



ARIANE CRISTINE VALÉRIO

**INFLUÊNCIA DO DIÓXIDO DE TITÂNIO NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
FIBROCIMENTOS COM CELULOSE BRANQUEADA**

LAVRAS – MG

2021

ARIANE CRISTINE VALÉRIO

**INFLUÊNCIA DO DIÓXIDO DE TITÂNIO NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
FIBROCIMENTOS COM CELULOSE BRANQUEADA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador

Prof. Dr. Wisner Coimbra de Paula

Coorientador

Prof. Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva

LAVRAS – MG

2021

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Valério, Ariane Cristine.

Influência do dióxido de titânio nas propriedades físico-
mecânicas de fibrocimentos com celulose branqueada / Ariane
Cristine Valério. - Lavras : UFLA, 2021.

58 p.

Orientador(a): Wisner Coimbra de Paula.

Coorientador(a): Keoma Defáveri do Carmo e Silva.

Monografia (graduação) - Universidade Federal de Lavras,
2021.

Bibliografia.

1. Fibrocimentos. 2. Dióxido de Titânio. 3. Extrusão. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

ARIANE CRISTINE VALÉRIO

**INFLUÊNCIA DO DIÓXIDO DE TITÂNIO NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
FIBROCIMENTOS COM CELULOSE BRANQUEADA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 30 de abril de 2021.

Prof. Dr. Wisner Coimbra de Paula – UFLA

Profa. Me. Isabelle Cristine de Carvalho Terra – UNIFENAS

Prof. Dr. Rômulo Marçal Gandia – UFLA



Orientador

Prof. Dr. Wisner Coimbra de Paula



Coorientador

Prof. Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva

LAVRAS – MG

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, por me guiar e fortalecer nesse caminho.

Aos meus pais Luiz Edmilson e Rosana pelo exemplo de vida e superação e ao meu irmão André Luis, por me apoiarem e transmitirem amor e confiança.

A toda a minha família que me apoiou na escolha da universidade, da profissão e em todas as dificuldades vividas.

Ao professor e orientador Wisner pelo acolhimento, conhecimento, orientação e companheirismo e ao professor e coorientador Keoma pelo apoio, ensinamento e disposição.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA), a UEPAM, ao Departamento de Fitopatologia e aos professores em geral do departamento de engenharia por me propiciarem conhecimentos e equipamentos para o desenvolvimento dessa pesquisa.

As inúmeras amizades, em especial Letícia, Isabella, Moisés, Carol e Juninho, amigos de turma e da vida que me apoiaram nos momentos difíceis, sempre trazendo alegrias para os meus dias.

A Ana, Bárbara e Bianca que me acolheram como família, pelas histórias vivenciadas, pelos risos e todos os momentos compartilhados.

Por fim, a todos que de alguma maneira, direta ou indiretamente que me ajudaram com a realização desse trabalho. Muito Obrigada.

RESUMO

O fibrocimento com fibra celulósica está sendo muito utilizados na construção civil, por ser um material renovável, econômico e com controle de fissuras e deformações no concreto. A adição do TiO_2 promove a função autolimpante para esses materiais. Portanto, o objetivo desse trabalho foi avaliar as propriedades físicas e mecânicas de fibrocimento com celulose de eucalipto em diferentes adições de TiO_2 . Os compósitos fibrocimentos foram fabricados por extrusão com 60% de cimento *Portland*, 33% de calcário, 1% de HPMC (hidroxipropilmetilcelulose), 1% de ADVA (poliéster carboxílico) e 5% de fibras de celulose. O TiO_2 foi substituído pelo calcário em diferentes porcentagens (0, 5, 10, 15 e 20%). O compósito de 15% apresentou diferença estatística em relação aos demais tratamentos, aumentando 7,57% a absorção de água (após a cura). Após os ciclos de imersão e secagem, a densidade do compósito de 20% foi menor que os demais tratamentos, diminuindo 2,84%. O compósito de 10% reduziu a absorção de água em 15,97% e a porosidade em 14,71%. Portanto, o uso do TiO_2 é viável, não apresentando diferenças significativas nas propriedades físicas e mecânicas. O acréscimo do TiO_2 em telhas de fibrocimento facilita a manutenção e proporciona mais economia e praticidade.

Palavras-chaves: Compósito, Tratamentos, Extrusão, MEV, Ciclos.

ABSTRACT

Fiber cement with cellulosic fiber is being widely used in civil construction, for being a renewable, economical material that controls cracks and deformations in concrete. The addition of TiO_2 promotes the self-cleaning function for these materials. Therefore, the objective of this work was to evaluate the physical and mechanical properties of fiber cement with eucalyptus cellulose in different additions of TiO_2 . Fiber cement composites were manufactured by extrusion with 60% Portland cement, 33% limestone, 1% HPMC (hydroxypropylmethylcellulose), 1% ADVA (carboxylic polyester) and 5% fibers of cellulose. TiO_2 was replaced by limestone in different percentages (0, 5, 10, 15 and 20%). The 15% composite showed a statistical difference in relation to the other treatments, increasing water absorption by 7.57% (after curing). After the immersion and drying cycles, the density of the composite of 20% was lower than the other treatments, decreasing 2.84%. The 10% composite reduced water absorption by 15.97% and porosity by 14.71%. Therefore, the use of TiO_2 is feasible, with no significant differences in physical and mechanical properties. The addition of TiO_2 in fiber cement tiles facilitates maintenance and provides more savings and practicality.

Keywords: Composite, Treatments, Extrusion, SEM, Cycles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da flexão de um concreto sem fibras (convencional) e com fibras.	15
Figura 2 – Curva tensão/deformação para um concreto simples e um reforçado com fibrocimento.	16
Figura 3 – Comportamento da água e sujeira em: (A) superfície comum, (B) hidrofóbica, e (C) hidrofílica.	19
Figura 4 – Ciclo químico do TiO_2 para realizar a função autolimpante.	20
Figura 5 – Gráfico representativo do desempenho x vida útil de material comum e autolimpante.	20
Figura 6 – Templo Dives in Misericórdia.	21
Figura 7 – Ensaio de Flexão em três pontos.	23
Figura 8 – Materiais empregados: (A) - Celulose Branqueada, (B) – TiO_2 (rutilo).	29
Figura 9 – Gráfico carga x deflexão de um compósito.	31
Figura 10 – Gráfico densidade aparente por tratamento com seu referente desvio padrão após 28 dias de cura.	34
Figura 11 – Comparação entre as porcentagens de porosidade e absorção de água para os tratamentos com seus referentes desvios padrão após a cura.	35
Figura 12 – Gráfico MOR e LOP por tratamento com seu referente desvio padrão após a cura.	38
Figura 13 – Gráfico MOE por tratamento com seu referente desvio padrão após a cura.	39
Figura 14 – Gráfico razão MOR/LOP por tratamento com seu referente desvio padrão após a cura.	39
Figura 15 – Comparação entre as propriedades de porosidade para os compósitos e seus desvios padrão após a cura e após os ciclos de imersão e secagem.	43
Figura 16 – Comparação entre as propriedades de absorção de água para os compósitos e seus desvios padrão após a cura e após os ciclos de imersão e secagem.	43
Figura 17 – Comparação entre as propriedades de densidade aparente para os compósitos e seus desvios padrão após a cura e após os ciclos de imersão e secagem.	44
Figura 18 – MEV para os tratamentos de diferentes porcentagens de TiO_2 após a cura.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Traço dos materiais para a confecção dos compósitos fibrocimentos.....	28
Tabela 2 – Análise estatística das propriedades físicas pela ANOVA dos compósitos fibrocimentos após a cura.	36
Tabela 3 – Análise estatística pelo teste Tukey para propriedades físicas de cada tratamento com seus respectivos desvios padrão após a cura.	36
Tabela 4 - Análise estatística das propriedades mecânicas dos compósitos fibrocimentos pelo teste da ANOVA após a cura.....	40
Tabela 5 – Análise estatística pelo teste Tukey para as propriedades mecânicas dos tratamentos com seus respectivos desvios padrão após a cura.	40
Tabela 6 - Análise estatística pelo teste da ANOVA das propriedades físicas dos compósitos fibrocimentos após os ciclos de imersão e secagem.....	44
Tabela 7 –Análise estatística para as propriedades físicas pelo teste Tukey para cada tratamento e o desvio padrão após os ciclos de imersão e secagem.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Fibrocimento.....	14
2.1.1 Matéria Prima	14
2.1.2 Propriedades.....	15
2.1.3 Produção	17
2.2 Dióxido de Titânio (TiO ₂)	17
2.3 Propriedades Físicas e Mecânicas	21
2.3.1 Ensaio Físicos.....	21
2.3.2 Ensaio Mecânicos.....	22
2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	24
2.5 Ciclos de Imersão e Secagem	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Materiais	28
3.2 Métodos	29
3.2.1 Compósitos Fibrocimentos	29
3.2.2 Ensaio Físicos.....	30
3.2.3 Ensaio Mecânicos.....	31
3.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura	33
3.2.5 Ciclos de Imersão e Secagem	33
3.2.6 Análise Estatística.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 Propriedades físicas dos compósitos após a cura	34
4.2 Propriedades mecânicas dos compósitos após a cura.....	38
4.3 Propriedades físicas dos compósitos após ciclos de imersão e secagem.....	42
4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	47

5. CONCLUSÃO.....	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

1. INTRODUÇÃO

O dióxido de titânio (TiO_2) é um material comum do cotidiano, barato, atóxico e apresenta três principais modificações cristalinas que são o rutilo, anatase e bruquita. É muito utilizado como filtro para água não potável, como pigmento branco em tintas e em alimentos, melhorando a cor de produtos industrializados sem interferir no sabor (STAMATE; LAZAR, 2007). Também pode ser acrescentado em argamassas e concretos, pois na presença de luz solar e água da chuva ele traz a propriedade hidrofílica para a superfície se autolimpar, trazendo praticidade na manutenção de acúmulo de sujeira e economia (JESUS, 2015).

Outra particularidade desse elemento é que a energia, não a intensidade, dos fótons incidentes causa sua catálise (componentes impuros são decompostos pela luz ultravioleta - UV), assim ele é ativado quimicamente e decompõe materiais orgânicos. A luz da lâmpada da sala, por exemplo, já pode manter as paredes desse cômodo limpas se o TiO_2 for acrescentado a tinta, pois a sujeira é menor no interior da residência e esses poucos fótons de energia da luz podem induzir a fotocatalise (FUJISHIMA; RAO; TRYK, 2000).

As fibras vegetais são um compósito natural, renovável e se encontra com uma ampla variedade de formas, tamanhos e propriedades. Elas são constituídas principalmente por celulose e sendo muito utilizadas ultimamente para uso em fibrocimento, pois agregam baixo custo na produção desses materiais, apresentam melhoria nas propriedades térmicas e mecânicas e também são muito encontradas em países tropicais e subtropicais (DOURADO, 2015).

Estudos de Silva (2015) comprovaram a diminuição da massa específica dos compósitos fibrocimento, melhoria na resistência à tração e ao impacto, além de apresentar controle da fissuração e desempenho dúctil na ruptura. As fibras apresentam baixo módulo de elasticidade, maior absorção de energia que possibilita a realização de trabalho na pós-fissuração do fibrocimento (ALMEIDA, et al., 2010).

Atualmente os compósitos fibrocimentos são usados em caixas d'água, materiais de construção com pequenas espessuras e materiais não estruturais como telhas, placas planas de divisória, forros, tubos extrudados e em chapas finas. Isso faz com que as fibras ganhem grande destaque na construção civil, pois os estudos avançam cada dia mais para aplicação delas como reforço em materiais de engenharia (MOHR, 2005).

As telhas de fibrocimento são muito utilizadas, principalmente pelos brasileiros, sendo mais econômicas e de boa aparência estética. Elas são feitas de cimento *Portland* e fibras

celulósicas/sintéticas tendo vantagem em relação as telhas cerâmicas, como, seu peso é reduzido, o que contribui no carregamento de vigas e pilares. Elas também apresentam facilidade na limpeza, na instalação, são mais resistentes a intempéries, maior durabilidade, são mais econômicas e possuem grande variedade de tamanhos, espessuras e modelos (SILVA, *et al.*, 2010).

As telhas de fibras celulósicas/sintéticas substituem as de fibras de amianto que começaram a ser fabricadas na década de 1960 no Brasil, porém sua fabricação se mostrou muito prejudicial à saúde humana. As telhas de amianto foram muito usadas devido à sua alta relação de resistência por peso, mas pela sua natureza cancerígena ela foi substituída por outros tipos de fibras como a celulósica (COELHO, 2017).

Em vista dessas constatações, esse trabalho tem como objetivo analisar o desempenho, a resistência e eficácia de compósitos de fibrocimento com celulose branqueada e substituição de diferentes porcentagens de TiO_2 . Esses materiais foram submetidos a ensaios para avaliar suas propriedades físicas e mecânicas, além de uma análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar o comportamento das fibras com sua matriz cimentícia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fibrocimento

Os primeiros estudos para o uso de celulose no fibrocimento em substituição ao amianto começaram na década de 40. Esses trabalhos foram intensificados após a Segunda Guerra Mundial devido à escassez de fibras de amianto, porém os resultados apresentados não foram satisfatórios até a produção de placas de fibrocimento com metade das fibras de amianto e a outra metade de fibras de madeira. Elas apresentaram melhorias na fixação, corte e uniformidade em relação as placas com apenas amianto. Com estudos mais recentes descobriu que a estrutura da interface fibra-matriz apresenta uma grande importância no comportamento mecânico dos compósitos fibrocimento para que se tornem adequados e com isso as fibras vegetais veem ganhando papel de destaque em materiais de construção civil, por seu baixo custo e fácil acesso (TONOLI, 2006).

2.1.1 Matéria prima

O cimento *Portland* é um dos materiais mais aplicado no mundo, porém sua combinação com fibras vegetais ainda é pouco empregada. Como o desempenho mecânico dos compósitos cimentícios são frágeis, apresentando poucas deformações e fissuras, é importante acrescentar nessa matriz outros materiais que diminuam esse problema. A fibra é um material que pode suprir essa necessidade (TONOLI, 2006).

O fibrocimento tem como base o cimento *Portland* e é caracterizado por duas partes, a matriz cimentícia e as fibras. No compósito cimentício podem ser adicionados minerais como escória, sem agregados, formando uma pasta. Desta forma, para melhorar a resistência mecânica e tenacidade dessa matriz acrescentam-se as fibras podendo ser de celulose, amianto ou fibras sintéticas e facilitam a produção do material (COSTA; TEIXEIRA, 2018).

Antigamente era convencional utilizar a fibra de amianto para melhorar esses compósitos cimentícios, já que o amianto é um material abundante e de fácil acesso, com boas propriedades físicas como resistência ao calor, fogo e propriedades antissépticas (DOURADO, 2015). Porém, essa fibra foi proibida em 2005, por ser prejudicial à saúde humana, sendo sua produção considerada uma violação aos direitos humanos. Assim, ela vem sendo substituída pelas fibras vegetais, que são renováveis e têm menor valor agregado (TERRA; PAULA; SCHNEIDER, 2017).

