



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - CEUB
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

KAMIRÃ BARBOSA RIBEIRO

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR DIÓXIDO DE TITÂNIO NA
RESISTÊNCIA MECÂNICA E PROPRIEDADES FÍSICAS DE ARGAMASSAS**

BRASÍLIA

2021

KAMIRÃ BARBOSA RIBEIRO

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR DIÓXIDO DE TITÂNIO NA
RESISTÊNCIA MECÂNICA E PROPRIEDADES FÍSICAS DE ARGAMASSAS**

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e Pesquisa.

Orientadora: Dra. Maria José de Souza Serafim

BRASÍLIA

2021

Dedico o presente trabalho à Professora
Orientadora Dra. Maria José de Souza Serafim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço: à minha família pelo sempre presente apoio;

À Professora Maria José de Souza Serafim, por todo conhecimento compartilhado e toda ajuda ao longo da graduação em Engenharia Civil;

Ao LABOCIEN e aos seus técnicos por toda atenção, prontidão e carinho no desenvolvimento desta pesquisa;

Ao UniCEUB, pela oportunidade de realização desta iniciação científica.

RESUMO

O dióxido de titânio – TiO_2 aparece na natureza principalmente como os minerais conhecidos: anatase e rutilo, é um material quimicamente estável, não apresenta toxicidade e é de custo relativamente baixo. Devido às interessantes propriedades, o composto tem sido utilizado em várias aplicações, dentre elas na engenharia civil, na preparação de argamassas e concretos, proporcionando melhoria nas propriedades finais desses materiais cimentícios. Neste trabalho utilizou-se dióxido de titânio, nas fases cristalinas anatase e rutilo, na preparação de argamassas com diferentes adições dos compostos e avaliou-se a influência nas propriedades desses materiais produzidos. Argamassas com 1, 3, 5 e 10% de substituição de cimento em massa por dióxido de titânio anatase e dióxido de titânio rutilo foram ensaiadas para avaliação das resistências a compressão e a tração por compressão diametral, da absorção de água, das massas específicas e quanto aos índices de vazios. Resultados para ambas as resistências foram obtidos para as idades 7, 14 e para 28 dias. Para resistência a compressão aos 28 dias, traços com 3% e 5% de substituição por dióxido de titânio anatase e com 1% e 5% por dióxido de titânio rutilo apresentaram significativo de desempenho. Para resistência a tração por compressão diametral aos 28 dias, todos os traços, exceto com 10% de substituição por dióxido de titânio rutilo apresentaram melhoria de desempenho. Para as demais idades ensaiadas, aos 7 e 14 dias, se observou melhoria de desempenho da resistência a compressão e a tração, para alguns dos traços, tanto com dióxido de titânio anatase ou com rutilo. Influência desprezível foi constatada para os valores de massa específica real para diferentes teores de substituição, porém as massas específicas saturadas e massas específicas secas apresentaram divergências mais pronunciadas com relação ao traço de referência. Para a absorção de água, os valores obtidos através de imersão e capilaridade convergiram para a tendência de que os traços com 5% de substituição, tanto com dióxido de titânio anatase quanto com dióxido de titânio rutilo, apresentaram maiores absorções. Os valores dos índices de vazios variaram pouco para referência, porém apenas os traços com 10% de substituição para ambas fases do dióxido de titânio atingiram menores índices em relação à referência.

Palavras-chave: Argamassas; Dióxido de titânio; Resistência mecânica; Propriedades físicas.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| INTRODUÇÃO | 6 |
| 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 7 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS | 10 |
| 2.1 Materiais | 10 |
| 2.2 Metodologia | 10 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 14 |
| 3.1 Resistência a compressão | 14 |
| 3.2 Resistência a tração por compressão diametral | 17 |
| 3.3 Massa específica seca, saturada e real | 19 |
| 3.4 Absorção de água por capilaridade e por imersão | 20 |
| 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 22 |
| 5 REFERÊNCIAS | 24 |

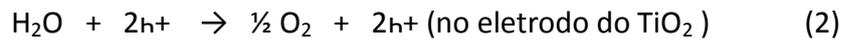
INTRODUÇÃO

A consideração de problemas globais devido a atividades humanas é um assunto de suma importância atualmente, assim como a avaliação do impacto de tais atividades ecologicamente e formas de dirimir tais efeitos. O setor da construção civil é considerado como uma das grandes fontes de poluição e uso de energia, gerando cerca de 50% dos materiais brutos da terra, iguais 50% de desperdício total de água, e cerca de 8% da emissão humana anual de CO₂. Desta forma, algumas metodologias têm sido desenvolvidas para equacionar esse impacto, como a avaliação do ciclo de vida (ACV), ou conhecida por LCA, como resultado da abreviação da metodologia a partir dos termos em inglês (MORSALI et al., 2019). Além destas novas formas de contabilizar o impacto da construção civil, é relevante o desenvolvimento de pesquisas de materiais que se apresentem como alternativas mais ecológicas e de menor impacto ambiental. Dentro desta perspectiva, os MCS (materiais cimentícios suplementares), que são usados como substituições parciais do cimento, e que além da redução nos já citados impactos ambientais, também podem propiciar vantagens mecânicas e físicas para os materiais cimentícios em geral.

Dentre esses materiais, o dióxido de titânio apresenta um papel importante. Com a descoberta da sua reação fotocatalítica, conhecida como efeito Honda-Fujishima, a sua aplicação como material cimentício tem sido cada vez mais estudada e continua a apresentar novas perspectivas, tanto pela sua influência nas propriedades mecânicas de concretos, argamassas, entre outros, assim como pela presença de características que conferem grande espectro de aplicações novas, como capacidade auto limpante, possibilidade de redução de partículas NO_x, de purificação do ar, entre outras (HASHIMOTO; FUJISHIMA; IRIE, 2005). Tais possibilidades são uma marca única das propriedades do dióxido de titânio, e dificilmente outros materiais cimentícios suplementares apresentam uma gama tão diversa de possíveis aplicações ecológicas.

