5	91
		fundo	9	100
Dimensão máxima característica	NBR NM 248/2003	4,75 mm		
Módulo de finura	NBR NM 248/2003	3,34		

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 4 - Caracterização agregado graúdo.

Tipo de caracterização	Método de ensaio	Resultados		
		Abertura da peneira ABNT (mm)	Porcentagem retida (%)	
			Individual	Acumulada
Composição granulométrica	NBR NM 248/2003	12,5	0	0
		9,5	6	6
		6,3	57	63
		4,75	33	96
		2,36	4	100
		1,18	0	100
		600	0	100
		300	0	100
		150	0	100
		fundo	0	100
Dimensão máxima característica	NBR NM 248/2003		12,5 mm	
Módulo de finura	NBR NM 248/2003		6,02	

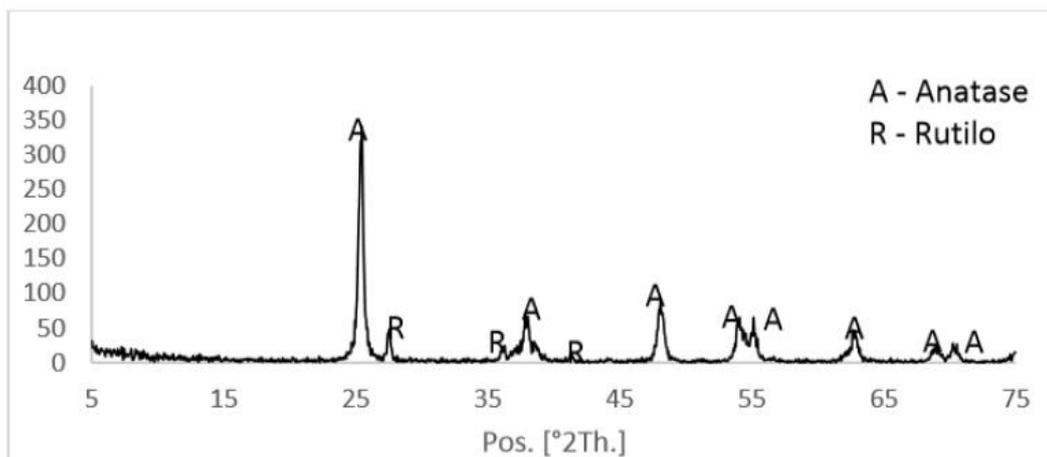
(fonte: elaborada pela autora)

O TiO_2 foi o mesmo utilizado em outras pesquisas (do grupo NORIE/LAMTAC; GUERRA, 2016; CASARIN 2019). Sua caracterização física e química está apresentada na Tabela 5 e Figura 7. Optou-se pela forma anatase por ser a fase mais estável, por ser citada em alguns estudos como melhor alternativa para biocidas convencionais por ser não-tóxica (CASARIN, 2019), além de ser a forma com maior efeito fotocatalítico (FONSECA, 2009).

Tabela 5 - Caracterização física e química do TiO_2 utilizado.

TiO_2		
Características	Unidade	Valor
Diâmetro médio das partículas	μm	21
Área específica superficial (EM ISO 9277, modificada)	m^2/g	35-65
Valor de pH (EN ISO 787-9, modificada)	-	3.5-4.5
Conteúdo de HCl (EN ISO 3262-20, modificada)	%	$\leq 0,300$
Densidade compactada (DIN EM ISO 787)	g/L	130
Proporção anatase/rutilo	-	80/20

(fonte: informação do fabricante (2015); Casarin. 2019)

Figura 7 - Análise DRX do TiO₂.

(fonte: Guerra. 2018)

2.3 Métodos de caracterização dos concretos e argamassa

Foram realizados ensaios de caracterização no estado fresco tanto para a argamassa quanto para o concreto. Enquanto ensaios de caracterização no estado endurecido apenas no concreto.