A polpa celulósica branqueada de eucalipto cumpre o papel de fibra para o reforço da matriz cimentícia. Esse gênero *Eucalyptus* está sendo muito utilizado por produtores e pesquisadores

para a produção do fibrocimento, já que ele possui rápido crescimento, grandes plantações e baixo custo. O desempenho mecânico do fibrocimento melhora, devido a mistura das fibras com o cimento, pois as fibras fornecem rigidez ao material, aumentando sua tenacidade e resistência a flexão (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

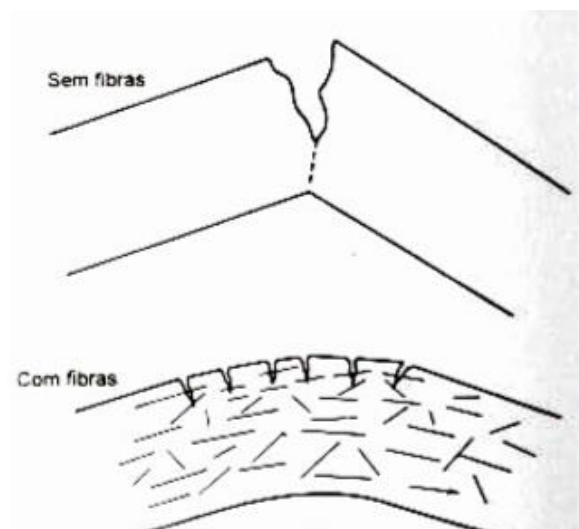
Normalmente é utilizado o cimento *Portland* CPV-ARI para a produção de fibrocimento devido a sua alta resistência inicial, sua pureza (não apresenta adições minerais), granulometria e maiores teores de silicatos tricálcico e dicálcico, o que aumenta sua reatividade (TERRA; PAULA; SCHNEIDER, 2017).

O branqueamento nas fibras remove a maioria da lignina presente nelas, melhorando a ligação do fibrocimento. A lignina é um polímero que liga as células da fibra e retarda a hidratação do cimento ao redor da fibra, o que causa uma fraca ligação matriz-fibra. Para retirá-la é preciso aumentar a alcalinidade da matriz do fibrocimento diminuindo a durabilidade do material, porém aumentando sua ductilidade. As fibras fornecem a ductilidade no material de fibrocimento para vencer as desvantagens causadas pelo cimento (MOHR, 2005).

2.1.2 Propriedades

A Figura 1 apresenta um esquema de ruptura de amostras de cimento com e sem fibras de reforço. É possível observar que o compósito de cimento sem as fibras demonstra seu comportamento mecânico frágil, já o compósito fibrocimento apresenta um aumento da resistência mecânica no material, pois as fibras ajudam a ligar as microfissuras evitando que elas se transformem em grandes fissuras e se distribuam ao longo do material (TONOLI, 2009).

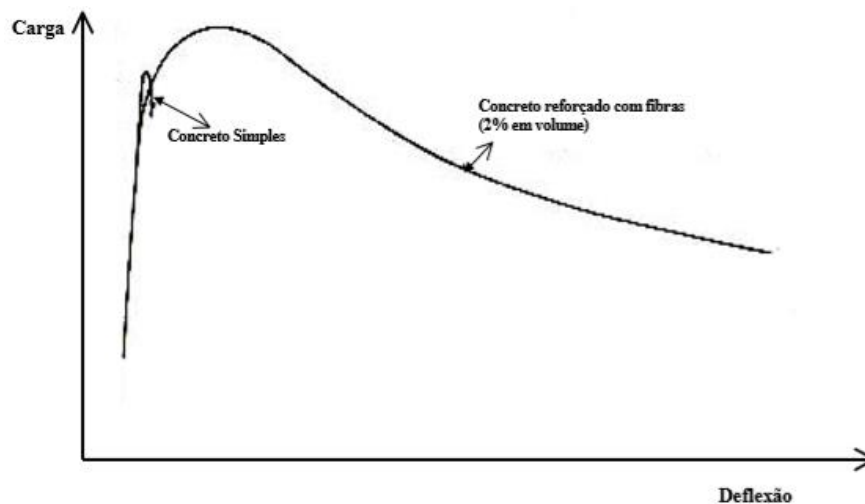
Figura 1 – Representação da flexão de um concreto sem fibras (convencional) e com fibras.



Fonte: Peruzzi (2002).

A Figura 2 ilustra o comportamento tensão x deformação da matriz cimentícia sem a fibra e a do fibrocimento. No fibrocimento ocorre uma melhora nas propriedades mecânicas, como resistência ao impacto, tenacidade e tensão máxima de ruptura. Isso só é possível se a interação entre fibra e cimento ocorrer adequadamente, ou seja, respeitando as características físico-químicas de ambos os elementos (tamanho e orientação da fibra, entre outros) (TERRA; PAULA; SCHNEIDER, 2017).

Figura 2 – Curva tensão/deformação para um concreto simples e um reforçado com fibrocimento.



Fonte: Peruzzi (2002).

A interface é a região de contato entre a fibra e a matriz, ela propaga a transmissão da tensão entre as duas faces, o que aumenta o deslocamento das fissuras e a energia da fratura. A ligação da interface pode ocorrer de maneira química, física ou pela combinação dessas propriedades. O comportamento mecânico do fibrocimento está ligado à interface fibra-matriz, pois quando essa ligação é mais forte o material se torna mais resistente (TONOLI, 2006).

Apesar das fibras naturais serem muito estudadas para reforço em compósitos cimentícios, ainda faltam pesquisas nessa área e existem ressalvas em relação à baixa durabilidade e degradação dos compósitos. Silva (2015) aponta que compósitos cimentícios com fibras vegetais apresentam vida útil de 2 a 4 anos. Essa baixa durabilidade pode estar relacionada a degradação química da fibra devido ao meio alcalino do cimento. Assim, as fibras podem sofrer mineralização (ataque alcalino) e apresentar redução de tenacidade ao longo do tempo.

A alta porosidade é outra causa que diminui a durabilidade dos compósitos fibrocimento, pois permite a entrada de água no compósito e, com isso, pode trazer outras substâncias dissolvidas na água como cloretos, sulfatos, sais, ácidos, gases, entre outros. Assim, a água que

entra nos poros pode dissolver o hidróxido de cálcio degradando as fibras vegetais. Isso pode acarretar na perda de aderência entre as fibras e a matriz cimentícia e no processo de mineralização das fibras (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

Algumas pesquisas indicam o tratamento químico para evitar a degradação das fibras, melhorando a interface fibra-matriz, aumentando a durabilidade do compósito. Esse tratamento, porém, é industrialmente caro e prejudicial ao meio ambiente, já que utiliza produtos químicos e produz resíduos industriais. Aditivos de micro enchimentos podem infiltrar e densificar o compósito cimentício, preenchendo a região de transição e melhorando a relação fibra-matriz (SILVA, 2010).

2.1.3 Produção

Para a produção do fibrocimento pode-se utilizar o método de extrusão, que permite a homogeneização do material e obtenção de boas propriedades mecânicas. A extrusora é uma máquina que permite uma produção contínua, livre de resíduos sólidos e econômica, sendo muito utilizada na produção industrial. O processo da extrusão ainda apresenta falhas tanto nas técnicas de fabricação, quanto em estudos na área de dispersão do material com micro/nanofibrilas celulósicas, na durabilidade dos produtos extrudados e limitação de matérias-primas que podem ser utilizadas no processo (FONSECA, *et al.*, 2016).

Uma das principais características da extrusão é que os compósitos a base de cimento *Portland* precisa ter uma baixa relação de água/cimento, entre 0,2 a 0,3. A baixa relação água/cimento melhora a compactação dos compósitos (material pseudoplástico), aumentando a resistência contra intempéries, formando um produto com alta durabilidade (DOURADO, 2015).

2.2 Dióxido de Titânio (TiO₂)

O TiO₂ é um elemento muito utilizado no cotidiano que deriva do minério de titânio. Ele apresenta três modificações cristalinas: rutilo, anatase e bruquita. Só o rutilo e anatase são produzidas comercialmente, sendo o rutilo o mais utilizado. Ele tem maior estabilidade exterior e facilidade em tornar-se opaco, devido ao alto índice de refração dos seus cristais. A anatase é utilizada para objetivos específicos devido à sua cor azulada, sua capacidade de branqueador óptico e sua baixa abrasividade. A bruquita não é uma fase estável, pois se transforma em rutilo (FELTRIN *et al.*, 2013). O TiO₂ apresenta duas propriedades autolimpantes, uma sendo a fotocatalise e a superfície superhidrofílica (sujeira é lavada para fora da superfície, pois ela

forma um filme de água com a superfície). Apesar de só absorver 5% da luz solar que chega na superfície da terra, o TiO_2 continua sendo o melhor fotocatalizador (SILVA, 2019).

Na construção civil, as fachadas sofrem pela ação de agentes degradantes, como poeiras, microrganismos entre outros que causam diversas patologias, o TiO_2 apresenta uma solução para esse problema, já que ele possui propriedades autolimpantes. Devido às suas propriedades físicas e químicas, ele pode ser adicionado em argamassas e concreto para ajudar a minimizar essa adversidade às sujeiras na presença de luz UV (fotocatalizador). Além de ser um material estável quimicamente, não tóxico, barato e de fácil manuseio (JESUS, 2015).

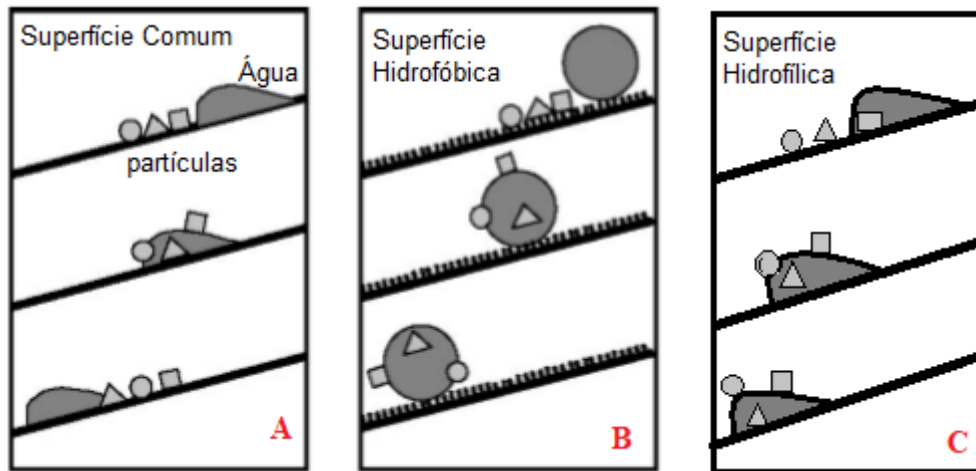
As superfícies autolimpantes veem ganhando espaço no ambiente comercial, já que apresentam economia na manutenção e diminuem o acúmulo de sujeira em vários ambientes em que ela pode ser aplicada, como no setor têxtil (roupas autolimpantes), no automotivo (vidros e lâmpadas), na construção civil (vidros, janelas, fachadas, portas e telhas), na agricultura (estufas), no uso doméstico (banheiros e cozinhas), fotovoltaica (painéis fotovoltaicos) entre outros (JESUS, 2015).

O TiO_2 apresenta propriedades fotocatalíticas que sob incidência da radiação UV do sol, oxigênio e moléculas de água formam agente oxidantes, através de reações químicas, transformando a sujeira em produtos inofensivos. Ele forma uma superfície hidrofílica (ângulo de contato nulo entre a água e a superfície) e elimina a sujidade dela com a ocorrência de chuvas que formam lâminas d'água com o material. Isso significa que a água da chuva escoar sobre a superfície e suspende a sujeira, removendo a mesma (WERLE, 2015).

Um ângulo de contato próximo a 0° , superfície superhidrofílica, significa que um líquido nessa superfície é praticamente todo disperso, escorrendo por ela, que é caso do efeito que o TiO_2 traz para o material. E um ângulo de contato próximo de 180° , superfície superhidrofóbica, o líquido fica suspenso em formato de gotícula na superfície como é o caso da água na superfície de folhas (JESUS, 2015).

Na Figura 3, podem-se observar três formas de superfícies e o comportamento da água para a limpeza das partículas. Assim, na primeira Figura 3 (A) apresenta-se uma superfície comum onde as gotículas de água não têm a capacidade de arrastar as partículas de sujeira; na Figura 3 (B) superhidrofóbica, e Figura 3 (C) superhidrofílica, caso do TiO_2 . No caso das superhidrofóbicas as gotículas de água se prendem a sujeira deslocando elas para fora da superfície (B), já na superhidrofílica as partículas sujas são removidas por água rolante que retira as impurezas da superfície por arrastamento (C) (STAMATE; LAZAR, 2007).

Figura 3 – Comportamento da água e sujeira em: (A) superfície comum, (B) hidrofóbica, e (C) hidrofílica.

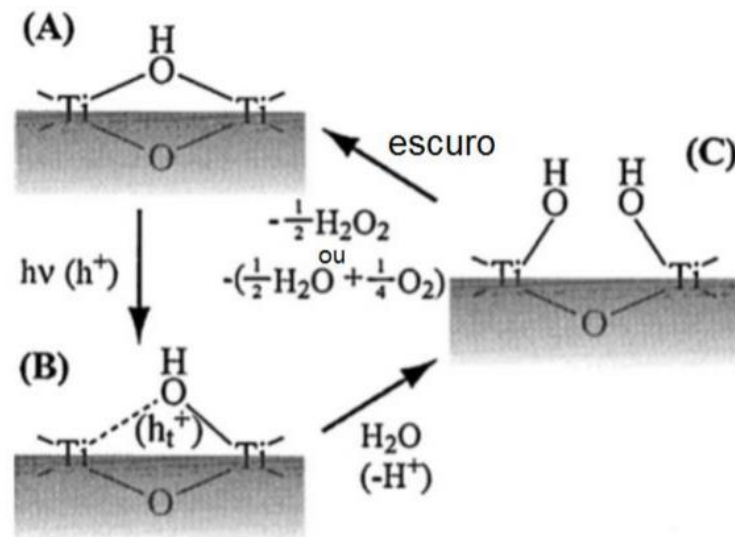


Fonte: Adaptação Stamate; Lazar (2007).

O processo de fotocatalise do TiO_2 acontece em contato com a luz UV e a água, gerando uma reação química entre um átomo de oxigênio do TiO_2 e a água. Com isso, ocorre uma absorção de fótons, aumentando a energia e excedendo a energia do *gap*, ou seja, acontece a mudança do elétron de camada de valência para a camada de condução deixando buracos com potencial positivo na camada de valência do oxigênio (sítios oxidantes) e formando grupos de OH^- na superfície. Nos semicondutores que é o caso do TiO_2 , ele transporta esse buraco com potencial positivo para a superfície, por isso ela pode ser ligada com a água. Essas mesmas moléculas de água irão posteriormente realizar a oxidação dos compostos orgânicos devido ao alto poder reativo da hidroxila em oxidação, acabando com os agentes contaminantes. A superfície se torna superhidrofílica com ângulo de contato próxima de zero, mas se a superfície estiver em uma área escura, esse ângulo de contato aumenta e volta ao seu estado original (TiO_2) após mais ou menos dois dias (SILVA, 2019).

O processo de catálise transforma energia solar em energia química pela ativação de um semicondutor. A catálise do TiO_2 é esquematizado na Figura 4, que demonstra a molécula de TiO_2 liberando duas hidroxilas na presença da luz UV e água para fazer o processo de catálise e arrastar a sujeira para fora da superfície, porém esse procedimento forma um ciclo que no escuro volta a sua forma primitiva, TiO_2 . Esse sistema que gera radicais de hidroxilas é chamado de Processos Oxidativos Avançados (POAs) que são tecnologias limpas e altamente oxidantes, pois seus radicais que degradam a sujeira do ambiente e quanto maior a produção desses radicais, mais eficiente será essa limpeza (SILVA, 2019).