Inicialmente, a fotocatalise pelo TiO₂ se dava apenas por uma reação de redução de substâncias adsorvidas em sua superfície a partir dos raios UV, e posteriormente, pela descoberta de Akira Fujishima, no final da década de 60, estudando a resposta eletroquímica da luz em semi-condutores, descobriu outra maneira de reduzir o próprio TiO₂ através de uma fotocatalise da água. A radiação gerava a produção de uma corrente passando do TiO₂

para o eletrodo contendo platina (Pt). Dessa forma, constatou a oxidação do dióxido de titânio. As reações se encontram abaixo (MANAHAN, 2013; HALL, 2004):



E a reação geral é:



Sabendo-se da importância das inúmeras propriedades do TiO_2 , este trabalho de pesquisa teve como objetivo avaliar aplicações do composto na área da engenharia civil, como material cimentício suplementar, em propriedades mecânicas e físicas de argamassas. Para alcançar os objetivos, se procederam as seguintes etapas: revisão bibliográfica, preparar corpos de prova cimento puro para referência e, com substituição de cimento por dióxido de titânio em teores pré-determinados, realizar os ensaios de acordo com as normas vigentes, avaliar os resultados obtidos.

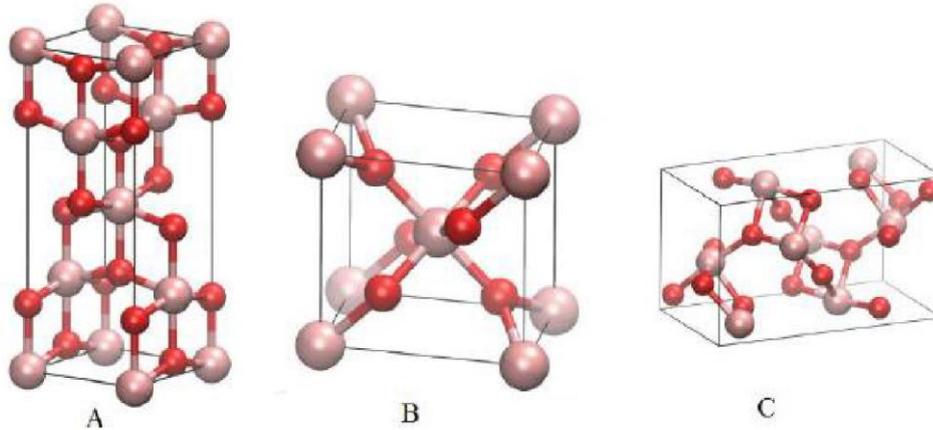
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O dióxido de titânio, também conhecido como o titânio (IV) ou óxido de titânia, é o óxido natural de titânio, com a fórmula química TiO_2 e possui três estruturas cristalinas na natureza, são elas as formas: anatase, rutilo e brookita. Todos esses três tipos apresentam a mesma fórmula química: TiO_2 , porém as suas estruturas cristalinas são diferentes. As duas primeiras apresentam estruturas cristalinas tetraédricas enquanto a brookita apresenta estrutura ortorrômbica (KALEJI, 2011; GUPTA, 2011). Geralmente a fase brookita é metaestável, portanto, de baixo interesse.

Além disso, como duas formas de alta pressão, uma forma monoclinica “baddeleita” e como uma forma ortorrômbica $\alpha\text{-TiO}_2$, ambas encontradas na cratera de Ries, na Bavária. A forma mais comum é o rutilo, que é também a fase de equilíbrio em todas as temperaturas. As fases metaestáveis e anatase da brookita se convertem para o rutilo, após aquecimento.

(COTTON et al., 1995). O rutilo, o anatásio e a brookita, contêm seis titânios coordenados, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Estruturas cristalinas do TiO_2 : Anatase (A), Rutilo (B) e Bruquita(C).



Fonte: MOELLMANN et al., (2012).

Para a obtenção dessas três formas cristalinas é necessário calcinar o material em temperaturas diferentes. Feltrin, et al., 2012, demonstrou que de 250°C até 600°C observa-se a fase anatase, acima de 600°C observa-se a presença das fases anatase e rutilo, até 900°C observa-se a fase rutilo e em 950°C obtêm-se 100% de fase rutilo.

O dióxido de titânio (TiO_2) é um material que possui dimensão externa de 1 a 100 nm. A nanotecnologia tem recentemente se tornado uma área de grande interesse globalmente e na engenharia civil. Trata da visualização, caracterização, produção e manipulação de estruturas que são menores que 100 nm. As propriedades dos materiais nessa faixa podem variar significativamente das propriedades dos mesmos materiais, quando em maiores dimensões (RASHAD, 2015).

O TiO_2 apresenta propriedades que o tornaram destaque em pesquisas na engenharia civil. A literatura científica mostra alguns ensaios que corroboram para que o material modifique a hidratação dos produtos das reações na pasta. Lee (2013) avaliou pastas preparadas com P25 (80% anatase) a 5% e 10% de substituição de cimento, em massa e, PC50 (97% anatase) com pastas a 5%, 10% e 15% em massa. Para os dados de calorimetria isotérmica realizados de acordo com a ASTM C170 2, os resultados obtidos mostraram que a adição do $n\text{TiO}_2$ aumentou o grau de hidratação nas primeiras 80 h observadas e, que maiores teores de adição resultam em maiores graus de hidratação. Foi possível observar que melhores resultados foram os obtidos para o P25 (LEE et al., 2013).

Não apenas a substituição de cimento por dióxido de titânio (TiO_2) pode melhorar a resistência à compressão de argamassas, como também sua adição no processo de fabricação do clínquer que apresentou resultados positivos quanto à otimização da presença de C_3S , sendo o teor ótimo de 4,5% em massa. Como procedimento, foram preparados silicatos tricálcicos puros a partir da combustão a 1450°C de carbonatos de cálcio e quartzo, com relação estequiométrica de 3:1, na presença de diferentes concentrações de dióxido de titânio – TiO_2 (entre 0,5 e 6%). Para todas as concentrações, encontrou-se o percentual final maior de C_3S ; além de que para 0,5% o conteúdo de cal livre foi menor do que a pasta referência de sua pesquisa (CHEN et al., 2012).

Isso demonstra um modo para aplicações não somente na substituição de cimento, já produzido com dióxido de titânio (TiO_2), mas uma maneira talvez menos suscetível a desperdícios e erros, como a preparação do clínquer já com o material adicionado (CHEN et al., 2012).