2.1.1. Ensaios no estado fresco

Os ensaios realizados e suas respectivas normas de execução foram:

- a) Índice de consistência do concreto – NBR NM 67 (1998)
- b) Índice de consistência da argamassa - NBR 13276 (2005)

2.1.2. Ensaios no estado endurecido

O ensaio realizado e sua respectiva norma de execução foram:

- a) Resistência à compressão do concreto – NBR 5739 (2018)

2.4 Método de análise da carbonatação

O procedimento de medição das profundidades de carbonatação empregado foi o mesmo que utilizou Catusso *et al.* (2015), que consiste em retirar os corpos de prova dos ambientes de exposição e levá-los ao laboratório onde, com o auxílio de uma prensa hidráulica, retira-se uma fatia de cada

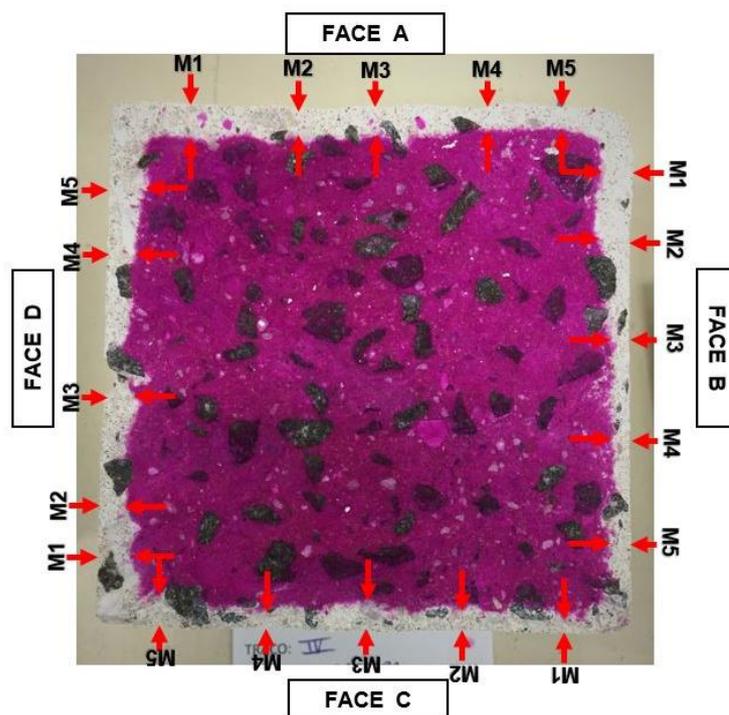
exemplar, conforme Figura 8. Posteriormente, as partes internas de cada fatia recebem uma aspensão de fenolftaleína em solução alcoólica 1%, que ao reagir com a amostra de concreto indica onde o pH foi reduzido para valores próximos a 8,5. Essas áreas se mostram incolores, enquanto as áreas em que o pH continua com valores superiores a 10 reagem com a fenolftaleína e adquirem coloração rosada conforme pode-se constatar na Figura 9.

Figura 8 - Procedimento para retirada de fatias das amostras.



(fonte: autora)

Figura 9 - Amostra aspergida com fenolftaleína com indicações de onde foram feitas as medições das profundidades de carbonatação em cada face.



(fonte: autora)

Com o auxílio de um paquímetro digital são coletadas 5 medidas das profundidades de carbonatação de cada face da amostra, conforme indicado na Figura 9, exceto das amostras do tipo III, nestas optou-se por realizar as medidas apenas na face que recebeu a camada de argamassa, visto que as demais faces não haviam recebido tratamento algum. Nas amostras do tipo III, também optou-se por realizar as medidas considerando a camada de argamassa como parte integrante do elemento estrutural, logo, foi considerada como camada de cobertura e as profundidades encontradas se referem à distância da superfície que esta em contato com o ambiente até a zona de pH integro indicada pela coloração rosa da fenolftaleína. Durante a coleta desses valores buscava-se evitar os locais onde os agregados e picos discrepantes influenciariam a média da profundidade de carbonatação de cada amostra. A parte remanescente dos corpos de prova era devidamente devolvida as suas condições de exposição (ambiente natural e câmara de carbonatação) até a próxima data de coleta de valores das profundidades de carbonatação, quando o processo se repetia novamente. Estabeleceu-se uma periodicidade de uma vez por semana a partir da primeira medida.

2.5 Método de análise da capacidade de autolimpeza

Paralelamente à análise das profundidades de carbonatação realizou-se a análise da capacidade de autolimpeza dos corpos de prova. Para isso realizou-se o manchamento de uma das faces dos corpos de prova de 4 x 4 x 16 cm com cinza da queima de eucalipto, que foram expostas ao mesmo ambiente natural que as amostras de carbonatação com uma inclinação de 90°, a fim de reproduzir a inclinação que as fachadas geralmente possuem. Para a realização do manchamento adotou-se um procedimento similar ao de Casarin (2019)(adaptado de De La Rosa *et. al.* (2017)), calculou-se a área de uma face e então chegou-se ao valor de 0,9 g de cinza de eucalipto a ser empregado em cada amostra (1,50 mg/cm²). Essa cinza foi depositada sobre a face a ser manchada, com o auxílio de um pincel foi espalhada da maneira mais uniforme possível, então a uma distância de aproximadamente 20 cm realizou-se borrifadas de água em um volume de 2,5 mL ao longo de toda face a ser manchada. Em seguida, novamente com o auxílio do pincel, espalhou-se a mistura da maneira mais uniforme possível (Figura 10).