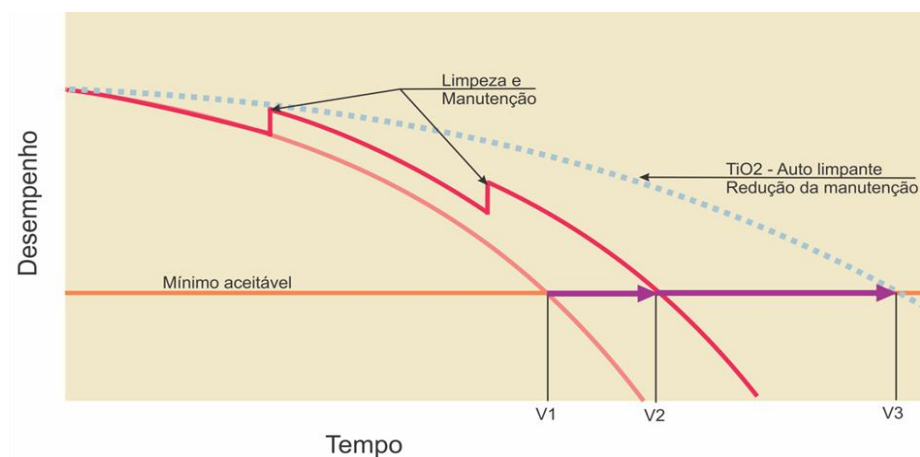
Figura 4 – Ciclo químico do TiO₂ para realizar a função autolimpante.



Fonte: Jesus (2015).

A propriedade da fotocatalise pela ação autolimpante pode aumentar a vida útil do material, já que ela diminui a fluorescência refletida na superfície e o fluxo de luz que cai sobre ela. Na Figura 5, o comparativo de vida útil de um revestimento comum e outro autolimpante é observado, pelo desempenho *versus* tempo. Isso devido a um acréscimo que ocorre no tempo de vida útil (V) quando o material passa por uma manutenção no revestimento comum (linha vermelha), ou seja, ele passa de V1 (vida útil natural do material) para V2 (vida útil após a manutenção). Porém, essa manutenção não traz ao revestimento seu desempenho original, pois ele mesmo causa um desgaste no produto. Já no revestimento com TiO₂ (linha tracejada azul), o acréscimo de vida útil ocorre naturalmente sem contar a limpeza e manutenção, passando de V1 (vida útil natural do material) para V3 (vida útil do material com TiO₂) (WERLE, 2015).

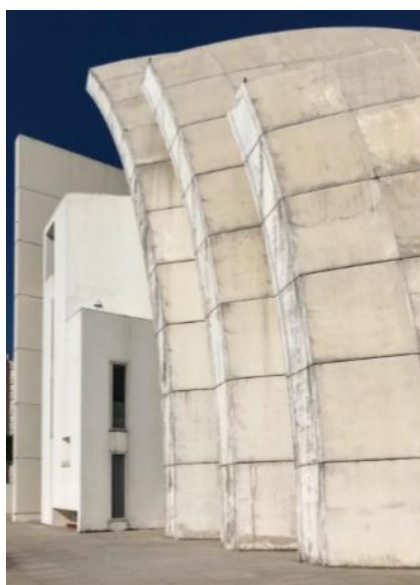
Figura 5 – Gráfico representativo do desempenho x vida útil de material comum e autolimpante.



Fonte: Werle (2015).

A propriedade de durabilidade dos produtos cimentícios com TiO_2 ainda é pouco estudada, por isso a eficiência catalítica não é totalmente comprovada. Além de que, mesmo com adição de TiO_2 , as fachadas precisarão de manutenção depois de anos para voltar a sua aparência original. No caso da igreja *Dives in Misericordia*, em Roma (Figura 6), essa manutenção foi necessária após sete anos, porém o TiO_2 foi eficiente segundo Werle (2015), já que retardou esse processo.

Figura 6 – Templo Dives in Misericórdia.



Fonte: Cardellicchio (2018).

2.3 Propriedades Físicas e Mecânicas

2.3.1 Ensaio Físicos

Rodrigues *et al* (2013) avaliou a adição de cinza de palha de cana-de-açúcar no compósito fibrocimento após 28 dias de cura úmida. Ele não encontrou diferenças estatísticas entre o compósito fibrocimento e o controle (100% cimento *Portland*) pelo teste Tukey a 5% de significância. Os valores encontrados foram para absorção de água de 29,3% e 30,3%, de porosidade 41,3% e 42,1% e massa específica de 1,41 g/cm³ e 1,39 g/cm³ para o compósito controle e o compósito fibrocimento, respectivamente. Com isso, o compósito de cinza com palha de cana-de-açúcar apresenta características físicas semelhantes ao compósito controle. Já em um estudo da utilização de fibra de coco na produção do compósito fibrocimento por Brasileiro, Vieira e Barreto (2013) foram encontrados valores para as propriedades físicas de absorção aparente entre 12 a 37%, de porosidade entre 23 a 37% e densidade entre 0,99 a 2,00 g/cm³. Tonoli (2009) que estudou o compósito fibrocimento com celulose de eucalipto

branqueada encontrou valor de absorção de água de 23,8%, porosidade de 35,2% e densidade de 1,48 g/cm³.

Teixeira (2010) estudou compósitos reforçados com fibras e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar tratada e não tratada após 28 dias de cura. A fibra do bagaço de cana diminuiu a densidade do compósito e aumentou sua porosidade. A diminuição da densidade ocorreu devido ao tratamento químico e a substituição da sílica pela fibra que tem densidade menor. O aumento da porosidade se deve pelo efeito das fibras na microestrutura do compósito, já que a extrusão pode provocar dificuldades na dispersão das matérias-primas do compósito fibrocimento. Os compósitos extrudados com cinza apresentaram maior absorção de água e os compósitos com 5% de fibras apresentaram maior porosidade. As variações das porcentagens de fibras no compósito não tratadas foram de 0%; 0,5%; 1%; 1,5%; 3% e 5%. Os valores de absorção variaram entre 16,22 a 18,77%, de densidade entre 1,64 a 1,75 g/cm³ e de porosidade entre 28,34 a 30,76%. Já para os compósitos tratados, as variações de porcentagens de fibras de bagaço de cana-de-açúcar foram de 0,5%; 1%; 1,5% e 5%. Os valores de absorção foram entre 16,54 a 20,81%, de densidade 1,55 a 1,73 g/cm³ e de porosidade entre 28,38 a 32,39%. Os compósitos de 5% de fibras com 30% de cinzas apresentaram valores de absorção de 25,78%, de densidade 1,45 g/cm³ e porosidade de 37,49%.

Já Mendes (2014), avaliou compósitos fibrocimento extrudados com polpa de celulose de eucalipto e acrescentou diferentes tipos de silanos, metiltrimetoxisilano (MTMS), isobutiltrimetoxisilano (IBTMS) e n-octiltriethoxisilano (OTES), além da amostra sem aditivos após 28 dias de cura. Foram encontrados valores para densidade entre 1,75 a 1,86 g/cm³, para absorção de água entre 20,89 a 24,74% e para porosidade entre 38,03 a 44,87%. Todos os compósitos com silanos tiveram sua densidade aumentada devido as ligações químicas entre as fibras e os silanos, melhorando a interação fibra-matriz dos fibrocimentos. Os compósitos com silanos IBTMS e OTES apresentaram menores absorção de água e porosidade tendo igualdade estatística e diferença dos demais, assim essas polpas devem absorver menor umidade. O compósito com MTMS apresentou maior valor médio de absorção de água e porosidade devido à má dispersão da polpa na matriz cimentícia.

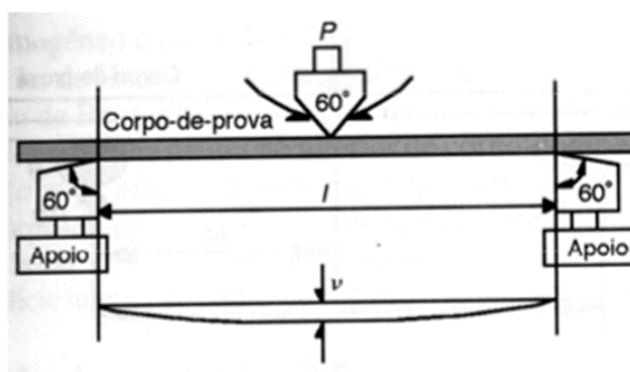
2.3.2 Ensaio Mecânicos

No ensaio de flexão simples se verificam quatro tipos de esforços, a compressão e tração paralelas às fibras, o cisalhamento e compressão (LOPES, 2017). Esse ensaio é muito utilizado em materiais fibrosos como medida indireta da resistência à tração e da energia específica. Segundo a NBR 12142 (2010), é recomendado que esse ensaio seja feito em placas chatas, já

que o carregamento é de flexão, ou seja, aplicada em todo o material. Esse material também facilita a reprodução do ensaio diversas vezes, sendo de fácil execução e ajudando na análise e comparação dos resultados de pesquisa (TONOLI, 2006).

Muitos trabalhos e pesquisas sobre o fibrocimento analisam o comportamento mecânico das fibras de celulose curtas ou polpas pelo ensaio de flexão de três ou quatro pontos, por meio de seções finas. Por isso, pela norma (ISO 8336:2017), o Módulo de Ruptura (MOR) pode ser estabelecido através de três pontos, que são os dois apoios onde o compósito fibrocimento está sustentado e uma carga crescente aplicada na barra, como pode ser visto na Figura 7. A relação entre a distância dos suportes do apoio e a espessura do compósito fibrocimento deve ser maior que 15 cm (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

Figura 7 – Ensaio de Flexão em três pontos.



Fonte: Ruchert (2018).

Rodrigues et al (2013) encontrou valores para MOR de 7,13 e 7,02 MPa, para limite de proporcionalidade (LOP) de 2,92 e 2,17 MPa, para módulo de elasticidade (MOE) de 6,58 e 6,95 GPa e para a relação MOR/LOP foram 2,43 e 3,23, para o compósito com cimento e para o compósito com fibras e cinza de palha de cana-de-açúcar, respectivamente. Houve diferenças estatísticas para LOP e na relação MOR/LOP entre os compósitos. Isso indica que as fibras aumentaram a resistência a tração na flexão dos compósitos, pois as cinzas podem ter consumido hidróxido de cálcio diminuindo a alcalinidade do compósito e protegendo as fibras e melhorando sua aderência na matriz. Os valores de MOR foram similares entre o compósito controle e o de fibrocimento.

Já Teixeira (2010) encontrou valores para as variações das porcentagens de 0%; 0,5%; 1%; 1,5%; 3% e 5% para fibras e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar no compósito não tratadas após 28 dias de cura. Os valores de MOR variaram entre 9,50 a 11,57 MPa, de LOP entre 8,90

a 10,77 MPa e de MOE entre 3549 a 4326 MPa. Para os compósitos tratados, as variações de porcentagens de fibras de bagaço de cana-de-açúcar foram de 0,5%; 1%; 1,5% e 5%. Os valores de MOR foram entre 9,61 a 10,76 MPa, de LOP entre 9,00 a 10,27 MPa e de MOE entre 3087 a 4177 MPa. Os compósitos de 5% de fibras com 30% de cinzas apresentaram valores de MOR de 5,79 MPa, de LOP de 5,56 MPa e de MOE de 2309 MPa. Os valores de MOR não apresentaram diferenças significativas entre suas diferentes porcentagens e tratamentos químicos. Porém o valor de MOR para compósitos de 5% de fibras com 30% de cinzas apresentou um decréscimo, já que a substituição de mais de 20% do cimento *Portland* causa queda na resistência.

Para os compósitos fibrocimento extrudados com polpa de celulose de eucalipto e com acréscimo de diferentes tipos de silanos: MTMS, IBTMS e OTES, além da amostra sem aditivos após 28 dias de cura, Mendes (2014), encontrou valores para MOR entre 6,42 a 8,29 MPa, para LOP entre 6,2 a 8,17 MPa, para MOE entre 2990 a 5093 MPa e para a relação MOR/LOP 1,02 e 1,04. As modificações químicas das polpas aumentaram as propriedades mecânicas do compósito fibrocimento devido ao melhoramento da interface fibra-matriz. Os compósitos com silanos de IBTMS e OTES obtiveram maiores valores médios de MOR e LOP, se diferenciando estaticamente dos outros tratamentos. O compósito com OTES também apresentou o maior valor de MOE, associado à sua menor absorção de água e porosidade e uma maior ligação fibra-matriz.

Santana (2016) estudou o compósito fibrocimento com reforço de curauá e com polipropileno, ambos em cura térmica. A autora encontrou valores de MOR/LOP de 1,17 e 1,7, respectivamente. Essa relação MOR/LOP corresponde ao ganho de resistência após a primeira fratura, ou seja, quando a fibra começa a atuar como reforço no cimento. Os compósitos com fibras de polipropileno apresentaram maior valor MOR/LOP, já que essa fibra apresenta maior valor de MOR que a de curauá e não está sujeita a degradação química, além de ter uma espessura menor que a de curauá. Tonoli (2009) encontrou valores de MOR, LOP e MOE para compósitos fibrocimento com celulose branqueada de eucalipto de 9,4 MPa; 5,5 MPa e 7600 MPa, respectivamente.

2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Um microscópio tem como função básica tornar visível para o humano o que for muito pequeno para o mesmo enxergar. Antigamente se usava uma lupa para isso, depois surgiu o microscópio óptico, que incide uma luminosidade na superfície do material, seja ela uma luz visível ou UV. O limite de imagem dos microscópios ópticos é o efeito da difração que resulta

do comprimento de onda da radiação refletida, sendo esse limite um aumento máximo de 2000 vezes. Para atingir valores maiores de resolução precisa-se utilizar uma radiação com comprimento de onda menor que a luz perceptível a olho nu usada no aparelho para iluminar o objeto. Precisa-se, também, de uma superfície perfeitamente polida, já que a profundidade de campo é inversamente proporcional ao aumento (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Para solucionar o problema de resolução pode-se utilizar um microscópio eletrônico de varredura, conhecido como MEV. Ele usa um feixe de elétrons no lugar de fótons que são empregados no microscópio óptico convencional e soluciona o problema da fonte de luz branca (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). Essa técnica de caracterização vem sendo muito utilizada na construção civil para materiais cimentícios, obtendo grandes avanços nessa área e abrangendo materiais como concreto e argamassa.

Os microscópios eletrônicos utilizam feixes de elétrons (elétrons primários) para formar uma imagem da amostra, assim o que controla o caminho desses elétrons são lentes eletromagnéticas ou eletrostáticas (SHARIF, 2016). Ele amplifica as imagens muito pequenas e suas resoluções, podendo ver mais detalhes que um microscópio óptico comum. Também fornece informações morfológicas e químicas de uma amostra, por isso é muito utilizado em áreas como biologia, odontologia, farmácia, engenharia, química, metalurgia, física, medicina e geologia (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). O MEV permite obter uma ampliação da imagem de até 200.000 vezes e imagens tridimensionais da amostra, porém ela não pode ser transparente aos feixes de elétrons (BARRETO, 2012).

O MEV também está sendo utilizada em pesquisas de nanomateriais, já que sua resolução é maior e ela é um dos instrumentos mais versáteis para análises de características microestruturais. Ele pode atingir uma resolução em instrumentos avançados de até 1 nanômetro, enquanto que instrumentos comerciais chegam a valores de 2 a 5 nm. O MEV atua na topografia da superfície do objeto e sua textura, isso ocorre através dos elétrons secundários que formam as imagens de alta definição. Também atua na morfologia que é a forma e o tamanho da partícula, demonstra como os grãos são organizados no compósito e apresenta a composição do material, ou seja, pelos elétrons retroespalhados a imagem fornece informações sobre a variação da composição (MALISKA, 2003).