Em suas pesquisas com o dióxido de titânio (TiO_2), Austria (2015) constatou que os teores de 5% e 10%, apresentam resultados significativos para resistência mecânica, independente do teor utilizado. O que representou peso para o traço escolhido foi a quantidade de água, pois quanto maior foi o teor de substituição de TiO_2 , maior foi necessidade de água. No entanto, comumente quando é adicionada mais água no traço, há uma queda de resistência, mas nesse caso em específico o TiO_2 conseguiu suprir a demanda de água e ainda auxiliou no fechamento dos poros capilares. Fazendo com que a resistência se mantenha constante ou para o aumento da mesma.

Austria (2015), ainda demonstrou que os resultados obtidos foram satisfatórios e apresentaram ganho de resistência mecânica, mesmo sem adição extra na quantidade de água à mistura.

Zhang et al., 2015, mostrou em sua pesquisa que o aumento da resistência à compressão da argamassa com a substituição de 5% (quantidade ideal apresentada pelo autor) de dióxido de titânio (TiO_2) adicionado à massa cimentícia pode ser responsável pela maior contribuição do efeito de aceleração da hidratação das nanopartículas. O efeito de aumento de resistência do dióxido de titânio (TiO_2) na argamassa ficou mais evidente na resistência à compressão aos 28 dias. A resistência à compressão da argamassa com 5% de substituição

de cimento por dióxido de titânio (TiO_2) apresentou 20% de ganho, quando comparado com o grupo controle/referência, de sua pesquisa.

Ribeiro (2020), constatou que há uma tendência de crescimento da resistência mecânica com até 5% de substituição de cimento por dióxido de titânio (TiO_2), na idade 7 dias. Os resultados obtidos na idade de 14 dias, o traço com 5% de substituição por dióxido de titânio (TiO_2) – anatase, apresentou as maiores médias, quando comparado com os valores de referência, e com os outros teores de substituição de dióxido de titânio (TiO_2) – anatase, que eram de 3% e 10%.

Pôde-se concluir que o melhor teor de substituição na resistência à compressão nas argamassas foi com 5% de dióxido de titânio (TiO_2) – anatase, que representou um teor ideal, pois se sobressaiu dentre todos os outros traços realizados e ensaiados (RIBEIRO, 2020).

Diante do exposto, vale destacar que a substituição de cimento por dióxido de titânio (TiO_2) em argamassas de cimento Portland induz que o composto funcione como um filler, diminuindo a porosidade e aumentando a densidade das argamassas (ESSAWY et al., 2014), sendo, portanto, a finura do material relevante como suas propriedades.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Para o trabalho experimental utilizou-se os materiais e os procedimentos descritos a seguir.

- a. Cimento Portland CP II F 32;
- b. Dióxido de Titânio (TiO_2) – fases cristalinas Anatase e Rutilo;
- c. Água Potável – CAESB;
- d. Areia Padrão IPT – Frações: Grossa, Média Grossa, Média Fina, Fina;
- e. Balança de Precisão – Resolução de 0,10 g;
- f. Balança Hidrostática de Precisão – Resolução de 0,10 g;
- g. Misturador Mecânico;
- h. Cronômetro.

2.2 Metodologia

A seguir descreve-se a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho;

Para o ensaio, os corpos-de-prova foram moldados, curados e ensaiados de acordo com a ABNT NBR 7215:2019 (Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos).

Primeiramente, se preparou a argamassa para os corpos-de-prova, sem substituição de cimento – para material de referência, com as quantidades determinadas pela ABNT NBR 7215:2019.

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Material Massa para mistura (g) | |
| Cimento Portland _____ | 624 ± 0,4 |
| Água _____ | 300 ± 0,2 |
| | |
| Areia normal | |
| Fração grossa _____ | 468 ± 0,3 |
| Fração média grossa _____ | 468 ± 0,3 |
| Fração média fina _____ | 468 ± 0,3 |
| Fração fina _____ | 468 ± 0,3 |

Posteriormente, se preparou as argamassas com as substituições do cimento por dióxido de titânio (TiO₂) – anatase, nos teores previamente selecionados.

Preparou-se as argamassas com as substituições do cimento por dióxido de titânio (TiO₂) – rutilo, nos mesmos teores utilizados para o dióxido na fase anatase.

As substituições do Cimento Portland por dióxido de titânio (TiO₂) – anatase e rutilo foram realizadas com os seguintes teores: 1, 3, 5 e 10% em massa (g). É importante ressaltar que o dióxido de titânio (TiO₂) é um pó, logo, alterou-se somente a quantidade de cimento, sendo mantida a relação Água/Cimento em 0,48.

Buscando-se melhorar a mistura do dióxido de titânio (TiO₂) na argamassa, se adicionou a água na cuba de aço inoxidável juntamente com o dióxido misturando-os por 10 s em velocidade baixa. Após esse ajuste no procedimento padronizado, as etapas seguintes foram realizadas conforme a norma, sendo esta:

- a. 30 s para lançamento do Cimento Portland CP II F 32, em velocidade baixa;
- b. 30 s para lançamento das areias padrão IPT já misturadas, em velocidade baixa;
- c. 30 s para mistura dos materiais em velocidade alta;
- d. 90 s de pausa, sendo destes os primeiros 30 s para a argamassa retida na cuba de aço e os outros 60 s para a massa ficar em repouso;
- e. 60 s na velocidade alta e encerrar o procedimento.

Finalizado o preparo da argamassa realizou-se a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos conforme a norma, onde:

- a. Com uma espátula colocou-se a massa na fôrma dividido em 4 camadas equivalentemente iguais;
- b. Cada camada recebeu 30 golpes uniformemente homogêneos com o soquete normal.

Encerrado o procedimento de moldagem, os corpos-de-prova ficaram em cura úmida, sem adição de cal, por 24 h. Após esse período os mesmos foram desformados conforme mostrado na Figura 1, devidamente identificados e colocados em submersão em água não corrente.

Figura 1. Corpos de prova desformados



Fonte: do autor

Os ensaios de resistência à compressão (Figura 2) foram realizados nas idades de 7, 14 e 28 dias de hidratação e cura, com 4 corpos-de-prova, sendo os mesmos retificados na parte

superficial, de acordo com a ABNT NBR 7215:2019. Realizou-se as médias de três diâmetros com o auxílio de um paquímetro, para os quais se utilizou a velocidade de carregamento de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

Figura 2. Corpo de prova após rompimento na resistência a compressão.