Figura 10 - Procedimento de manchamento da amostra.



(fonte: autora)

O mesmo procedimento foi executado em todos os exemplares, e após 24 horas as amostras foram devidamente identificadas e realizou-se a medida zero da cor dos corpos de prova com o auxílio de um espectrofotômetro portátil modelo Konica Minolta CM 2500d. Após este procedimento, as amostras foram levadas ao ambiente natural onde ficaram expostas. Com a periodicidade de

uma vez por semana, as amostras eram levadas ao laboratório onde realizava-se uma nova medição.

Para a realização da medição foi confeccionado um molde com cinco pontos igualmente distribuídos ao longo da superfície central da amostra. Desta forma, garantiu-se que as coletas eram sempre referentes ao mesmo ponto da amostra. Com essas medições periódicas busca-se obter as coordenadas cromáticas da cor de cada amostra através do sistema CIELab. Nesse sistema a cor é representada por três valores, e a sua variação no tempo é a variável de resposta obtida através da seguinte equação:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

ΔE = variação da cor no tempo;

$\Delta L^* = L^*_t - L^*_{t0}$, sendo L^* = luminosidade ou brilho, que varia de 0 (preto) a 100 (branco);

$\Delta a^* = a^*_t - a^*_{t0}$, sendo a^* = coordenada cromática que varia de verde (-a) a vermelho (+a);

E $\Delta b^* = b^*_t - b^*_{t0}$, sendo b^* = coordenada cromática que varia de azul (-b) a amarelo (+b).

3 Apresentação e análise dos resultados

3.1 Caracterização dos concretos e da argamassa

Os resultados encontrados através dos ensaios previstos no item 2.3. são apresentados na Tabela 6, estado fresco, e Tabela 7, estado endurecido.

Tabela 6 - Abatimento dos concretos e índice de consistência da argamassa

Caracterização estado fresco		
	Concreto	Argamassa
Betonada	Abatimento (mm)	Índice de consistência (mm)
1	24	
2	11,5	-
3	21	303
4	21	-
5	20	-

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 7 - Resistência à compressão dos concretos.

Caracterização estado endurecido		
Resistencia à compressão - concreto		
Betonada	kN	MPa
1	237,50	30,24
2	226,33	28,82
3	237,70	30,27
4	252,80	32,18
5	237,20	30,20

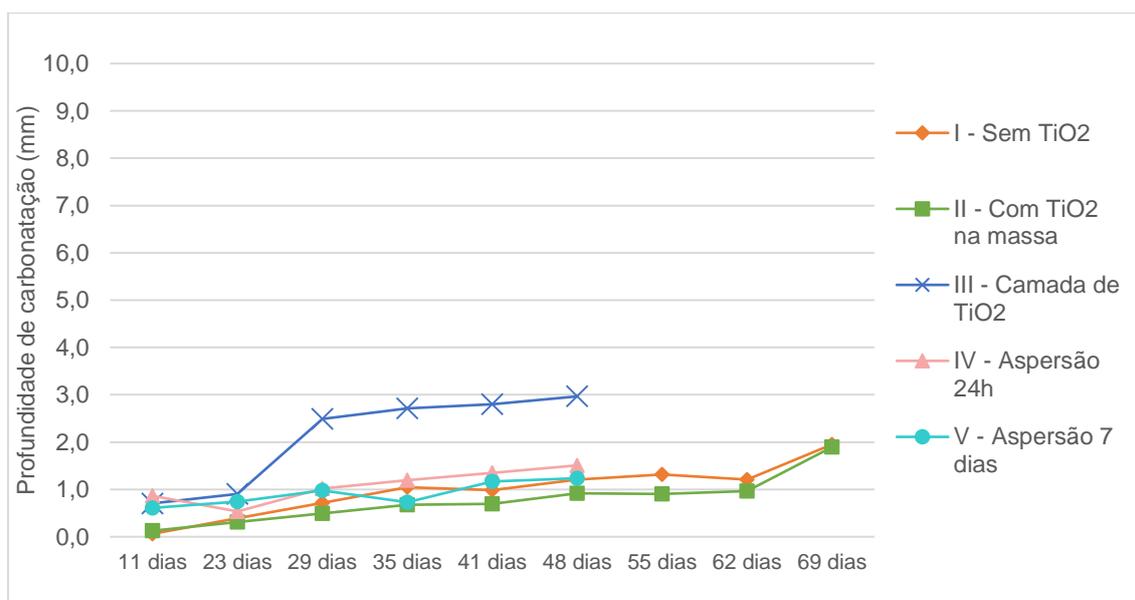
(fonte: elaborada pela autora)