2.5 Ciclos de Imersão e Secagem

Os materiais cimentícios podem envelhecer de maneira natural, ou seja, ao longo do tempo ele sofre ação do intemperismo, como chuvas, calor, mudanças de temperatura, além de sofrer

com a manutenção do próprio material. Ele pode envelhecer de modo acelerado em laboratório simulando as ações reais do tempo que o material irá enfrentar. Com isso, podem-se estudar as características físicas, químicas e mecânicas do compósito. Esse envelhecimento acelerado pode ajudar em pesquisas sobre a durabilidade do fibrocimento, devido a solubilidade alcalina que formam nos poros do cimento ao longo do tempo, degradando as fibras. Desse modo, a resistência desse material pode ser analisada, os efeitos e suas falhas prematuras, causadas pelo envelhecimento (COELHO, 2017).

Ciclos de umedecimento e secagem simulam condições de calor e chuva, ou seja, o intemperismo, assim, pode-se analisar uma prévia de como a telha de fibrocimento irá se comportar ao longo do tempo e com isso analisar melhor sua durabilidade. Essas condições aceleram o ataque da água aos poros alcalinos da matriz-fibra, também impulsionam o deslocamento de produtos de hidratação para as fibras. Assim, esse método preenche e esvazia a estrutura dos poros capilares do compósito, expondo as fibras à solução de produtos alcalinos (MOHR, 2005).

Dois métodos podem ser utilizados em laboratório para fazer o envelhecimento acelerado de materiais que são os ciclos repetidos de imersão e secagem e a imersão em água quente. O primeiro é utilizado mais para descobrir a degradação causada pela variação de umidade. Já o segundo, analisa as interações químicas dos agregados do material. O método de imersão e secagem investiga a perda de resistência mecânica dos materiais envelhecidos e suas variações dimensionais. A norma ASTM C1560-3 (2012) aborda que acelerando os produtos da hidratação, também acelera a degradação das fibras e o envelhecimento do compósito cimentício (COELHO, 2017).

Compósitos de fibrocimento com cimento *Portland* que passam por processos de envelhecimento em ambientes úmidos têm redução das suas resistência e tenacidade, isso porque eles são sensíveis aos efeitos da umidade. Diminuindo a resistência a tração das fibras devido a mineralização dessas, causada pela migração de produtos de hidratação para a estrutura das fibras, assim esse processo também aumenta o arrancamento da fibra após a fratura (SOROUSHIAN; WON; HASSAN, 2012).

As telhas onduladas de fibrocimento também sofrem danos causados pela lixiviação. Ela causa um enfraquecimento dos compósitos a base de cimento *Portland*, com isso compostos como portlandita, etringita, gesso e C-S-H podem ser removidos da matriz por percolação ou fluxo de água. A lixiviação também causa degeneração na sua resistência mecânica, pois

mesmo as telhas de fibrocimento sendo muito finas o que acarreta em menores profundidades de corrosão, ela gera impactos na sua força de curvatura. E se a telha for de amianto, ele pode ser liberado na atmosfera através da lixiviação. A chuva ácida pode causar maior destruição que a própria lixiviação, pois degrada o material na superfície que migra para o interior do material e para o núcleo das fibras causando um impacto significativo de deterioração prejudicando o material (DIAS, *et al.*, 2008).

Muitas pesquisas avaliam a durabilidade dos materiais, através das propriedades mecânicas após seu envelhecimento. Com isso, testes mecânicos anteriores averiguaram que a deterioração das propriedades mecânicas do material não aumenta quanto mais ciclo de envelhecimento forem feitas, ou seja, não ocorrem de maneira linear. A maioria das perdas de força e resistência acontecem nos primeiros cinco ciclos de envelhecimento de imersão e secagem (MOHR; BIERNACKI; KURTIS, 2006).

Pela norma da NBR 13554 (2012), o ensaio de imersão e secagem é feito por seis ciclos com 5h de molhagem, imerso em água, e 42h de secagem em estufa a temperatura de $71\pm 2^{\circ}\text{C}$. Já a NBR 15498 (2016) recomenda que o ensaio de envelhecimento acelerado seja feito 50 ciclos de imersão e secagem.

Esse envelhecimento acelerado de imersão e secagem causa a desconexão do fibrocimento, a reprecipitação e fragilização da fibra pela mineralização. As fibras, quando o fibrocimento é produzido, podem se encolher e inchar sem barreiras e impedimentos. Na secagem, ocorre o encolhimento da fibra que causa uma pressão no interior dessa, expelindo uma solução porosa, assim causando a reprecipitação de produtos de hidratação. Quando molhada, a fibra sofre inchaço e seu espaço é restringido. Na próxima secagem acelerada, o encolhimento da fibra será menor e a força para expulsar a solução porosa também será menor. Assim, a solução porosa permanecerá nas fibras, o que acarretará em uma deposição de produtos de hidratação como CH (hidróxido de cálcio) na parede celular da fibra, diminuindo sua ductilidade (MOHR; BIERNACKI; KURTIS, 2006).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Materiais

Na Tabela 1 estão definidos os traços dos compósitos fibrocimentos, com base em uma unidade de cimento (1 kg). Assim, como no presente trabalho, foram utilizados 3,9 kg de cimento em todos os compósitos, a quantidade dos demais materiais variaram de acordo com essa massa. A quantidade de calcário alterou-se conforme a massa de TiO₂ acrescentada. Foram utilizados 323,7 g de fibras de celulose branqueada, 66,3 g de ADVA e HPMC e 156 g de água para cada traço dos compósitos.

Tabela 1 – Traço dos materiais para a confecção dos compósitos fibrocimentos.

Corpos de Prova	Cimento	Calcário	Fibra	ADVA	HPMC	TiO ₂	a/c
0%	1	0,55	0,083	0,017	0,017	0	0,4
5%	1	0,523	0,083	0,017	0,017	0,027	0,4
10%	1	0,495	0,083	0,017	0,017	0,055	0,4
15%	1	0,467	0,083	0,017	0,017	0,083	0,4
20%	1	0,44	0,083	0,017	0,017	0,11	0,4

Fonte: Autor (2020).

Utilizou-se o cimento *Portland* CPV-ARI (NBR 16697:2018) para a confecção dos compósitos fibrocimentos com celulose branqueada, na proporção de 60% da massa total fabricada, a qual foi de 6,5 kg. A fibra utilizada para dar resistência ao compósito foi a celulose branqueada de eucalipto (*Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*). Também foram adicionados 33% de calcário (filler carbonático – calcário agrícola moído) à mistura com 0% de TiO₂. Após esse processo, adicionou-se poliéster carboxílico (ADVA) na proporção de 1% em relação à massa total e 1% de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), sendo o primeiro com a função de reduzir a quantidade de água na mistura e o segundo, um modificador reológico à base de celulose. Foi acrescentada 5% da fibra de celulose branqueada em relação à mistura total. Esses valores de porcentagem foram escolhidos com base em pesquisas anteriores (MENDES, 2014; TERRA; PAULA; SCHNEIDER, 2017).

Nesses compósitos, foram adicionadas diferentes porcentagens de TiO₂ em relação à quantidade de calcário, substituindo-o. Desta forma, foram produzidos compósito fibrocimento com 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de TiO₂. A relação de água/cimento adotada foi de 0,4.

A Figura 8 (A) representa a celulose branqueada utilizada para a produção do fibrocimento, enquanto que na Figura 8 (B) tem-se o TiO_2 empregado com o objetivo de melhorar as propriedades autolimpantes.

Figura 8 – Materiais empregados: (A) - Celulose Branqueada, (B) – TiO_2 (rutilo).



Fonte: Imagem A – Autor (2017); Imagem B: Artesp (2020).

3.2 Métodos

Na primeira etapa desse trabalho foram confeccionados os compósitos fibrocimentos com celulose branqueada com acréscimos de diferentes porcentagens de TiO_2 . Após a produção e decorridos o tempo de cura, foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas desses compósitos. Também avaliou-se a ligação das fibras com a matriz cimentícia através da técnica do MEV.

Em uma segunda etapa de estudos, quantificou-se o comportamento físico nos compósitos fibrocimentos após 6 ciclos de imersão em água e secagem. Para análise e conclusão desses resultados, empregaram-se os testes estatísticos ANOVA e Tukey. Cada etapa será descrita detalhadamente a seguir.

3.2.1 Compósitos Fibrocimentos

Todos os materiais para a produção do compósito fibrocimento foram pesados de acordo com a proporção proposta. Primeiramente, introduzindo o cimento, calcário e o HPMC na argamassadeira, da marca G. Paniz e promovendo sua mistura em uma rotação de 140 rpm por um período de 2 minutos. Posteriormente, foi adicionada a polpa de celulose, o TiO_2 , o ADVA e a água, permanecendo em rotação de 285 rpm por mais 5 minutos, a fim de promover a distribuição homogênea dos materiais.

Após esse processo, o material foi transferido para a extrusora da marca VERDÉS, modelo 052, com velocidade de rotação na rosca helicoidal de 32 rpm, onde foi processado três vezes antes de se modarem os compósitos fibrocimentos utilizados na pesquisa. Desta forma, a massa

foi homogeneizada e as fibras puderam ter uma melhor orientação no sentido da extrusão. Os compósitos foram moldados em formatos retangulares, com dimensões de 30 mm x 200 mm x 20 mm (largura, comprimento e espessura). Foram produzidos 30 compósitos fibrocimentos por tratamento (para cada porcentagem de TiO₂ acrescentada, além do tratamento padrão, com 0%).

Para o processo de cura, os compósitos fibrocimentos foram envoltos em sacos plásticos úmidos e selados (ambiente saturado) e mantidos em temperatura ambiente por 28 dias. Após esse período, os compósitos fibrocimentos foram utilizados para a caracterização das propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos compósitos produzidos. As amostras foram imersas em água na temperatura ambiente por 24h para a realização dos ensaios físicos.

A dimensão dos compósitos fibrocimentos foi escolhida com base em pesquisas anteriores (SILVA, 2015; TERRA; PAULA; SCHNEIDER, 2017), já que a NBR 15498 (2016) define placa cimentícia como produtos derivados da mistura entre cimento *Portland*, agregados, adições ou aditivos com reforço de fibras, fios, filamentos ou telas, com exceção de fibras de amianto, e não estipula tamanhos para as amostras, somente recomenda que a espessura não seja superior a 3 cm. Os compósitos fibrocimentos com celulose branqueada padrão, ou seja, sem a adição de TiO₂, foram confeccionados a fim de que comparar as propriedades físicas e mecânicas dos fibrocimentos com diferentes porcentagens de TiO₂.

3.2.2 Ensaios Físicos

Os compósitos fibrocimento foram avaliados quanto à absorção, densidade aparente e porosidade aparente, baseado na ASTM C94881 (2001), a qual utiliza a técnica de imersão pelo princípio de Arquimedes. Os compósitos fibrocimentos, após a cura, foram imersos em água à temperatura ambiente por 24h e realizou-se a medição de sua massa imersa (Mi). Logo após a imersão, os compósitos fibrocimento foram superficialmente secos (condição de superfície saturada seca) e pesados, aferindo sua massa úmida (Mu). Depois, foram deixados em uma estufa à 70°C, por 24h, para promover a secagem das amostras e determinar sua massa seca (Ms). Avaliaram-se 8 compósitos fibrocimentos por tratamento. A absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA) foram determinadas empregando a Equação 1, Equação 2 e Equação 3, respectivamente.

$$AA (\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100 \quad (\text{Equação 1})$$

$$DA \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{Ms}{Mu - Mi} \quad (\text{Equação 2})$$

$$PA (\%) = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} * 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

Mu: Massa úmida (g);

Ms: Massa seca (g);

Mi: Massa imersa (g);

AA: Absorção de água (%);

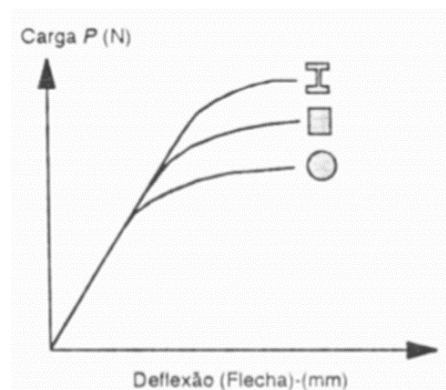
DA: Densidade aparente (g/cm³);

PA: Porosidade aparente (%).

3.2.3 Ensaios Mecânicos

O ensaio de flexão consiste na aplicação de cargas crescentes em determinados pontos da barra para formar o gráfico Carga *versus* Deformação Máxima (deflexão), apresentado na Figura 9. Nesse gráfico, podem-se obter o valor do LOP, a tensão última (MOR) e o MOE.

Figura 9 – Gráfico carga x deflexão de um compósito.



Fonte: Ruchert (2018).

O LOP é a carga máxima que o material atinge logo após a parte linear da curva terminar, ou seja, a tensão máxima no regime linear elástico que significa a tensão máxima do material na primeira fissuração do compósito. Já, o MOR é a tensão máxima atingida pelo material, a carga máxima representada no gráfico e avalia a resistência a tração do mesmo material, ótimo indicativo para sua eficiência em revestimentos ou elementos estruturais, pois está relacionado ao reforço que as fibras traz à matriz cimentícia.

O MOE é determinado pela NBR 8522 (2017) e fornece a relação entre tensão aplicada no material e a deformação causada por ela. É indicado pela tangente do ângulo de inclinação da curva do gráfico durante a deformação. Esses parâmetros são relacionados, normalmente, à idade de 28 dias (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

Antes do ensaio de flexão foram medidas, em três posições diferentes, a largura e a espessura dos compósitos fibrocimentos, com o auxílio de um paquímetro digital. Realizou-se o ensaio mecânico de flexão em uma Máquina de Ensaio Universal da marca Arotec, equipada com célula de carga de 20 kN, com uma configuração de três cutelos, vão de 140 mm e velocidade de ensaio de 1,5 mm/min. Assim como procedido nos ensaios físicos, foram avaliados 8 compósitos fibrocimento por tratamento. O MOR, o MOE e o LOP foram calculados empregando-se a Equação 4, Equação 5 e Equação 6, respectivamente.

$$MOR (MPa) = \frac{3 * P_{m\acute{a}x} * v\tilde{a}o}{2 * b * d^2} \quad (\text{Equação 1})$$

$$MOE (MPa) = \frac{v\tilde{a}o^3 * (C_2 - C_1)}{4 * (D_2 - D_1) * b * d^3} \quad (\text{Equação 2})$$

$$LOP (MPa) = \frac{3 * C_{LOP} * v\tilde{a}o}{2 * b * d^2} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

$P_{m\acute{a}x}$: Carga Máxima Aplicada (N)

C_{LOP} : Carga Máxima Aplicada antes da curva tensão-deformação (N);

b : Largura do corpo de prova (mm);

d : Espessura do corpo de prova (mm);

C_1 : Carga dentro do regime elástico, menor que C_2 (N);

C_2 : Carga dentro do regime elástico, maior que C_1 (N);

D_1 : Deformação dentro do regime elástico, menor que D_2 (mm);

D_2 : Deformação dentro do regime elástico, maior que D_1 (mm).

MOR : Módulo de Ruptura (MPa);

MOE : Módulo de Elasticidade (MPa);

LOP : Limite de Proporcionalidade (MPa)

3.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Fez-se a caracterização microestrutural via análise das imagens de fragmentos do fibrocimento pela técnica do MEV, a fim de se avaliar o arranjo das partículas de TiO_2 com a matriz cimentícia e a distribuição das fibras no compósito, assim como a interface matriz-fibra. Foi necessário, para realizar esse processo, metalizar as amostras, após o teste mecânico com ouro, melhorando a definição das imagens obtidas. Após essa metalização, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura LEO EVO 40 XVP com sistemas de microanálise de raios X da Bruker (Quantax EDS e Software Espirit) e de criotransferência e criobservação da Gatan (Alto 1000) (DFP, 2020).