Fonte: do autor

Os procedimentos para a realização dos ensaios de tração por compressão diametral seguem os mesmos procedimentos de confecção dos corpos de prova descritos acima, porém quanto a execução do ensaio se utiliza das prescrições da ABNT NBR 7222: 2011.

Para a realização dos ensaios das propriedades físicas testadas no trabalho, os corpos de prova também seguiram a metodologia de confecção acima descrita, quanto aos tempos de mistura no misturador mecânico e quanto às massas usadas para cada fração de areia, assim como cimento e água do traço, com a ressalva de que para os corpos de prova prismáticos, apenas a forma de moldagem difere. Nestes, não se utiliza do adensamento em camadas por golpes, mas através de quedas sucessivas dos corpos de prova em mesa, conforme descrito na ABNT NBR 15259: 2005.

As fórmulas de cálculo dos valores de absorção de água e coeficiente de capilaridade para tais corpos de prova, assim como as metodologias de execução do ensaio são retiradas desta mesma norma.

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massas específicas secas, saturadas e reais, foram executados com as orientações e procedimentos da ABNT NBT 9778: 2009.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O início dos trabalhos desse projeto de Iniciação Científica – PIC/PIBITI foi destinado a uma revisão bibliográfica, compra dos materiais e preparo dos corpos de prova de referência e com substituições do cimento pelo dióxido de titânio – fase anatase e fase rutilo.

3.1 Resistência a compressão

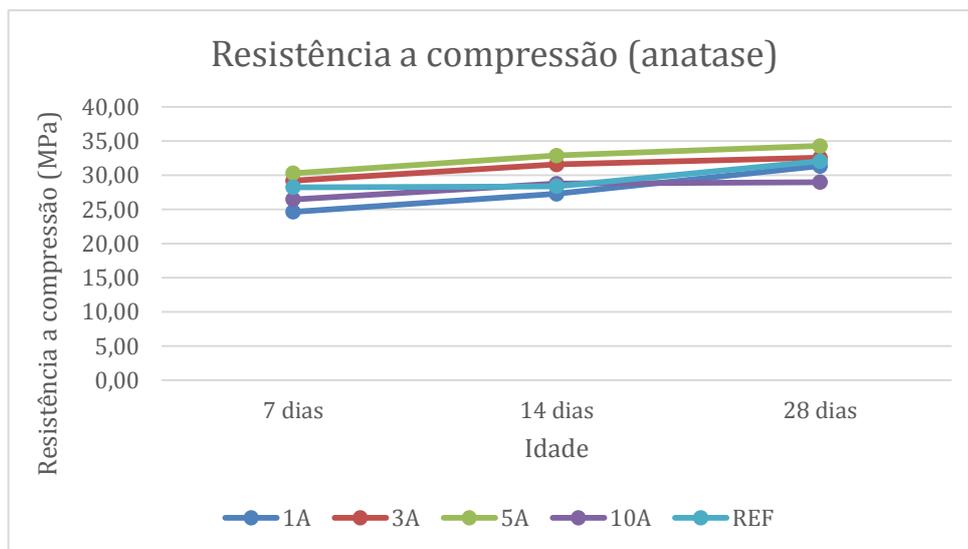
Primeiramente analisou-se a influência da substituição do cimento pelo dióxido de titânio nas resistências a compressão e na resistência a tração por compressão diametral, ambas a 7, 14 e 28 dias.

Os gráficos, para resistência a compressão estão separados de acordo com a fase do dióxido de titânio, Gráficos 1 e 2.

As tabelas com as resistências de todos os traços, tanto com anatase quanto com rutilo estão apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3, permitindo a comparação entre os resultados entre as duas fases.

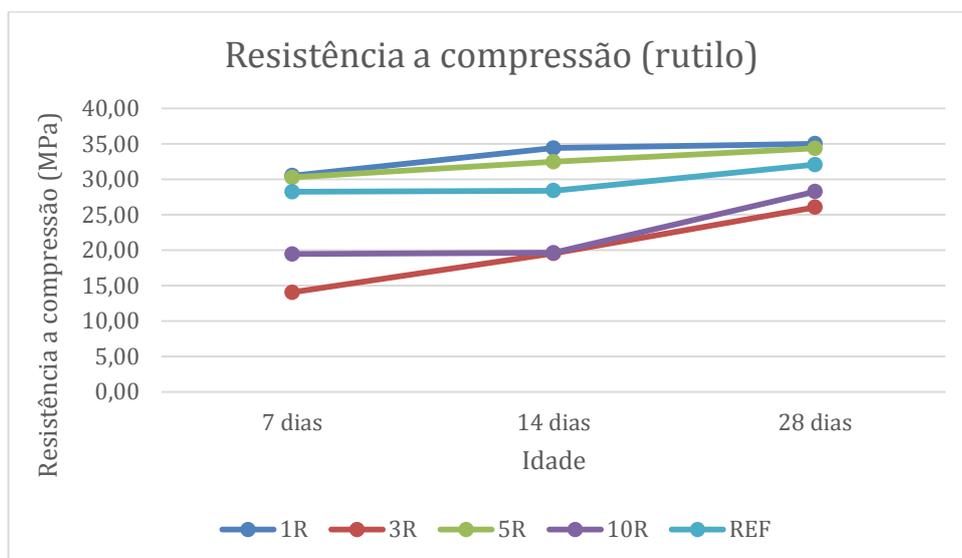
A identificação do traço e do teor de substituição está feita usando um número referente ao teor, seguido de uma letra – A para a fase anatase e R para a fase rutilo. Exemplo, 1A – o número 1 representa o teor de substituição (1%) e a letra A representa a fase anatase do dióxido de titânio usado.

Gráfico 1. Resultados da resistência a compressão por idade, teor de substituição de cimento por TiO₂ anatase.



Fonte: do autor

Gráfico 2. Resultados da resistência a compressão por idade e teor de substituição de cimento por TiO₂ rutilo.