É possível perceber que os abatimentos foram muito semelhantes, exceto o do tipo II, essa diferença se deve ao fato de que nesta betonada não foi feito o uso de aditivos, ao contrário das demais. Devido a quantidade de amostras reduzida possivelmente as diferenças de resistência apresentadas são em decorrência da variabilidade do ensaio. Porém, é possível perceber que os corpos de prova referentes à betonada que continha o dióxido de titânio adicionado na massa apresentaram uma resistência menor quando comparado aos demais, esta mesma constatação é feita por diversos autores ao empregar o mesmo teor de TiO_2 em argamassas (MELO, 2011; TREVISO, 2016; CASARIN, 2019). Em virtude da superfície específica do TiO_2 , também é possível verificar um valor significativamente menor no abatimento desse concreto, fator que pode ter influenciado nas diferenças de resistências.

3.2 Carbonatação

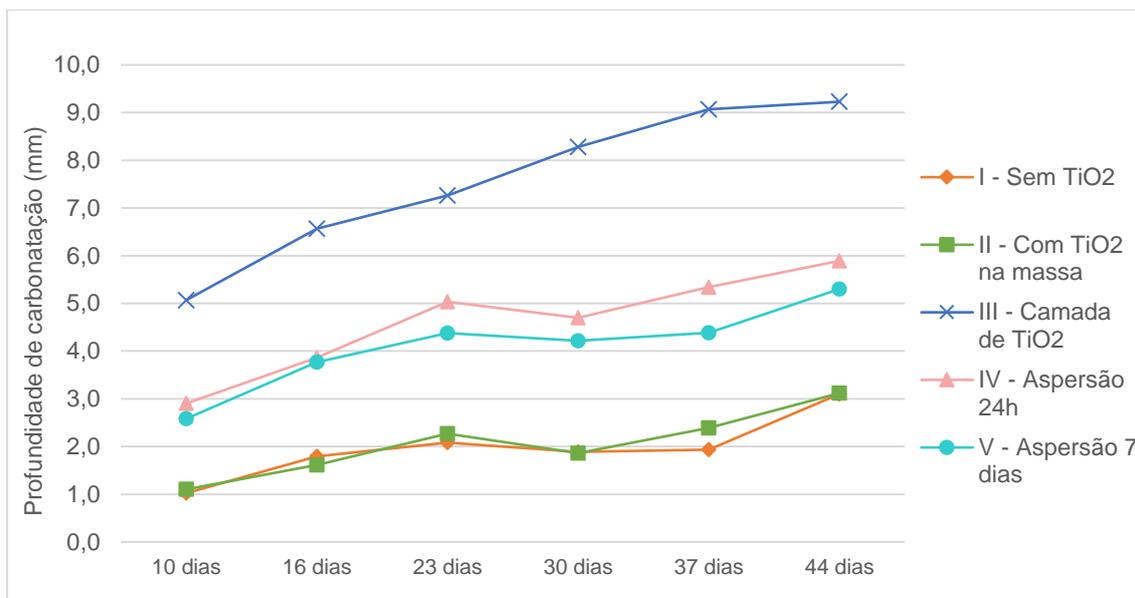
Após a coleta das profundidades de carbonatação das amostras, conforme descrito no item 2.4, os valores foram inseridos no software Excel para análise. Os gráficos gerados a partir desta análise estão ilustrados nas Figuras 11 e 12. Pode-se perceber facilmente a diferença de profundidades entre as amostras expostas ao ambiente natural e ao acelerado. Para a mesma idade de exposição, as amostras que se encontravam na câmara de carbonatação apresentaram profundidades no mínimo duas vezes maiores que as expostas ao ambiente urbano. Tal comportamento já era esperado, visto que o ambiente da câmara apresenta uma concentração de CO₂ muito maior que ambientes urbanos. De maneira geral, o comportamento da carbonatação, representado pelas medições de profundidades, possui mesma tendência de comportamento no ambiente natural e no acelerado, indicando que os valores encontrados através da câmara de carbonatação acelerada são confiáveis. Além de ser uma forma de comparar os desempenhos dos tipos de concretos empregados, estes resultados permitem um análise quanto à previsão de vida útil das estruturas, visto que a NBR 6118 exige uma cobertura mínima das armaduras conforme o ambiente de exposição visando a proteção de suas armaduras.