3.2.5 Ciclos de Imersão e Secagem

O processo de imersão e secagem teve o objetivo de analisar o comportamento das fibras ao sofrerem os efeitos do ambiente (chuvas e os raios solares) e o ataque da água alcalina aos poros das fibras. Assim, como previsto na norma NBR 13554 (2012), foram feitos seis ciclos de imersão e secagem, sendo cada ciclo de 5h com os compósitos fibrocimentos imersos em água e 42h de secagem em uma estufa com temperatura de $71 \pm 2^\circ\text{C}$.

3.2.6 Análise Estatística

As variações nos resultados das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos fibrocimentos foram analisadas através do *software* SISVAR (OLIVEIRA, 2016) e foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e ao teste Tukey, o qual compara os tratamentos entre si a 5% de significância. O nível de significância indica um risco de 5% de concluir que houve uma diferença significativa, quando não houve essa diferença, ou seja, a taxa de erro.

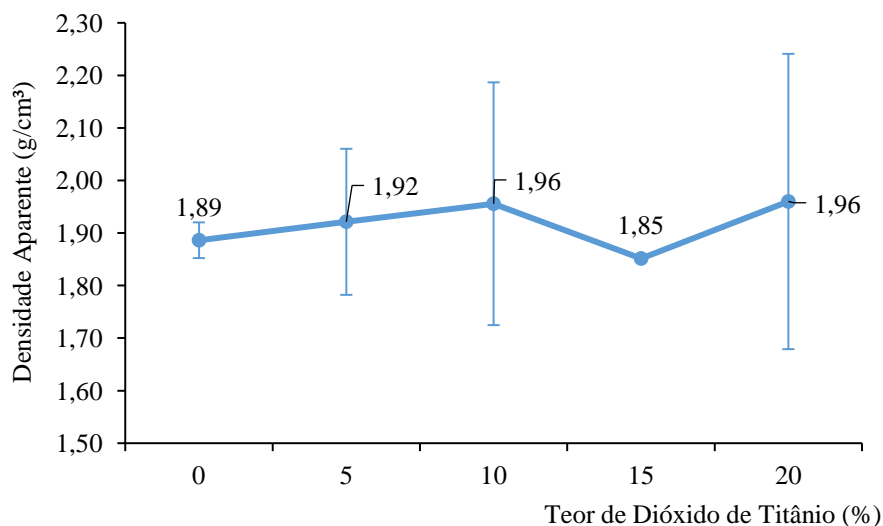
A ANOVA analisa a variância entre os dados, isto é, se existem diferenças significativas entre os tratamentos, seja entre a variação de compósitos fibrocimentos do mesmo tratamento, seja entre os diferentes tratamentos (diferentes porcentagens de adição de TiO_2). Já o teste Tukey identifica em quais tratamentos ocorreram ou não essas diferenças significativas. O desvio padrão foi calculado isoladamente entre as repetições dos compósitos fibrocimento para cada porcentagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades física dos compósitos após a cura

A Figura 10 apresenta o gráfico com os valores médios de cada porcentagem de TiO_2 dos compósitos fibrocimento para a propriedade de densidade com seus respectivos desvios padrão, 28 dias após a cura. Os compósitos fibrocimentos com 10% e 20% de TiO_2 apresentaram maiores valores absolutos de densidade aparente pelo comportamento do gráfico e o compósito com 15% apresentou o menor valor absoluto de densidade. Os valores de densidade para os compósitos fibrocimentos não apresentaram relação direta o aumento do TiO_2 .

Figura 10 – Gráfico densidade aparente por tratamento com seu referente desvio padrão após 28 dias de cura.



Fonte: Autor (2020).

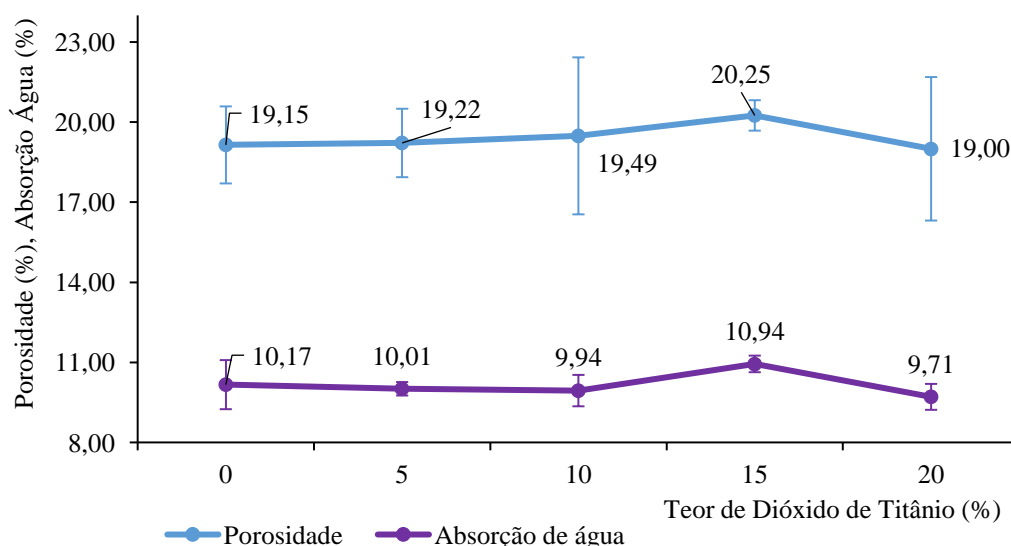
A Figura 11 apresenta os valores médios dos compósitos fibrocimentos para as propriedades de porosidade e absorção de água, com seus respectivos desvios padrão, 28 dias após a cura. O comportamento no gráfico da propriedade física absorção de água decresceu em relação à densidade, sendo inversamente proporcional, ou seja, os compósitos fibrocimentos que apresentaram maiores valores absolutos de densidade aparente, tiveram menores valores absolutos de porcentagem de absorção de água. O aumento da densidade aparente origina compósitos fibrocimentos mais densos e com menos espaços vazios, melhorando a interação fibra-matriz, o que explica a diminuição da porcentagem de absorção de água e porosidade (SILVA, 2015).

Os compósitos com maior porcentagem de absorção de água absorverão mais água do ambiente externo, aumentando a pressão no interior dos seus poros. Com a tensão de tração,

surgirão rachaduras nos compósitos que irão expandir. As fibras e o TiO_2 (reduz o volume dos poros por seu efeito de preenchimento) podem aumentar a densidade, resistência mecânica e a durabilidade dos compósitos fibrocimentos (LI *et al*, 2018). Isso corroborando com o fato de a densidade e a absorção de água dos compósitos serem inversamente proporcionais nesse estudo.

A relação entre as propriedades de porosidade e absorção de água apresentam o mesmo comportamento, como pode ser observado na Figura 3, corroborando com a ligação que essas propriedades físicas normalmente apresentam, são proporcionais, já que a demanda de água, a área superficial e o volume de vazios são relacionados entre si (MENDES, 2014).

Figura 11 – Comparação entre as porcentagens de porosidade e absorção de água para os tratamentos com seus referentes desvios padrão após a cura.



Fonte: Autor (2020).

Os resultados estatísticos das propriedades físicas dos compósitos são apresentados na Tabela 2. A única diferença significativa verificada entre os tratamentos com diferentes porcentagens de TiO_2 para a propriedade física foi na análise da absorção de água. Enquanto que entre suas repetições, ou seja, nos compósitos fibrocimentos com a mesma quantidade de TiO_2 , não houve diferenças significativas, assim como para as outras propriedades físicas de porosidade e densidade aparente que não apresentaram variâncias entre seus tratamentos e nem entre suas repetições.

Tabela 2 – Análise estatística das propriedades físicas pela ANOVA dos compósitos fibrocimentos após a cura.

Fonte de Variação	GL	Absorção Água (%)	Porosidade (%)	Densidade (g/cm³)
Tratamentos	4	S	NS	NS
Repetições	7	NS	NS	NS
Médias		10,14	19,40	1,92
CV (%)		5,06	9,72	8,92

GL: grau de liberdade; CV: erro experimental; S: diferença significativa; NS: não apresentou diferença significativa.

Fonte: Autor (2020).

Os valores do teste Tukey seguem apresentados na Tabela 3, onde as médias de cada tratamento são evidenciadas, bem como seu desvio padrão e uma letra minúscula, a qual representa a diferença estatística entre elas pela análise de variância.

Tanto a densidade, quanto a porosidade apresentam igualdade estatística, ou seja, seus valores podem ser considerados equivalentes entre as diferentes porcentagens de TiO₂. Já na propriedade absorção de água, o compósito fibrocimento de 15% de TiO₂ apresentou diferença em relação aos resultados obtidos com as demais porcentagens (valor maior que os demais tratamentos). Os resultados de absorção para os compósitos com porcentagens de 0%, 5%, 10% e 20% são estatisticamente iguais.

Normalmente, a capacidade de absorção de água do compósito fibrocimento está relacionada à porosidade, porém a porosidade não apresentou diferença estatística entre nenhum tratamento, diferindo do compósito 15% em absorção de água.

Tabela 3 – Análise estatística pelo teste Tukey para propriedades físicas de cada tratamento com seus respectivos desvios padrão após a cura.

Corpos de Prova	Densidade (g/cm³)	Porosidade (%)	Absorção de Água (%)
0%	1,89 ± 0,03 a	19,15 ± 1,44 a	10,17 ± 0,92 b
5%	1,92 ± 0,14 a	19,22 ± 1,28 a	10,01 ± 0,25 b
10%	1,96 ± 0,23 a	19,49 ± 2,94 a	9,94 ± 0,59 b
15%	1,85 ± 0,01 a	20,25 ± 0,57 a	10,94 ± 0,31 a
20%	1,96 ± 0,28 a	19,00 ± 2,69 a	9,71 ± 0,49 b

Médias seguidas da mesma letra indicam que não houve diferença significativa pelo teste Tukey, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Autor (2020).

Para materiais utilizados na construção civil com o intuito de serem coberturas, as propriedades físicas de densidade aparente, absorção de água e porosidade devem apresentar baixos valores médios. Também levando em consideração que quanto menor a porosidade e maior densidade do compósito, uma matriz cimentícia se torna menos porosa e com melhor ligação da fibra com a matriz (RAABE, 2017). No presente trabalho somente o compósito de 15% apresentou diferença estatistíssima com os demais compósitos na propriedade de absorção de água, aumentando 7,57% em relação ao compósito padrão. Assim, ele foi considerado o compósito menos viável para a finalidade de telhas de coberturas. Isto pode ser relacionado a formação de poros pela má dispersão das fibras na matriz cimentícia no processo de extrusão (MENDES, 2014). Essa característica é negativa para o compósito, pois gera defeitos em sua microestrutura (FONSECA, 2016).

Segundo a NBR 7581-01 (2014), as telhas de fibrocimento devem apresentar porcentagem de absorção de água igual ou inferior a 37%, assim, todos os compósitos fibrocimentos desse trabalho obtiveram uma porcentagem inferior ao valor máximo da norma. Isso pode ser associado ao processo de produção do fibrocimento, já que a extrusão produz compósitos fibrocimentos mais compactos e com menor porosidade (RAABE, 2017).

Estudos feitos anteriormente foram analisados e comparados seus resultados com o presente trabalho. Brasileiro, Vieira e Barreto (2013), estudaram o fibrocimento com fibras de coco e a adição de areia nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos. Os autores encontraram valores de absorção de água entre 12 a 37%, porosidade entre 23 a 37% e densidade aparente entre 0,99 a 2 g/cm³. A média de densidade (1,92 g/cm³) calculada nesse trabalho ficou no intervalo apresentado anteriormente, já a porosidade (19,4%) e absorção de água (10,14%) obtidas foram menores. Tonoli (2009) que estudou o compósito fibrocimento com celulose de eucalipto branqueada encontrou valor de absorção de água de 23,8%, porosidade de 35,2% e densidade de 1,48 g/cm³. Os valores médios de porosidade e absorção de água encontradas no presente trabalho diminuíram, 134,7% e 81,44%, respectivamente, já a densidade aumentou 29,73% em comparação com os valores médios de Tonoli (2009). Isso ocorreu pelo efeito de preenchimento do TiO₂ que reduz o volume dos poros do compósito, diminuindo a absorção de água e porosidade e aumentando a densidade. (LI *et al.*, 2018).

Rodrigues *et al* (2013), que analisaram o fibrocimento com cinza de palha de cana-de-açúcar, encontraram média de absorção de água entre 29,3 a 30,3%, porosidade entre 41,3 a 42,1% e densidade entre 1,39 a 1,41 g/cm³. Teixeira (2010) estudou o fibrocimento extrudado com diferentes porcentagens de cinza de bagaço de cana não tratada de 0 a 5% e encontrou

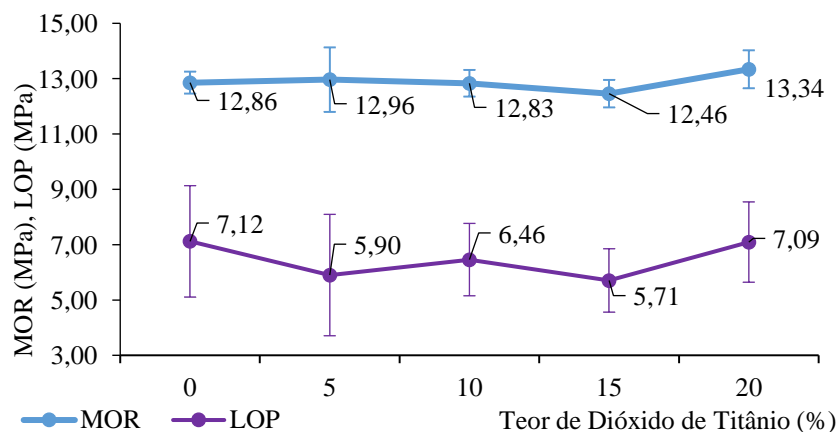
valores de absorção de água entre 16,22 a 18,77%, de porosidade entre 28,34 a 30,76% e densidade aparente de 1,64 a 1,75%. Nesses trabalhos os intervalos encontrados de absorção de água e porosidade foram maiores que a do presente trabalho, enquanto que de densidade foi menor. As diferenças de valores encontrados entre as pesquisas estão relacionadas pelas variedades de fibras e o tipo de matriz cimentícia, pelo processo de produção entre outros fatores que afetam na produção do fibrocimento.

Outro exemplo, Mendes (2014) encontrou para fibrocimentos com polpa celulósica extrudados e modificados com silanos, valores de 20,89 a 24,74%, de 38,08 a 44,87% e 1,75 a 1,86 g/cm³ de absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente, respectivamente. No presente trabalho, os valores de absorção de água e porosidade ficaram abaixo do intervalo encontrado por Mendes (2014) e a densidade foi acima desses intervalos.

4.2 Propriedades mecânica dos compósitos após a cura

A Figura 12 apresenta o gráfico para a propriedade mecânica de MOR e LOP para os compósitos fibrocimentos, com seus respectivos desvios padrão, após 28 dias de cura. A Figura 13 apresenta o gráfico de MOE para os mesmos compósitos. Os comportamentos dos gráficos das propriedades mecânicas não apresentaram relação entre si nos diferentes tratamentos e também em relação ao aumento da porcentagem de TiO₂.