Fonte: do autor

Tabela 1 – Média das resistências a compressão e desvios padrão a 7 dias, para substituição de cimento por fase de dióxido de titânio – anatase (A) e rutilo (R).

| | 1A | 1R | 3A | 3R | 5A | 5R | 10A | 10R | Refer. |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Média | 24.65 | 30.53 | 29.22 | 14.05 | 30.31 | 30.27 | 26.48 | 19.47 | 28.25 |
| desvio padrão | 4.25 | 4.57 | 3.38 | 2.87 | 0.81 | 1.22 | 1.05 | 3.15 | 4.38 |

Fonte: do autor

Tabela 2 – Média das resistências a compressão e desvios padrão a 14 dias, para substituição de cimento por fase de dióxido de titânio – anatase (A) e rutilo (R).

| | 1A | 1R | 3A | 3R | 5A | 5R | 10A | 10R | Refer. |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Média | 27.29 | 34.43 | 31.59 | 19.55 | 32.91 | 32.49 | 28.80 | 19.65 | 28.4 |
| desvio padrão | 4.45 | 1.70 | 3.42 | 7.66 | 1.55 | 0.88 | 0.8 | 4.23 | 1.46 |

Fonte: do autor

Tabela 3 – Média das resistências a compressão e desvios padrão a 28 dias, para substituição de cimento por fase de dióxido de titânio – anatase (A) e rutilo (R).

| | 1A | 1R | 3A | 3R | 5A | 5R | 10A | 10R | Refer. |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Média | 31.37 | 35.04 | 32.57 | 26.06 | 34.31 | 34.37 | 29.01 | 28.28 | 32.07 |
| desvio padrão | 2.99 | 1.49 | 1.19 | 5.64 | 0.38 | 3.46 | 0.32 | 4.54 | 3.30 |

Fonte: do autor

Pode-se observar no Gráfico 1 de resistência a compressão das argamassas com dióxido de titânio na fase anatase, que apresentou ganho de resistência final, aos 28 dias, nos traços com 3% e 5% de substituição de cimento.

Para a idade de 7 dias, os mesmos traços de 3 e 5% apresentam ganho de resistência.

Aos 14 dias, além dos traços 3A e 5A apresentarem ganho de resistência, também o faz o traço 10A. Desta forma, pode-se destacar a melhor eficácia das substituições a 3% e 5% em todas as idades ensaiadas, entretanto, os melhores resultados surgiram com 5% de substituição de cimento por TiO_2 anatase.

Para as argamassas com dióxido de titânio rutilo, pode-se observar pelo Gráfico 2, que houve um ganho na resistência final, 28 dias, para os traços com 1% e 5% de substituição e, esta tendência também foi mantida para todas as idades ensaiadas, ou seja, a 7 e 14 dias.

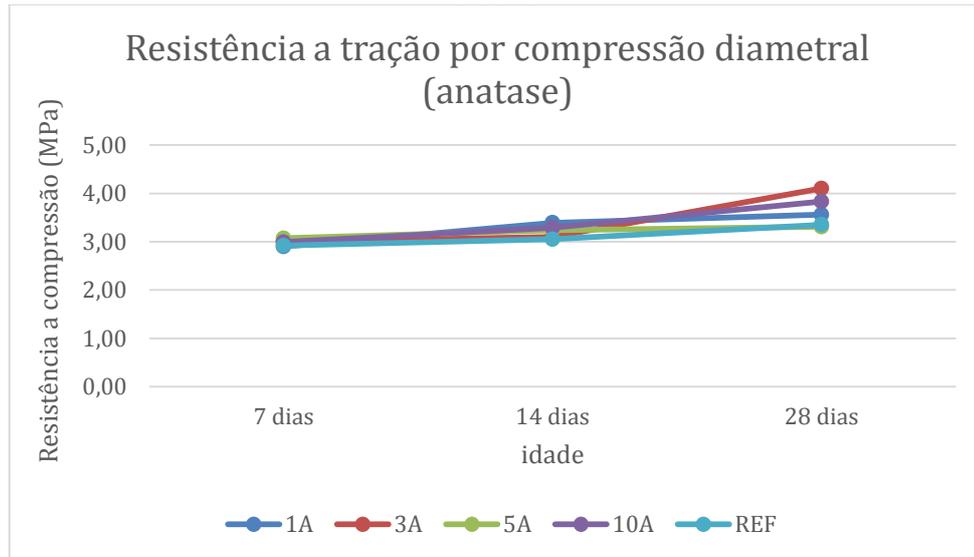
Os traços 1R e 3R apresentam maior eficiência mecânica que o traço de referência, sem dióxido de titânio. Porém, o traço 1R apresentou maior resistência que o traço 3R em todas as idades, 7, 14 e 28 dias.

Para as resistências aos 28 dias, comparando os traços que obtiveram melhoria mecânica, com anatase (3A e 5A) e com rutilo (1R e 5R), podemos observar que as argamassas com dióxido de titânio na fase rutilo foram mais resistentes.

3.2 Resistência a tração por compressão diametral

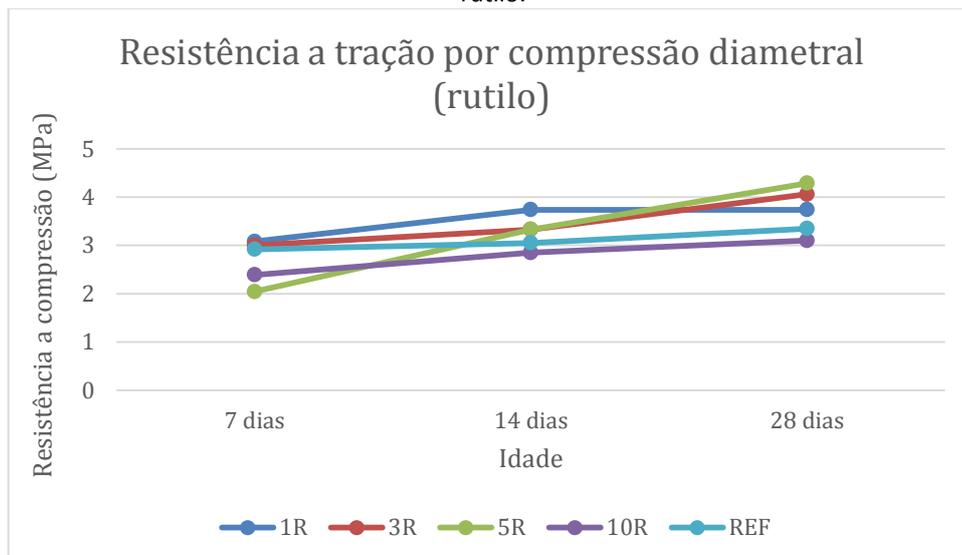
Os resultados obtidos nos ensaios de resistência a tração por compressão diametral para o traço de referência e com teores de substituição de cimento por TiO_2 nas fases anatase e rutilo estão apresentados nos Gráficos 3 e 4 e nas Tabelas 4, 5 e 6.