Figura 11 - Profundidades carbonatação amostras expostas ao ambiente natural.



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 12 - Profundidades carbonatação amostras expostas ao ambiente acelerado.



(fonte: elaborado pela autora)

Ao se observar as profundidades encontradas para as amostras do tipo I – Sem adição de TiO₂ e do tipo II – Com TiO₂ na massa nota-se que elas possuem valores muito próximos, indicando que a adição do dióxido de titânio não influenciou visivelmente a carbonatação destes concretos. Hasebe & Edahiro (2013) descrevem um comportamento semelhante para argamassas, e constataram que adições de até 10% de TiO₂ não influenciavam nas profundidades de carbonatação de argamassas, quando comparadas com amostras que não possuíam adição alguma do material. Devido à escassez de pesquisas voltadas à adição em concretos, pode-se deduzir que estes apresentam o mesmo comportamento das argamassas.

As maiores profundidades são encontradas para as amostras do tipo III – Camada de TiO₂. Tal fato é justificado principalmente pela elevada relação água/cimento que a argamassa empregada na camada aplicada possuía, o que gerou uma região muito mais porosa e susceptível à ação do CO₂. Silva (2002) descreve o mesmo comportamento ao comparar profundidades de carbonatação em concretos e argamassas, fato que, segundo a autora, se dava pela eficiência da composição ideal dos grãos do concreto. Kulakowski (2002) constatou que para relações água/cimento menores que 0,40 a diferença de profundidades não é tão acentuada, pois com o refinamento da matriz de poros, devido ao menor teor de água, a porosidade das argamassas fica muito próxima à do concreto.

Enquanto para relações acima de 0,40 essa diferença de profundidade aumenta não só devido a porosidade da argamassa ser maior, como também pelo fato de que a presença de agregados graúdos no concreto diminui a área sujeita a poros permeáveis. Ao que diz respeito a concretos com incorporação de camada de dióxido de titânio, Bogutyn *et. al.* (2015) encontraram resultados muito semelhantes, onde a face da amostra que possuía uma camada de argamassa com adição de TiO_2 apresentou profundidades muito maiores do que a que não possuía o material. Os autores sugerem que essa carbonatação acelerada possa ser causada pelo aumento das concentrações de CO_2 próximo à superfície. Esse aumento aconteceria pois o CO_2 é um subproduto da ação fotocatalítica gerada por essa camada que contem dióxido de titânio.

Ao se analisar os gráficos também é possível notar que as amostras do tipo IV – Aspersão 24h e V – Aspersão 7 dias apresentam profundidades semelhantes. Porém as amostras do tipo V se mostram levemente menos susceptíveis a maiores profundidades de carbonatação. Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato de estas amostras terem recebido a aspersão apenas aos 7 dias e em seguida foram expostas aos ambientes, onde a solução altamente saturada de TiO_2 secou e originou uma espécie de barreira física formada pelo pó do material. Ao contrário, os corpos de prova do tipo IV, que receberam, logo após serem desmoldados, a aspersão e ainda passaram pela cura de 7 dias na câmara úmida, obtiveram uma espécie de película formada pela aspersão que pode ter se perdido pela presença da água na atmosfera. Além do fato de que, por se tratarem de concretos com apenas 24 horas de idade, parte das reações de hidratação do cimento não tinham acontecido, o que pode ter possibilitado uma espécie de incorporação do TiO_2 aspergido na superfície. A solução de dióxido de titânio aplicada nestas amostras também, possivelmente, causa um aumento da concentração de CO_2 na superfície devido a ação fotocatalítica. Justificando, assim, as profundidades maiores quando comparados com os concretos do tipo I e II,

Foram isoladas todas as profundidades coletadas na primeira e última medição realizadas nos corpos de prova, totalizando 600 valores em cada. Esses dados receberam o tratamento estatístico por análise de variância (ANOVA), utilizando o *software* Statistica 7, a um nível de confiança de 95%. Foi realizada a análise dos seguintes fatores controlados: ambiente (natural e acelerado) e

tratamentos empregados nas amostras (I, II, III, IV e V). O resumo da análise dos dados é apresentado na Tabela 8. É possível verificar que os dois fatores analisados exerceram influência significativa nas profundidades de carbonatação, bem como a interação entre os tipos de tratamento.

Tabela 8 - Análise de variância geral por ANOVA.