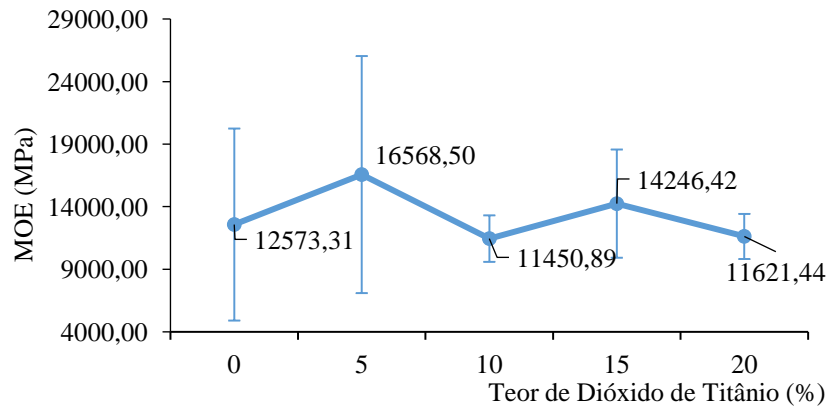
Figura 12 – Gráfico MOR e LOP por tratamento com seu referente desvio padrão após a cura.



Fonte: Autor (2020).

Pelo comportamento do gráfico, o compósito de 20% de TiO₂ obteve maior valor absoluto de MOR. Já o compósito padrão apresentou o maior valor absoluto de LOP. O maior valor absoluto de MOE no gráfico da Figura 13 foi indicado pelo compósito de 5%, corroborando com a falta de relação entre as propriedades mecânicas.

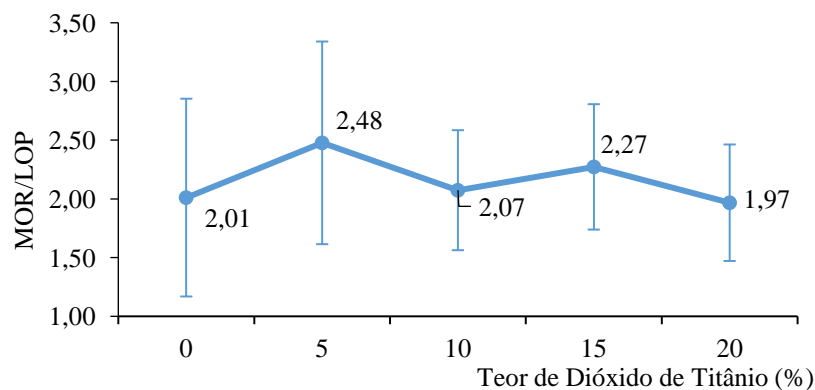
Figura 13 – Gráfico MOE por tratamento com seu referente desvio padrão após a cura.



Fonte: Autor (2020).

A Figura 14 apresenta o gráfico da relação MOR/LOP para os compósitos após a cura. As porcentagens com maiores valores da razão MOR/LOP indicam que as fibras aumentaram a resistência à tração na flexão. Observa-se, pelo comportamento do gráfico, que somente o compósito fibrocimento com 20% de TiO_2 apresentou menor valor absoluto desta propriedade em relação ao compósito padrão. A relação de MOR/LOP corresponde ao ganho de resistência após a primeira fratura na matriz, nesse ponto a fibra atua como reforço no cimento (SANTANA, 2016), ou seja, essa razão analisa a carga máxima aplicada no compósito pela carga máxima antes da curva tensão-deformação. Essa relação está associada a boa interação fibra-matriz, promovendo a quebra das fibras sem que ocorra o arrancamento (MENDES, 2014).

Figura 14 – Gráfico razão MOR/LOP por tratamento com seu referente desvio padrão após a cura.



Fonte: Autor (2020).

A Tabela 4 apresenta os resultados do teste da ANOVA para avaliar as propriedades mecânicas das diferentes porcentagens de TiO_2 , após a cura de 28 dias, considerando as

diferenças entre os tratamentos e suas repetições. A única diferença significativa encontrada entre os testes mecânicos foi entre as repetições dos compósitos com a mesma porcentagem de TiO₂ no MOR. Já entre seus tratamentos (0%, 5%, 10%, 15% e 20%), para os ensaios de MOR, LOP, MOE e a relação entre MOR/LOP, não foi encontrado diferenças significativas.

O erro experimental (CV) apresentado na Tabela 4 não deve ser superior a 20%, pois ele é um indicativo de erro operacional classificador por Pimentel-Gomes (Schmidt et al., 2017) e pode-se observar que as propriedades LOP, MOE e MOR/LOP apresentaram esse problema.

Tabela 4 - Análise estatística das propriedades mecânicas dos compósitos fibrocimentos pelo teste da ANOVA após a cura.

Fonte de Variação	GL	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (MPa)	MOR/LOP
Tratamentos	4	NS	NS	NS	NS
Repetições	7	S	NS	NS	NS
Médias		12,90	6,47	13.315,45	2,16
CV (%)		4,83	27,6	44,81	32,95

GL: grau de liberdade; CV: erro experimental; S: diferença significativa; NS: não apresentou diferença significativa.

Fonte: Autor (2020).

A análise do teste Tukey ao nível de 5% de significância e o desvio padrão dos compósitos para cada propriedade mecânica estudada são apresentados na Tabela 5. Nenhuma das propriedades mecânicas tiveram variação significativa entre seus tratamentos.

Tabela 5 – Análise estatística pelo teste Tukey para as propriedades mecânicas dos tratamentos com seus respectivos desvios padrão após a cura.

Corpos de Prova	MOR (MPa)	MOE (MPa)	LOP (MPa)	MOR/LOP
0%	12,86 ± 0,40 a	12573,31 ± 7671,43 a	7,12 ± 2,01 a	2,01 ± 0,84 a
5%	12,96 ± 1,17 a	16568,50 ± 9469,97 a	5,90 ± 2,19 a	2,48 ± 0,86 a
10%	12,83 ± 0,48 a	11450,89 ± 1859,05 a	6,46 ± 1,31 a	2,07 ± 0,51 a
15%	12,46 ± 0,50 a	14246,42 ± 4323,67 a	5,71 ± 1,14 a	2,27 ± 0,53 a
20%	13,34 ± 0,69 a	11621,44 ± 1800,40 a	7,09 ± 1,45 a	1,97 ± 0,50 a

Médias seguidas da mesma letra indicam que não houve diferença significativa pelo teste Tukey, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Autor (2020).

Com base nas análises estatísticas, pode afirmar que não houve diferenças significativas entre as diferentes porcentagens de TiO_2 dos compósitos fibrocimentos para as propriedades mecânicas de MOR, MOE e LOP, concluindo que o TiO_2 não interferiu nas propriedades mecânicas do fibrocimento com celulose branqueada. A quantidade de TiO_2 acrescentada não foi suficiente para modificar a resistência a flexão dos compósitos fibrocimento. Se a resistência tivesse aumentado, a matriz apresentaria melhor reforço (FONSECA *et al.*, 2016). A relação MOR/LOP também não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, indicando que as fibras vegetais contribuíram para aumentar a resistência à tração na flexão, pois a proporção de MOR para LOP é maior, e boa interação entre fibra-matriz (RODRIGUES *et al.*, 2013).

Segundo Tonoli (2009), as fibras não podem ser preenchidas com produtos de hidratação para melhorar sua ligação entre fibra-matriz e diminuir a porosidade dos compósitos fibrocimentos formando uma matriz com menos defeitos. Assim, se as fibras se aderem melhor ao cimento, o compósito fica mais compacto, absorvendo menor energia da fibra em sua ruptura. Isso comprova que a adição de fibras no cimento melhora a resistência da matriz cimentícia em relação à matriz comum, pois ocorre uma dissipação da energia nas fissuras próximas as fibras quando o material é exposto ao intemperismo (RAABE, 2019). Como todas as propriedades mecânicas não apresentaram diferenças estatísticas entre si e analisando sua relação com as propriedades físicas, somente o compósito de 15% de TiO_2 apresentou um resultado menos favorável a essas propriedades estudadas, já que sua absorção de água aumentou.

Pela NBR 15498 (2016) que classifica uma resistência mínima para MOR em telhas de fibrocimento sem amianto, os compósitos fibrocimentos de 0 a 15% de TiO_2 são classificados como categoria 4, sendo o MOR entre 7 a 13 MPa. O compósito fibrocimento com 20%, entrou na categoria 5 com MOR de 13MPa a 18 MPa. Os compósitos de fibrocimento que se enquadraram na categoria 4 apresentaram uma boa classe de qualidade, já que elas são mais utilizadas para ambientes externos e são vendidas comercialmente (AZEVEDO, 2018).

Teixeira (2010) encontrou valores de MOR entre 9,5 a 11,57 MPa; de LOP entre 8,9 a 10,77 MPa e de MOE entre 3549 a 4326 MPa. Os valores médios de MOR (12,90 MPa) e MOE (13315,45 MPa) encontrados no presente trabalho foram maiores que os intervalos acima. Já o valor médio de LOP (6,47 MPa) ficou abaixo. Mendes (2014), encontrou valores para propriedades mecânicas do fibrocimento extrudado com polpa celulósica de eucalipto e adição de silanos entre 6,42 a 8,29 MPa para MOR, para LOP entre 6,2 a 8,17 MPa e para MOE 2990

a 5090 MPa, sendo o MOR e o MOE menor do que a média encontrada no presente trabalho. Já o LOP ficou entre o intervalo de Mendes (2014).

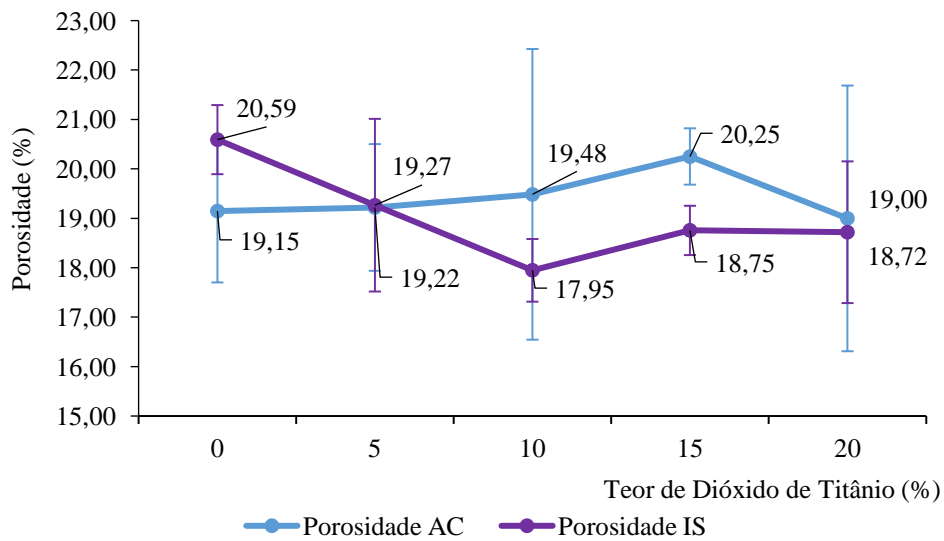
Rodrigues *et al* (2013) encontrou valores médios de 7,02 MPa para MOR, 2,17 MPa para LOP e 6950 MPa para MOE. Os valores de MOR, LOP e MOE encontrados no atual trabalho foram maiores que os apresentados acima. Aumentaram 83,76%, 198,16% e 91,59% para MOR, LOP e MOE respectivamente. Tonoli (2009) encontrou valores de MOR, LOP e MOE para compósitos fibrocimento com celulose branqueada de eucalipto de 9,4 MPa; 5,5 MPa e 7600 MPa, respectivamente. Os valores médios do presente trabalho aumentaram 37,23%, 17,64% e 75,2%. Esse aumento significa melhora na resistência mecânica dos compósitos e as diferenças entre os trabalhos são pelos tipos das fibras, traço do fibrocimento e o processo de produção.

No trabalho de Mendes (2014), os fibrocimentos com silanos apresentaram razão média de MOR/LOP entre 1,02 e 1,04 após a cura. Já Santana (2016) encontrou valores para relação de MOR/LOP para fibrocimento com reforço de curauá de 1,17 e com reforço de polipropileno de 1,7. Sendo menores as relações do que a encontrada no presente trabalho (2,16). No trabalho de Rodrigues *et al* (2013) o valor encontrado para MOR/LOP no fibrocimento controle foi de 2,43, enquanto o valor do compósito cimentício com adição de cinza de cana-de-açúcar foi de 3,23. Sendo maiores do que a relação MOR/LOP encontrada. Quanto maior essa relação, melhor o uso do material para reforço, já que ele apresenta maior tensão máxima e ganho de resistência após a primeira fissura da matriz (SANTANA, 2016).

4.3 Propriedades físicas dos compósitos após ciclos de imersão e secagem

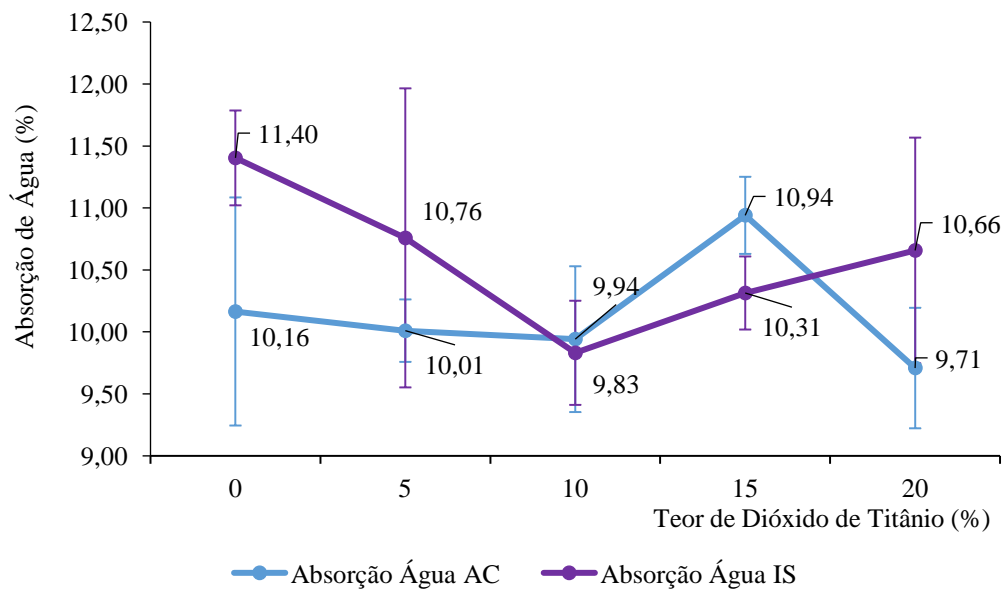
A Figura 15 apresenta a propriedade de porosidade para os compósitos de fibrocimentos com as variações de TiO₂ após a cura e após os ciclos de imersão e secagem. A Figura 16, a propriedade de absorção de água para os compósitos fibrocimentos após a cura e após ciclos. A Figura 17 apresenta a propriedade de densidade para esses mesmos compósitos.

Figura 15 – Comparação entre as propriedades de porosidade para os compósitos e seus desvios padrão após a cura e após os ciclos de imersão e secagem.