Gráfico 3 – Resistência a tração por compressão diametral por idade e teor de substituição de cimento por TiO_2 anatase.



Fonte: do autor

Gráfico 4 – Resistência a tração por compressão diametral por idade e teor de substituição de cimento por TiO_2 rutilo.



Fonte: do autor

Tabela 4 – Média das resistências a tração por compressão diametral e desvios padrão aos 7 dias, para substituição de cimento por fase de dióxido de titânio – anatase (A) e rutilo (R).

| | 1A | 1R | 3A | 3R | 5A | 5R | 10A | 10R | Refer. |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Média | 2.90 | 3.08 | 3.00 | 3.00 | 3.07 | 2.04 | 2.99 | 2.39 | 2.92 |
| desvio padrão | 0.05 | 0.72 | 0.22 | 0.16 | 0.21 | 0.64 | 0.34 | 0.06 | 0.20 |

Fonte: do autor

Tabela 5 – Média das resistências a tração por compressão diametral e desvios padrão aos 14 dias, para substituição de cimento por fase de dióxido de titânio – anatase (A) e rutilo (R).

| | 1A | 1R | 3A | 3R | 5A | 5R | 10A | 10R | Refer. |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Média | 3.39 | 3.74 | 3.10 | 3.33 | 3.24 | 3.33 | 3.29 | 2.85 | 3.05 |
| desvio padrão | 0.30 | 0.46 | 0.64 | 0.45 | 0.17 | 0.24 | 0.42 | 0.10 | 1.12 |

Fonte: do autor

Tabela 6 – Média das resistências a tração por compressão diametral e desvios padrão aos 28 dias, para substituição de cimento por fase de dióxido de titânio – anatase (A) e rutilo (R).

| | 1A | 1R | 3A | 3R | 5A | 5R | 10A | 10R | Refer. |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Média | 3.56 | 3.74 | 4.1 | 4.06 | 3.31 | 4.29 | 3.83 | 3.10 | 3.35 |
| desvio padrão | 0.38 | 0.35 | 0.41 | 0.85 | 0.16 | 0.40 | 0.11 | 0.27 | 0.32 |

Fonte: do autor

Pode-se observar no Gráfico 3, que mostram a resistência a tração por compressão diametral das argamassas com dióxido de titânio na fase anatase, que houve ganho de resistência final, aos 28 dias, em todos os traços, exceto o teor 5% de substituição de cimento. O teor que resultou mais resistente foi o de 3% de substituição.

Para a idade de 7 dias, todos os traços apresentam ganho de resistência, exceto o 1A. O mais resistente foi o 5A. Aos 14 dias, todos os traços apresentaram ganho de resistência, e também neste caso, o mais resistente foi o 5A.

Para as argamassas com dióxido de titânio rutilo – Gráfico 4, pode-se observar que houve ganho de resistência final, aos 28 dias em todos os traços, exceto o com 10% de substituição de cimento. O mais resistente o teor 5% de substituição.

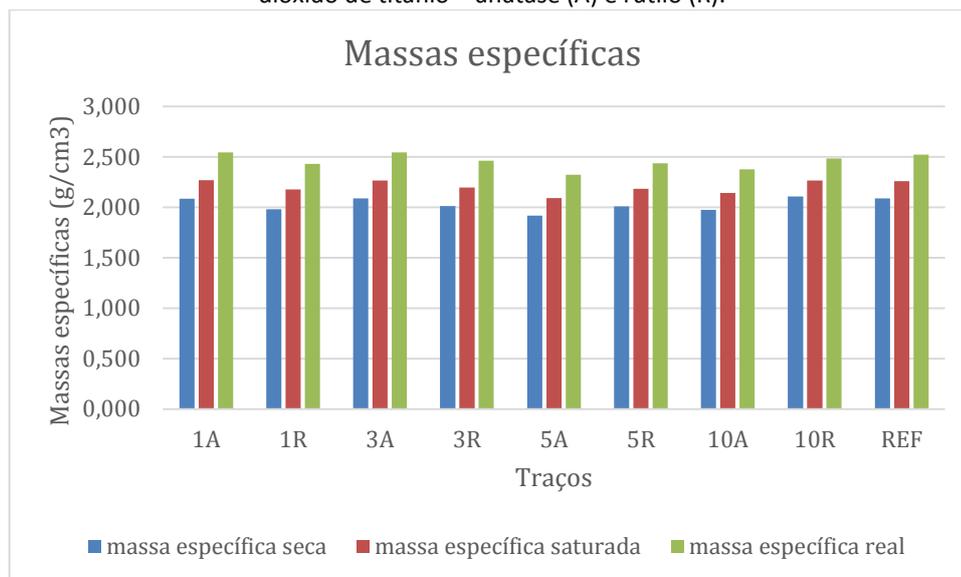
Aos 7 dias de idade, os traços 1R e 3R apresentaram ganho de resistência, sendo o mais resistente o 1R. Também aos 14 dias, todos os traços apresentaram ganho de resistência, sendo a maior do traço 1R.

Comparativamente, para as resistências finais ensaiadas, os traços com TiO_2 rutilo apresentaram maior eficácia mecânica que os traços com TiO_2 anatase, conforme mostram as Tabelas 4, 5 e 6. Tal fato se atribui ao menor tamanho de partículas da fase rutilo, pois, conforme a descrição comentada na literatura, da ação do dióxido de titânio como material cimentício suplementar principalmente como um filler, justifica tal resultado (ESSAWY et al., 2014).

3.3 Massa específica seca, saturada e real

Os resultados obtidos para as massas específicas das argamassas estão mostrados a seguir nos Gráficos 5 e 6.