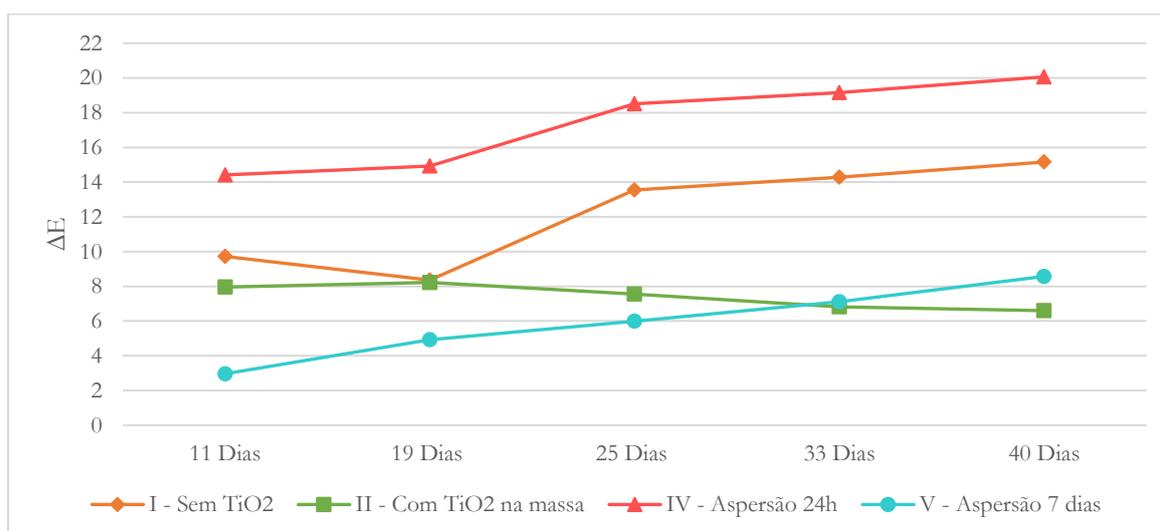
	Soma Quadrada	Graus de Liberdade	Média Quadrada	Teste F	Probabilidade	Influência S.
Tratamento	460,755	4	115,189	66,162	0,00	Sim
Exposição	879,331	1	879,331	505,068	0,00	Sim
Tratamento*Exposição	276,539	4	69,135	39,709	0,00	Sim
Erro	1027,200	590	1,741			

(fonte: elaborada pela autora)

3.3 Ensaio colorimétrico

Após a medição periódica das cores, conforme descrito no item 2.5, com o auxílio do *software* Excel chegou-se aos valores médios de variação de cor (ΔE) de cada amostra. Esses valores são apresentados na Figura 13.

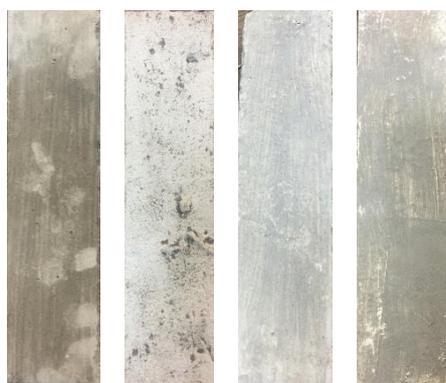
Figura 13 - Variação da cor (ΔE) das amostras.



(fonte: elaborado pela autora)

É possível perceber que todas as amostras atingiram valores maiores que 5, o que para Mokrzycki e Tatol (2011), significa uma mudança visível de cor, caracterizando assim, um resultado significativo de autolimpeza. Apesar de ter TiO_2 incorporado em sua massa, a amostra do tipo II mostrou pior desempenho quando comparada até mesmo com a amostra que não possuía nenhum tipo de adição de TiO_2 . Tal fato pode ser explicado pela rugosidade que a amostra possuía em sua superfície quando comparada às demais, conforme pode ser visto na Figura 13. Segundo Casarin (2019), superfícies mais rugosas apresentam maior dificuldade de autolimpeza, o que justificaria o baixo desempenho dessas amostras. Entretanto, vale salientar que as amostras possuíam rugosidades muito diferentes, logo, a comparação entre elas se mostra pouco elucidativa neste aspecto. Tal variabilidade de rugosidade é explicada pelo fato de se ter realizado o manchamento na superfície em que ficou em contato com o ambiente e não com a fôrma.

Figura 14 – Amostras tipo I, II, IV e V, (a) dia 1 manchamento e (b) 30 dias após manchamento.