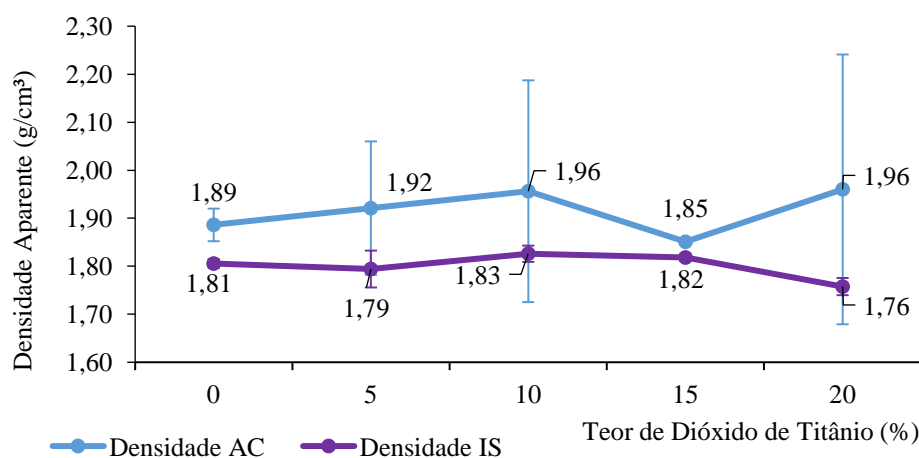
Porosidade AC: Porosidade após a cura; Porosidade IS: Porosidade após ciclos de imersão e secagem.
Fonte: Autor (2020).

Figura 16 – Comparação entre as propriedades de absorção de água para os compósitos e seus desvios padrão após a cura e após os ciclos de imersão e secagem.



Absorção de água AC: Absorção de água após a cura; Absorção de água IS: Absorção de água após ciclos de imersão e secagem.
Fonte: Autor (2020).

Figura 17 – Comparação entre as propriedades de densidade aparente para os compósitos e seus desvios padrão após a cura e após os ciclos de imersão e secagem.



Densidade AC: Densidade após a cura; Densidade IS: Densidade após ciclos de imersão e secagem. Fonte: Autor (2020).

Pelo comportamento dos gráficos, nas propriedades de porosidade e absorção de água, somente o compósito de 15% diminuiu seus valores após os seis ciclos de imersão e secagem e os outros compósitos permaneceram com seus resultados semelhantes, considerando seus respectivos desvios padrão. Já os compósitos fibrocimentos com 0% e 15% de adição de TiO_2 diminuíram suas densidades aparentes depois dos ciclos, enquanto que os demais tratamentos não apresentaram diferenças considerando o desvio padrão.

A Tabela 6 apresenta a análise estatística para os compósitos fibrocimentos pelo teste da ANOVA. Em todos os ensaios, de absorção de água, porosidade e densidade aparente houve diferenças significativas entre os tratamentos com diferentes porcentagens de TiO_2 , já entre as repetições dos compósitos fibrocimentos com a mesma porcentagem de TiO_2 foi observada igualdade entre os tratamentos para absorção de água, porosidade e densidade.

Tabela 6 - Análise estatística pelo teste da ANOVA das propriedades físicas dos compósitos fibrocimentos após os ciclos de imersão e secagem.

Fonte de Variação	GL	Absorção Água (%)	Porosidade (%)	Densidade (g/cm³)
Tratamentos	4	S	S	S
Repetições	5	NS	NS	NS
Médias		10,62	19,09	1,80
CV (%)		7,04	5,95	1,22

GL: grau de liberdade; CV: erro experimental; S: diferença significativa; NS: não apresentou diferença significativa.

Fonte: Autor (2020).

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios para cada compósito fibrocimento com diferentes porcentagens de TiO₂ e suas propriedades físicas de absorção de água, porosidade e densidade aparente, bem como o desvio padrão de cada valor e análise estatística pelo teste Tukey. O compósito de 20% de TiO₂ apresentou valor estatístico de densidade aparente diferente e menor pelo teste Tukey que os demais tratamentos, porém o compósito com 5% de TiO₂ apresentou relação estatística com todas as outras porcentagens (0%, 10%, 15% e 20%). Os compósitos fibrocimentos de 0%, 10% e 15% possuem relação entre si, tendo igualdade nos tratamentos e valor maior que o compósito de 20%.

Tabela 7 –Análise estatística para as propriedades físicas pelo teste Tukey para cada tratamento e o desvio padrão após os ciclos de imersão e secagem.

Corpos de Prova	Densidade (g/cm³)	Porosidade (%)	Absorção de Água (%)
0%	1,81 ± 0,01 a	20,59 ± 0,70 a	11,40 ± 0,38 a
5%	1,80 ± 0,04 ab	19,27 ± 1,75 ab	10,76 ± 1,21 ab
10%	1,83 ± 0,02 a	17,95 ± 0,63 b	9,83 ± 0,42 b
15%	1,82 ± 0,01 a	18,76 ± 0,50 ab	10,31 ± 0,29 ab
20%	1,76 ± 0,02 b	18,72 ± 1,43 ab	10,66 ± 0,91 ab

Médias seguidas da mesma letra indicam que não houve diferença significativa pelo teste Tukey, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Autor (2020).

Quanto à porosidade, o compósito fibrocimento padrão apresentou um valor estatístico maior e diferente do compósito de 10%, enquanto as outras (5%, 15% e 20%) têm relações estatísticas de igualdade com os compósitos de 0% e de 10%. Analisando as propriedades de absorção de água e a porosidade ocorreram semelhanças estatística entre elas, o que corrobora com a associação entre porosidade e absorção de água.

A alta porcentagem de absorção de água nos materiais facilita a carbonatação natural do hidróxido de cálcio formando um composto (carbonato de cálcio) alterando a densidade dos compósitos fibrocimentos que diminui em relação a essa propriedade, assim as propriedades físicas das amostras dependem de suas microestruturas e do processo de hidratação do fibrocimento (RAABE, 2019). O compósito de 20% obteve menor valor de densidade aparente em relação aos outros compósitos pela análise estatística, diminuindo 2,84% em relação ao compósito padrão. Essa propriedade para o compósito de 20% foi desfavorável após os ciclos de imersão e secagem.

Já, a absorção de água foi menor no compósito de 10% do que no compósito padrão, diminuindo 15,97%. Esse compósito apresentou um resultado satisfatório, pois obteve semelhança estatística com a densidade aparente em relação ao compósito padrão, porém diminuiu sua absorção, corroborando com a afirmação de Raabe (2019) apresentada acima. As demais porcentagens (5, 15 e 20%) foram estatisticamente iguais tanto ao compósito padrão, quanto a de 10%.

A alta porosidade é outra causa que diminui a durabilidade dos compósitos fibrocimento, pois permite a entrada de água no compósito e, com isso, pode trazer outras substâncias dissolvidas na água como cloretos, sulfatos, sais, ácidos, gases, entre outros. Assim, a água que entra nos poros pode dissolver o hidróxido de cálcio degradando as fibras vegetais. Isso pode acarretar na perda de aderência entre as fibras e a matriz cimentícia e no processo de mineralização das fibras (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015). Essa propriedade de porosidade obteve semelhança estatística com a absorção de água, assim o compósito de 10% diminuiu 14,71% de sua porosidade em relação ao compósito padrão, sendo um compósito mais durável, compacto e com boa aderência entre sua fibra-matriz.

Foram realizados no trabalho de Mendes (2014) 200 ciclos de envelhecimento acelerado e encontrados valores de absorção de água entre 9,79 a 15,88%, porosidade de 22,72 a 30,94% e densidade de 1,92 a 2,32 g/cm³. O valor médio encontrado no presente trabalho para absorção de água (10,62%) ficou entre o intervalo de Mendes (2014), a porosidade (19,09%) e a densidade (1,80 g/cm³) ficaram abaixo. Enquanto que Teixeira (2010) encontrou valores para 200 ciclos de 11,65 a 13,84%, 20,57 a 23,26% e 1,63 a 1,79 g/cm³ de absorção de água, porosidade e densidade, respectivamente. Rodrigues *et al* (2013) encontrou médias de 24,3% para absorção de água, 34,8% de porosidade e 1,44 g/cm³ para 100 ciclos de envelhecimento. No presente trabalho os valores médios de absorção de água e porosidade ficaram abaixo dos intervalos anteriores e densidade ficou acima. A absorção de água e porosidade diminuíram 128,81% e 82,29% e a densidade aumentou 25% em relação ao trabalho de Teixeira (2010), garantindo a propriedade do TiO₂ de preenchimento dos poros dos compósitos após os ciclos de imersão e secagem.

Tonoli (2009) encontrou para o fibrocimento com eucalipto branqueada para 100 ciclos valores médios de 23,2% de absorção de água, 34,1% de porosidade e 1,48 g/cm³ de densidade e para o fibrocimento com modificação química de MPTS (metacriloxipropiltrimetoxisilano) e APTS (aminopropiltri-etoxisilano) foi encontrado 13,5 e 16,2%, 24,6 e 27,9% e 1,72 e 1,83 g/cm³, respectivamente. Para fibrocimento com eucalipto branqueada os valores médios do

atual trabalho para absorção de água e porosidade diminuíram 118,46% e 78,63% e de densidade aumentou 21,62%, sendo mais favorável essa relação. Já para fibrocimento com adição de MPTS e APTS, a absorção de água diminuiu 27,12% e 52,54% e a porosidade diminuiu 28,86% e 46,15%, mas a densidade aumentou 4,65% da adição de MPTS e diminuiu 1,67% da adição de APTS

Outras variações podem ter ocorrido devido às diferentes fibras estudadas e a diferente quantidade de ciclos. No presente trabalho foram adotados seis ciclos de imersão e secagem, pois, além de a maior perda de força e resistência ocorrerem nos primeiros 5 ciclos (MOHR; BIERNACKI; KURTIS, 2006), não se tornou viável aumentar essa quantidade durante os estudos.

4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na Figura 18 são analisados os compósitos fibrocimentos, após 28 dias de cura, por meio do MEV. As setas vermelhas representam as fibras de celulose branqueada de eucalipto, as setas azuis mostram as paredes da superfície rompidas, ou seja, uma falha na interface fibra e as setas verdes representam uma fissura na matriz cimentícia. O círculo azul representa os poros com produtos de hidratação do cimento, os círculos vermelhos que são orifícios menores e mais escuros representam o arrancamento das fibras e os círculos verdes mostram a ligação entre interface fibra-matriz.

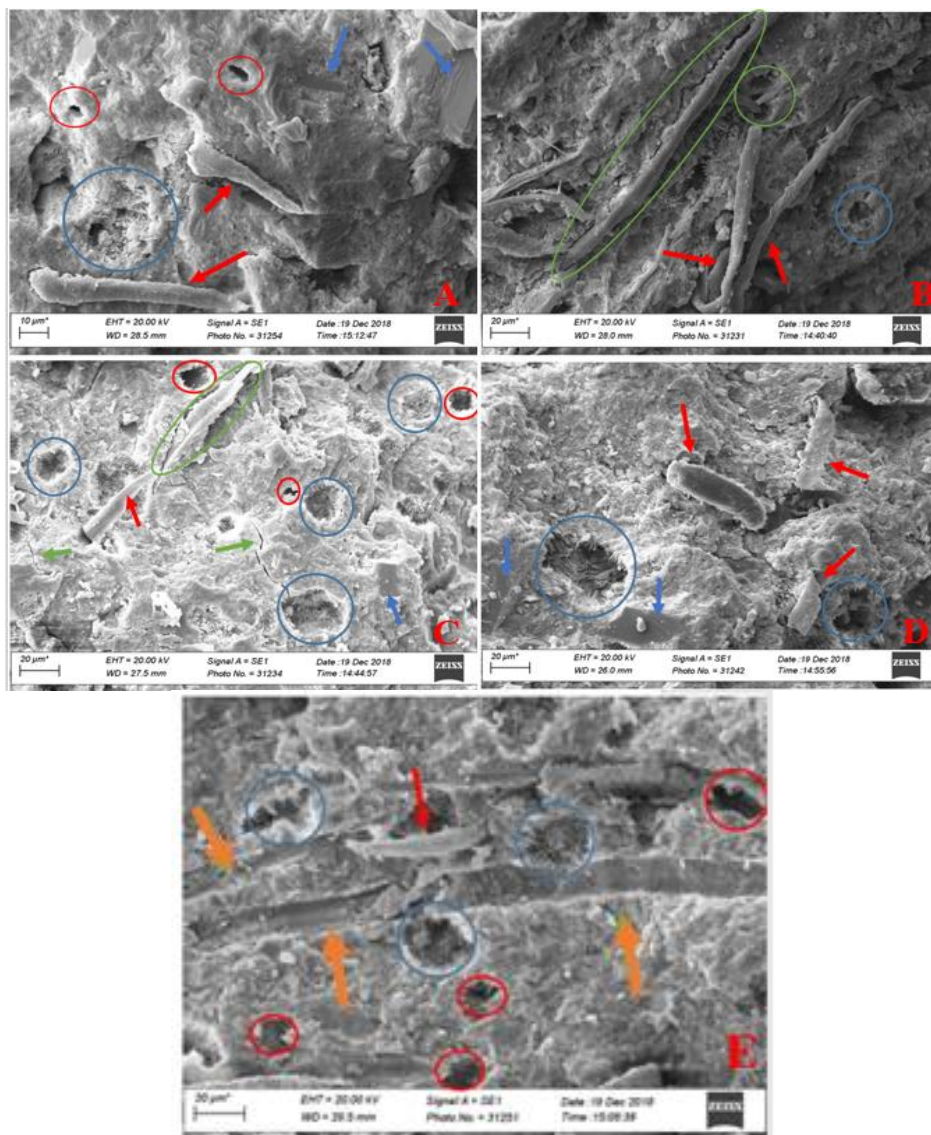
Na Figura 18 (A), os círculos vermelhos são explicados pela baixa adesão entre fibra matriz, provavelmente causado no processo de cura, assim elas não foram fraturadas ou rompidas, mas arrancadas (DOURADO, 2015). Nesse compósito, as fibras também ficaram uniformemente distribuídas, ajudando em uma transferência eficiente das tensões da matriz para as fibras o que pode melhorar as propriedades físicas e mecânicas (RAABE, 2019). Na Figura 18 (B) as setas vermelhas continuam indicando as fibras, porém as fibras estão mais aglomeradas nesse compósito, isso é um obstáculo para fibras de polpa celulósica, pois elas apresentam baixa dispersão em materiais a base de cimento *Portland* (RAABE, 2019).

O compósito da Figura 18 (D) foi o que apresentou maior absorção de água dentre as diversas porcentagens de adição de TiO_2 estudadas, por isso apresentam muitos sulcos. Esse compósito também deve ter sofrido uma maior mineralização e um deslocamento da celulose da matriz cimentícia (pior interação fibra-matriz) isso tudo devido alta absorção de água (MENDES, 2014). Na Figura 18 (E), as setas laranjas indicam o descolamento das fibras com

as paredes das superfícies apontam uma posição com pior interação entre a matriz e a fibra (MENDES, 2014).

Os compósitos da Figura 18 (C), (D) e (E) apresentam fibras mais curtas que foram rompidas, isso se deve as ligações físicas ficarem mais eficientes devido às fibras branqueadas possuírem uma superfície mais rugosa pela remoção da lignina em seu branqueamento, contribui para a ruptura das fibras, ao invés do arrancamento demonstrando a boa interação fibra-matriz (TONOLI, 2009).

Figura 18 – MEV para os tratamentos de diferentes porcentagens de TiO_2 após a cura.



A: compósito padrão com aumento de 10 μm ; EHT: 2000 kV; WD: 28,5mm.

B: compósito com 5% TiO_2 com aumento de 20 μm ; EHT: 2000 kV; WD: 28,0 mm.

C: compósito com 10% TiO_2 com aumento de 20 μm ; EHT: 2000 kV; WD: 27,5mm.

D: compósito com 15% TiO_2 com aumento de 20 μm ; EHT: 2000 kV; WD: 26,0 mm.

E: compósito com 20% TiO_2 com aumento de 20 μm ; EHT: 2000 kV; WD: 29,5 mm.

EHT: voltagem de aceleração; WD: distância de trabalho.

Fonte: Autor (2020).