Gráfico 5 – Massas específicas das argamassas por teor de substituição de cimento em massa e por fase de dióxido de titânio – anatase (A) e rutilo (R).



Fonte: do autor

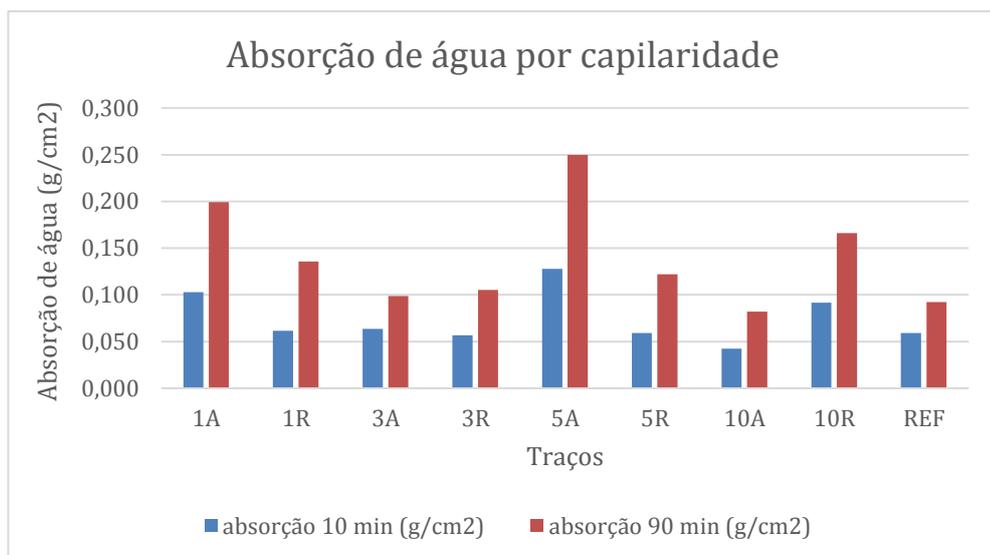
Quanto às propriedades físicas ensaiadas, é possível observar que as massas específicas reais variaram muito pouco, mesmo com as substituições realizadas, conforme mostra o Gráfico 5. Porém, para as massas específicas saturadas e secas, houve uma diferença nos resultados mais pronunciada. Provavelmente, a presença em diferentes quantidades dos dióxidos de titânios (anatase e rutilo), ocasionou alteração na absorção natural que as argamassas geralmente apresentaram o que por sua vez influenciou também nos valores das massas específicas secas.

3.4 Absorção de água por capilaridade e por imersão

Para os ensaios de absorção de água – Gráficos 6 e 7, ficou constatado através das medições por capilaridade, que os valores de absorção para os primeiros 10 min apresentaram uma discreta divergência quanto à tendência dos resultados e, também por capilaridade após 90 min, e para absorção de água por capilaridade. Como para estes dois últimos resultados, os mais significativos, a mesma tendência foi constatada, os resultados foram considerados coerentes entre si.

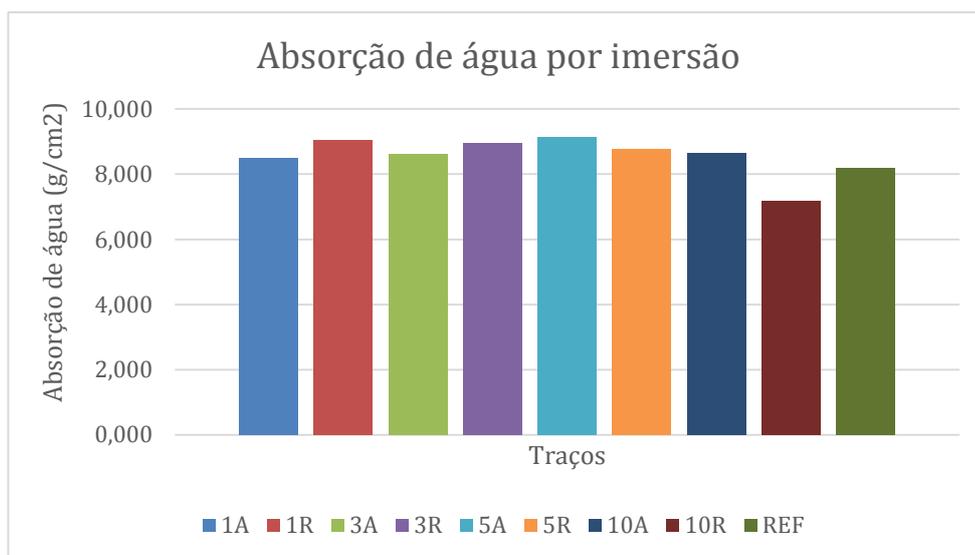
A tendência observada foi que a absorção tende a diminuir do traço 1A e 1R em direção ao traço 3A e 3R, atingindo valores máximos para 5% de substituição. Mesmo comportamento ocorreu nos traços 10A e 10R para 3A e 3R, culminando nos valores máximos para 5% de substituição.

Gráfico 6 – Absorção de água por capilaridade.



Fonte: do autor

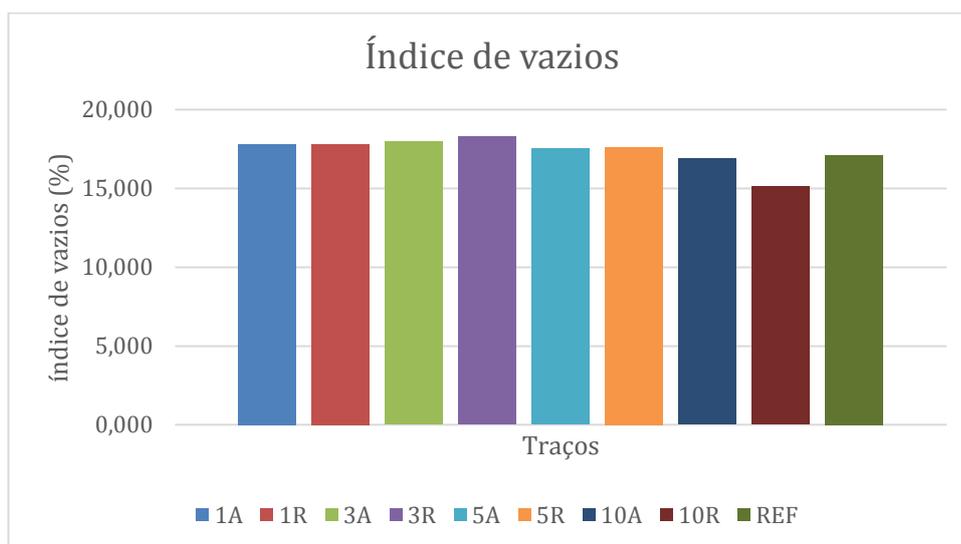
Gráfico 7 – Absorção de água por imersão.