(a)



(b)

(fonte: autora)

Acredita-se que o bom desempenho das amostras IV se deve ao fato de que ao serem manchadas não formaram uma película tão significativa da pasta constituída pelo TiO_2 aderido na superfície e a lama empregada para o manchamento. Ao contrário das amostras do tipo V que receberam aspersão aos 7 dias e não voltaram para a cura úmida, desenvolvendo assim uma película espessa e significativa de TiO_2 em pó, que ao entrar em contato com as cinzas e a água no processo de manchamento formaram uma espécie de pasta que pigmentou a amostra consideravelmente. Acredita-se que as amostras do tipo IV, ao serem expostas à umidade da câmara onde foram curadas após a aspersão, e por se tratarem de amostras de concreto onde o cimento ainda não estava completamente hidratado ao receber a aspersão, conseguiram absorver ou incorporar parte desse TiO_2 . Fato esse que, além de não pigmentar tanto a superfície quando manchada pois possuía menos material aderido superficialmente, também tornou a superfície mais fotocatalítica que as demais.

4 Conclusões

A partir dos resultados encontrados nas análises das profundidades de carbonatação das amostras, é possível concluir que as amostras do tipo I, II, IV e V carbonatam de forma muito semelhante, principalmente no ambiente natural. Enquanto as amostras III são muito mais susceptíveis à carbonatação na face onde foi empregada a camada superficial de argamassa. A elevada relação água/cimento do concreto favoreceu profundidades consideráveis de carbonatação, principalmente no ambiente acelerado, que possibilitaram uma melhor comparação entre os tratamentos empregados.

De maneira geral, os tratamentos I e II atingem profundidades de carbonatação muito próximas, logo, pode-se afirmar que a adição de dióxido de titânio na massa não influencia a carbonatação em concretos. Os concretos que receberam aspersão, IV e V, também apresentaram pouca diferença nos valores das profundidades de carbonatação, quando comparados um com o outro. Logo, ao que se refere à carbonatação, a idade com que as amostras são aspergidas não possui grande influência nas profundidades de carbonatação que elas atingirão. Quanto às amostras III, pode-se concluir que o emprego de dióxido de titânio em apenas uma camada superficial de argamassa no concreto é a

alternativa com menor desempenho dentre as empregadas no presente estudo, ao que se refere às profundidades de carbonatação.

Mesmo com a dificuldade de comparação entre os tratamentos empregados nas amostras devido a grande variação de rugosidade das mesmas, a análise dos resultados obtidos através do ensaio de colorimetria permite concluir que a aspersão de uma solução de dióxido de titânio 10%, 24 horas após a concretagem, origina superfícies com maior capacidade de autolimpeza quando comparadas com as demais amostras. Desta forma, prezando pela economia de material empregado (TiO_2) e levando em consideração os resultados obtidos em ambos os ensaios, conclui-se que a aspersão de uma solução de dióxido de titânio 10%, 24 horas após a concretagem, é a melhor opção para obtenção de superfícies fotocatalíticas de concreto branco, dentre os tratamentos aplicados, e que esta técnica não acarretará em aumento significativo das profundidades de carbonatação.

5 Referências bibliográficas

ANDRADE, J.J.O. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado: Análises das Manifestações Patológicas nas Estruturas no Estado de Pernambuco**. 1997. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

ARANHA, P.M.S. **Contribuição ao Estudo das Manifestações Patológicas nas Estruturas de Concreto Armado na Região Amazônica**. 1994. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

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

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

BOGUTYN S.; ARBOLEDA C.; BORDELON A.; TIKALSKY P. Rejuvenation techniques for mortar containing photocatalytic TiO₂ material. **Construction and Building Materials**, n. 96, p. 96–101, 2015.

CARMONA, A.; MAREGA, A. Retrospectiva da Patologia no Brasil: Estudo Estatístico. In: **Trabajos Presentados en la Jornada Español e Potuques sobre Estructuras y Materiales**, 1988. Madrid. Anais... Madrid: CEDEX/ICcET. p.99-124.

CASAGRANDE C. A. **Estudo da incorporação de partículas de titânia em argamassas fotocatalíticas**. 2012. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

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

CATUSO, A.; MENNUCCI, M.M.; ANDRADE, J.; DAL MOLIN, D.C.C. Influência da exsudação na profundidade de carbonatação em concretos. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, 57°, Bonito, 2015. Anais...São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, 2015.

DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em Estruturas de Concreto Armado: Análise das Manifestações Típicas e Levantamento de Casos Ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. 1988. 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

FERNANDEZ, C. N. **Estudo sobre a incorporação de nanopartículas de dióxido de titânio em argamassas fotocatalíticas**. 2017. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

FONSECA, A. J. **Avaliação da eficácia de tratamentos convencionais e aplicações alternativas para prevenir a biodeterioração em património cultural**. 2009. Dissertação (Mestrado em Conservação e Restauro) - Departamento de Conservação e Restauro - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2009.

GOMES N. **Estudo de argamassas eco eficientes**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho – Escola de Engenharia. 2012.

GRAZIANI, L.; QUAGLIARINI, E.; BONDIOLI, F.; D'ORAZIO, M. Durability of selfcleaning TiO₂ coatings on fired clay brick façades: Effects of UV exposure and wet & dry cycles. **Building and Environment**, n. 71, p. 193-203, 2014.

GUERRA, F. L. **Avaliação da eficiência de nanopartículas de TiO₂ no controle do crescimento de fungos filamentosos deteriorogênicos em argamassas históricas**. 2016. Proposta de tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GUERRA, F. L. **Avaliação da eficiência de nanopartículas de TiO₂ no controle do crescimento de fungos filamentosos deteriorogênicos em argamassas históricas**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

HASEBE M. & EDAHIRO H. Experimental studies on basic properties of concrete using TiO₂ as admixture. **Proceedings of the Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13)**, September 11-13, 2013, Sapporo, Japan, E-5-3., E-5-3

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. P.231. Tese (livre-docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HUSKEN G.; HUNGER M.; BROUWERS H.J.H. Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification. **Building and Environment**, n. 44, p. 2463–2474, 2009.

JAMES, A.; BAZARCHI E.; CHINIFORUSH, A. A.; AGHDAM, P. P.; HOSSEINI, M. R.; AKBARNEZHAD, A.; MARTEK, I.; GHODOOSI, F. Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: A review. **Construction and Building Materials**, n. 224, p. 1026–1039, 2019.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

KIRCHHEIM A.P.; RHEINHEIMER V.; DAL MOLIN D.C.C. Estudo comparativo de concretos brancos e comuns com relação à carbonatação e absorção de água. **Constr. Construir. Mater** , 84 (2015) , pp. 320 - 330

KULAKOWSKI, M.P. **Contribuição ao Estudo da Carbonatação em Concretos e Argamassas Compostos com Adição de Sílica Ativa**. 199 f. 2002. Porto Alegre. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

KULAKOWSKI, M.P.; PEREIRA, F.M.; DAL MOLIN, D.C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, n. 23, p. 1189–1195, 2009.

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

MEHTA, P.K. Durability of Concrete - Fifty Years of Progress? In: **Seminário Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto**, 1993. Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: NORIE/PPGEC/UFRGS, 1993. p.33.

MELO, J. **Desenvolvimento de peças pré-moldadas de concreto fotocatalíticas para pavimentação e purificação do ar**. 2011. 191f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

MENNUCCI, M. M. **Influência de inibidores no comportamento de corrosão de aço CA-50 para armadura de estruturas de concreto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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

NINCE, A.A. **Levantamento de Dados sobre a Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste**. 1996. 176p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília.

PEREIRA, M. A. C.; JALALI, S.; PACHECO TORRAL, F. Argamassas aditivadas com Dióxido de Titânio: uma solução eficaz no combate aos graffitis. **Materiais de Construção**, p. 42-45, 2009.

POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibrium in aqueous solutions**. Houston, NACE, 1974.

SANTIS, B. C.; FIORELI, J.; JUNIOR, H. S.; ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da durabilidade de concretos estruturais com agregados leves inovadores utilizando a carbonatação acelerada. In: **Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras : conforto ambiental, durabilidade e pós-ocupação**, p. 398 , 2017.

ŠAVIJA, B.; LUKOVIC´ M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**. n.117, p. 285–301, 2016.

SILVA, V.M. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2002.

SMITS, M. et al. Photocatalytic degradation of soot deposition: self-cleaning effect on titanium dioxide coated cementitious materials. **Chemical Engineering J**, n. 222, p. 411–418, 2013.

STEWART, M.G.; ROSOWSKY, D.V. Time-Dependent Reliability of Deteriorating Reinforced Concrete Bridge Decks. **Structural Safety**, n. 20, p. 91-109, 1998.

TORGAL, F. P.; MIRALDO, S.; LABRINCHA, J.A.; BRITO, J. An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. **Construction and Building Materials**, n.36, p. 141–150, 2012.

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

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

TUUTTI, K. **Corrosion steel in concrete**. Stockolm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.