Fonte: do autor

Para os valores dos índices de vazio – Gráfico 8, os menores valores são observados para os traços com 10% de substituição, apresentando valores menores do que para o traço de referência (sem substituições). Os demais traços apresentaram maiores índices de vazio do que a referência, porém os valores diferem em no máximo cerca de 1%.

Gráfico 8 – Índices de vazio obtidos por imersão em água.



Fonte: do autor

A diminuição do índice de vazio para os traços com 10% de substituição é justificável, visto a maior presença de material filler nestas argamassas, restringindo a quantidade de vazios. Porém, contra a tendência esperada que também os traços com maiores quantidades de substituição apresentassem as maiores absorções de água, devido a maior presença de partículas finas, foi constatado que os traços com 5% de substituição apresentaram maiores absorções de água, quer seja os valores obtidos através de ensaios de capilaridade ou imersão em água, o que corrobora com a coerência de tal resultado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando-se os resultados obtidos para as propriedades mecânicas ensaiadas, foi possível concluir que os dióxidos de titânio – a anatase e rutilo apresentaram, para alguns traços, ganho de resistência a compressão e para a resistência a tração de argamassas.

Para a resistência a compressão, os teores recomendados para obtenção de maiores resistências foram: 3% e 5% para dióxido de titânio anatase e 1% e 5% para dióxido de titânio rutilo.

Para a resistência a tração por compressão diametral os teores de substituição de 3% e 5% apresentaram os melhores resultados, tanto para a fase anatase como para a fase rutilo. Mas também se observou a maior eficiência com o uso do dióxido de titânio na fase rutilo.

Quanto às propriedades físicas testadas, se constatou diferença desprezível nas massas específicas reais das argamassas, quer tenham substituições de cimento ou não.

Nos ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade, constatou-se que os traços de 5% do anatase e também do rutilo apresentaram maiores absorções.

Uma influência desprezível foi constatada nos resultados de massa específica real para diferentes teores de substituição, entretanto, as massas específicas saturadas e massas específicas secas apresentaram divergências mais pronunciadas com relação ao traço de referência.

De maneira geral, foi possível concluir que a influência da substituição de cimento por dióxido de titânio, tanto na fase anatase quanto rutilo, possui características tanto

mecânicas quanto físicas que corroboram no uso de tal material adequado para ser utilizado com MCS, com significativa melhoria em diversas propriedades das argamassas.

Ficou comprovada a eficiência na utilização do dióxido de titânio como material cimentício suplementar e, outros estudos podem ser desenvolvidos inclusive, associando-o a outros materiais na substituição do cimento.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 15259: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 7222: **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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

CHEN, J.; KOU, SHI-CONG; P., CHI-SUN. **Hydration and Properties of nano-TiO₂ cement blended cement composites**. Cement and Concrete Composites, v. 34, p. 642-649, 2012.

COTTON, F. A.; WILKINSON, G.; GAUS, P. L. **Basic Inorganic Chemistry**, 3rd ed., John Wiley & Sons, p. 550, 1995.

ESSAWY, A. A.; EL.ALEEM, S. Abd. **Physico-mechanical properties, potent adsorptive and photocatalytic efficacies of sulfate resisting cement blends containing micro silica and nano-TiO₂**. Construction and Building Materials, v. 52, p. 1–8, 2014.

FELTRIN, J. **Estabilização a elevadas temperaturas da fase anatase com partículas submicrométricas de SiO₂**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

GUPTA, S. M. TRIPATHI, M. Chinese Science Bulletin, v. 56, p. 1639, 2011.

HALL, N. **Neoquímica: a química moderna e suas aplicações**. Porto Alegre/RS: Bookman, p. 343-346, 2004.

HASHIMOTO, K.; IRIE, H.; FUJISHIMA, A. **Effect TiO₂ Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects**. Japanese Journal of applied Physics, Japão: v. 44, n. 12, p. 8269-8285 (Parte I), 2005.

KALEJI, B. K.; MAMOORY, S. R.; SANJABI, S. **Reaction kinetics, Mechanisms and Catalysis**, v. 103, p. 289, 2011.

LEE, B. Y.; JAYAPALAN, A. R; KURTIS, K. E. **Effects of nano-TiO₂ on properties of cement-based materials**. Magazine of concrete research, v. 65 (21), p. 1293–1302, 2013.

MANAHAN, S. E. Química Ambiental, 9^a ed., Porto Alegre/RS: Bookman, p. 722, 2013.

MOELLMANN, J.; EHRLICH, S.; TONNER, R.; GRIMME, S. **A DFT-D study of structural and energetic properties of TiO₂ modifications**. Journal of physics: condensed matter, v.24, p.424206, 2012.

MORSALI, S; ISILDAR, G. Y; BALTACI, U; ZARGARI, Z. H. **A New Environmental Perspective to The Concrete, The Most Used Material in Construction as a Significant Pollution Source**. International Congress on Civil Engineering, Architecture and Recreation of Metropolises, Munique: 2019.

RASHAD, A. M. **A Synopsis about the Effect of Nano-titanium Dioxide on Some Properties of Cimentitious Materials – A Short Guide for Civil Engineer**. Reviews on Advanced Materials Science, v. 40(1), p. 72-88, 2015.

RIBEIRO, K. B. **Influência da substituição de cimento por dióxido de titânio e nanossílica ativa na resistência à compressão de argamassas**. Brasília/DF: Programa de Iniciação Científica (PIC) em Engenharia Civil – Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, 2019/2020.

ZHANG, R.; CHENG, X.; HOU, P.; YE, Z. **Influences of nano-TiO₂ on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage**. Construction and Building Materials, v. 81, p. 35–41, 2015.