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos do estudo da adição de diferentes porcentagens de TiO_2 nos compósitos fibrocimentos com fibras de eucalipto branqueadas avaliando suas propriedades físicas e mecânicas no presente trabalho foram satisfatórias, pois apresentaram poucas alterações em relação ao compósito padrão.

Os compósitos fibrocimentos obtiveram semelhanças estatísticas em suas propriedades físicas de porosidade e densidade, nos ensaios realizados após a cura de 28 dias. O compósito de 15% de TiO_2 obteve maior valor de absorção de água que os demais fibrocimentos, aumentando 7,57% em relação ao compósito padrão. Como o aumento da porcentagem de absorção de água interfere negativamente no compósito fibrocimento, diminuindo sua resistência e prejudicando a interação fibra-matriz, o compósito de 15% apresentou-se desfavorável com o resultado encontrado para propriedades físicas após a cura.

Porém as propriedades absorção de água e porosidade são relacionadas, como houve diferença estatística apresentada pelo compósito de 15% em absorção de água diferindo da porosidade, esse compósito pode ter sofrido má dispersão das fibras na matriz ou falha no processo de extrusão. Todos os compósitos fibrocimentos obtiveram semelhanças estatísticas em suas propriedades mecânicas, assim, o acréscimo de TiO_2 no fibrocimento não interferiu nas propriedades mecânicas MOR, MOE, LOP e a relação MOR/LOP, quando comparados ao compósito padrão.

Na análise das propriedades físicas após os seis ciclos de imersão e secagem foram encontradas diferenças significativas entre suas propriedades diferindo das propriedades físicas antes da cura. Considerando o desvio padrão, compósito padrão diminuiu sua densidade aparente após os ciclos de imersão e secagem em comparação com as propriedades físicas após a cura aumentando os espaços vazios e deixando o compósito menos denso. Já o compósito de 15% de TiO_2 diminuiu todas as suas propriedades físicas de absorção de água, porosidade e densidade após os ciclos se mantendo estável.

O compósito fibrocimento de 20% apresentou menor valor médio de densidade em relação ao compósito padrão, diminuindo 2,84%. Para a propriedade densidade aparente essa característica se torna desfavorável, porém, não houve alteração estatística nas outras propriedades físicas. Já o compósito com 10% de adição teve reduzido em 15,97% o valor de sua absorção de água e 14,71% da porosidade, em relação ao compósito padrão. Como ele obteve semelhança estatística na propriedade de densidade aparente com os demais compósitos,

apresentou o resultado mais satisfatório, sendo um compósito mais durável, compacto e com boa aderência entre sua fibra-matriz.

Todos os níveis de absorção de água foram abaixo do máximo exigido pela norma NBR 7581-01 (2014), que é de 37%. Os valores de MOR encontrados para os compósitos com 0 a 15% de adição de TiO_2 estão na categoria 4, ou seja, entre 7 a 13 MPa e o de 20% é classificado na categoria 5, segundo a norma NBR 15498 (2007).

Conclui-se que o acréscimo de TiO_2 no fibrocimento com celulose branqueada pode ser viável, já que as propriedades físicas e mecânicas dos tratamentos com acréscimo de TiO_2 não variaram significativamente em relação à amostra padrão. Apenas o compósito de 15% se mostrou desfavorável quanto à absorção de água após a cura, pois aumentou o valor obtido para essa propriedade em relação ao compósito padrão. O compósito com 20% de adição diminuiu sua densidade após os ciclos de imersão e secagem em relação ao compósito padrão. O compósito com 10% reduziu os valores de absorção de água e porosidade após os ciclos de imersão e secagem, em relação ao compósito padrão, apresentando o melhor resultado.

Assim, para trabalhos futuros, torna-se necessário avaliar se o TiO_2 efetivamente apresenta a função autolimpante, averiguando se esses teores de adição se tornam viáveis para a utilização desses produtos em telhas de fibrocimento. Sugerem-se, ainda, estudos avaliando as propriedades mecânicas após os ciclos de imersão e secagem. Também podem ser feitos mais ciclos para o envelhecimento dos compósitos tanto de maneira acelerada, quanto natural.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, ALESSANDRA ETUKO FEUZICANA DE SOUZA *et al.* Carbonatação acelerada efetuada nas primeiras idades em compósitos cimentícios reforçados com polpas celulósicas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, RS, v. 10, n. 4, p. 233-246, dez. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212010000400016>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-86212010000400016&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 26 mar. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 94881**: Test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken, 2001. 2 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1560 – 03**: Standard Test Method for Hot Water Accelerated Aging of Glass-Fiber Reinforced Cement-Based Composites. ASTM International, 2016, 2 p.

ARDANUY, MÒNICA; CLARAMUNT, JOSEP; TOLEDO FILHO, ROMILDO DIAS. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 79, p. 115-128, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815000550>. Acesso em: 26 mar. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, RJ, 2010. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: Placa de fibrocimento sem amianto. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. 3 ed. Rio de Janeiro, RJ, 2017. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7581-01**: Telha ondulada de fibrocimento. Parte 1: Classificação e requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2014. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2018. 12 p.

AZEVEDO, AFONSO RANGEL GARCEZ DE. **Desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com incorporação do lodo primário da indústria de papel de celulose**. 2018. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – Rj, 2018. Disponível em: http://www.uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2018/02/Tese_Afonso_Revisada.pdf. Acesso em: 09 fev. 2021.

BARRETO, MATHEUS DE FARIA E OLIVEIRA. Análise microestrutural de blocos de concreto celular autoclavado (BCCA) com o auxílio de métodos instrumentais. **Conexão Ciência**, Formiga, MG, v. 7, n. 2, p. 38-63, 07 dez. 2012. Disponível em: <https://periodicos.uniformg.edu.br:21011/ojs/index.php/conexao-ciencia/article/view/156>. Acesso em: 06 ago. 2018.

BRASILEIRO, GISELA AZEVEDO MENEZES; VIEIRA JHONATAS AUGUSTO ROCHA; BARRETO, LEDJANE SILVA. Use of coir pith particles in composites with *Portland* cement. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 131, p. 228-238, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.046>.

CARDELLICCHIO, LUCIANO. Our future heritage. ageing patterns of contemporary concrete: the case study of the jubilee church by richard meier in rome. **International Conference On Construction Research: Architecture, Engineering, Concrete / AEC 2018**, Madrid, p. 1-8, out. 2018. Disponível em: <http://unsworks.unsw.edu.au/fapi/datastream/unsworks:57495/bind0fcced8-7886-4d30-947c-32192a9baa3a?view=true>. Acesso em: 27 abr. 2020.

COELHO, THAMYS DA CONCEIÇÃO COSTA. **Efeitos do envelhecimento natural no desempenho térmico de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto**. 2017. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2017. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/teses/2017/01/17/efeitos-do-envelhecimento-natural-no-desempenho-termico-de-telhas-onduladas-de>. Acesso em: 05 nov. 2019.

COSTA, MÍRIAN DE ALMEIDA; TEIXEIRA, DIVINO ETERNO. Estudo de chapas de fibrocimento com fibras de pasta mecânica em substituição à fibra de amianto. **XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira e III Congresso Latino-Americano de Estruturas de Madeira**, São Carlos, SP, p. 1-13, mar. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325022154_Estudo_de_chapas_de_fibrocimento_com_pasta_mecanica_em_substituicao_a_fibra_de_amianto. Acesso em: 30 mar. 2020.

DEDAVID, BERENICE ANINA; GOMES, CARMEM ISSE; MACHADO, GIOVANNA. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e preparação de amostras: Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre, RS: EDIPUCRS, 2007. 60 p. Edição do CEMM - Centro de Microscopia e Microanálises do IDÉIAPUCRS - Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento. Disponível em: <http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2018.

DFP. **Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural**. Disponível em: <http://www.dfp.ufla.br/index.php/pt-BR/laboratorios/lmeau>. Acesso em: 13 abr. 2020.

DIAS, C. M. R. *et al.* Envelhecimento de longo prazo de telhas onduladas de fibrocimento – O efeito da carbonatação, lixiviação e chuva ácida. **Cement & Concrete Composites**, [s.l.], v. 30, n. 6, p. 255-265, abr. 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000090&pid=S1678-8621201100030000700008&lng=pt. Acesso em: 02 abr. 2020.

DOURADO, DAVID CARDOSO. **Estudo de fibrocimento com resíduos de pneu**. 2015. 115 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2015. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/10622/1/TESE_Estudo%20de%20fibrocimento%20com%20res%C3%ADduos%20de%20pneu.pdf. Acesso em: 06 nov. 2018.

FELTRIN, J. *et al.* Superfícies fotocatalíticas de titânia em substratos cerâmicos: Parte I. **Cerâmica**, [s.l.], v. 59, n. 352, p. 620-632, dez. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132013000400020>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132013000400020&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 25 mar. 2020.

FONSECA, CAMILA SOARES *et al.* Micro/nanofibrilas celulósicas de eucalyptus em fibrocimentos extrudados. **Cerne**, Lavras, MG, v. 22, n. 1, p. 59-68, mar. 2016. FapUNIFESP

(SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201622012084>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602016000100059&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 12 fev. 2020.

FUJISHIMA, AKIRA; RAO, TATA N.; TRYK, DONALD A. Titanium dioxide photocatalysis. **Journal Of Photochemistry And Photobiology C: Photochemistry Reviews**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 1-21, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1389-5567\(00\)00002-2](http://dx.doi.org/10.1016/s1389-5567(00)00002-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389556700000022>. Acesso em: 23 mar. 2020.

IMBRALIT. Telha onduladas de fibrocimento: conheça as características e vantagens da utilização nas construções. Disponível em: <https://www.imbralit.com.br/telha-onduladas-de-fibrocimento-conheca-as-caracteristicas-e-vantagens-da-utilizacao-nas-construcoes>. Acesso em: 27 mar. 2020.

JESUS, MAGNUM AUGUSTO MORAES LOPES DE. **Desenvolvimento de superfícies autolimpantes superhidrofílicas e fotocatalíticas obtidas pela deposição de filmes finos de TiO₂ e TiO₂/SiO₂ pelo método sol-gel**. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2015. Disponível em: http://www.posmat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/120/2017/08/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Magnum_Jesus.pdf. Acesso em: 26 nov. 2019.

LI, ZHEN *et al.* Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: a review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S.L.], v. 111, p. 115-137, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.05.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X18302045>. Acesso em: 22 mar. 2021.

LOPES, LIVIA DE FARIA. **Materiais de construção civil I**. Londrina, PR: Editora e Distribuidora Educacional S.a., 2017. 192 p.

MALISKA, ANA MARIA. **Microscopia eletrônica de varredura e microanálise**. Florianópolis, SC: [S.I.], 2003. Universidade Federal de Santa Catarina: Centro de Ciências Físicas e Matemáticas; Departamento de Química: Estudo da obtenção de imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura e Espectros na Microanálise. Disponível em:

http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf. Acesso em: 06 ago. 2018.

MENDES, RAFAEL FARINASSI. **Desempenho de fibrocimentos extrudados produzidos com poupas celulósicas modificadas com silanos**. 2014. 158 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/10550>. Acesso em: 16 nov. 2020.

MOHR, B.J.; BIERNACKI, J.J.; KURTIS, K.E.. Microstructural and chemical effects of wet/dry cycling on pulp fiber–cement composites. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 36, n. 7, p. 1240-1251, jul. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884606000834>. Acesso em: 01 abr. 2020.

MOHR, BENJAMIN J.. **Durability of pulp fiber-cement composites**. 2005. 250 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Georgia Institute Of Technology, Atlanta, Eua, 2005. Disponível em: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/7222>. Acesso em: 03 abr. 2020.

OLIVEIRA, THIAGO CARDOSO DE. **Densidade de plantio e manejo da adubação em cana - planta proveniente de mudas pré-brotadas**. 2016. 126 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2016. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64134/tde-13092016-142423/publico/ThiagoCardosodeOliveira_Revisada.pdf. Acesso em 15 mar. 2020.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO. **ISO 8336:2017**: Fibre-cement flat sheets — Product specification and test methods. 3 ed. S.I.: Organização Internacional Para Padronização, 2017. 47 p.

PERUZZI, ANTÔNIO DE PAULO. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento *portland* modificada com látex e adição de sílica ativa**. 2002. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2002. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/tde-13112002-180613/>. Acesso em: 05 mar. 2020.

PROTÁSIO, THIAGO DE PAULA *et al.* Correlações entre as Propriedades Físicas e Mecânicas de Painéis Aglomerados de Diferentes Espécies de *Eucalyptus*. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, RJ, v. 19, n. 2, p. 123-132, 17 fev. 2012. UFRRJ. Disponível em: <https://www.floram.org/article/doi/10.4322/floram.2012.014>. Acesso em: 08 nov. 2020.

RAABE, JOABEL. **Compósitos de fibrocimento com fibras de polpa celulósica modificada com nano-sílica**. 2019. 173 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/35032>. Acesso em: 06 abr. 2020.

RODRIGUES, MICHELLE S *et al.* Cinza de palha de cana-de-açúcar como adição mineral em fibrocimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 17, n. 12, p. 1347-1354, 16 ago. 2013. UAEEA/UFCEG. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662013001200014&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 06 out. 2020.

RUCHERT, CASSIUS O. F. TERRA. **Ensaio Mecânico dos Materiais: flexão, fluência e fadiga**. São Carlos, SP, 2018. 29 slides, color. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=151489>. Acesso em: 06 out. 2019.

SANTANA, PATRÍCIA DAS NAVES DE ALMEIDA. **Estudo de matriz cimentícia reforçada com fibra de curauá (*Ananas comosus var. erectifolius*) e submetida à cura em atmosfera com excesso de dióxido de carbono (CO₂)**. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, SP, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74133/tde-05122016-114937/pt-br.php>. Acesso em: 16 nov. 2020.

SCHMILDT, EDILSON ROMAIS *et al.* Coeficiente de variação como medida da precisão em experimentos de alface. **Revista Agro@Mambiente On-Line**, Boa Vista, RR, v. 11, n. 4, p. 290, 3 out. 2017. Universidade Federal de Roraima. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v11i4.4412>. Disponível em: <https://revista.ufrr.br/agroambiente/article/view/4412>. Acesso em: 05 abr. 2021.

SHARIF, AHMED. Review on advances in nanoscale microscopy in cement research. **Micron**, Dhaka, Bangladesh, v. 80, p. 45-58, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micron.2015.09.010>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968432815300470>. Acesso em: 03 abr. 2020.

SILVA, DANILLO WISKY. **Propriedades físico-mecânicas de fibrocimento reforçado com fibras de eucalipto tratadas termicamente**. 2015. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Biomateriais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2016. Disponível em:

http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/10808/1/DISSERTACAO_Propriedades%20f%C3%ADsico-mec%C3%A2nicas%20de%20fibrocimento%20refor%C3%A7ado%20com%20fibras%20de%20eucalipto%20tratadas%20termicamente.pdf. Acesso em: 06 nov. 2018.

SILVA, FLÁVIO DE ANDRADE *et al.* Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 5, p. 777-785, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809003675>. Acesso em: 01 abr. 2020.

SILVA, JESSICA DA ROCHA. **Análise da eficiência fotocatalítica de filmes de TiO₂ depositados em cerâmica de revestimento**. 2019. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil Empresarial, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2019. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/197464>. Acesso em: 12 mar. 2020.

SOROUSHIAN, PARVIZ; WON, JONG-PIL; HASSAN, MAAN. Durability characteristics of CO₂-cured cellulose fiber reinforced cement composites. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 34, p. 44-53, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812000931>. Acesso em: 01 abr. 2020.

STAMATE, MARIUS; LAZAR, GABRIEL. Application of titanium dioxide photocatalysis to create self-cleaning materials. **Romanian Technical Sciences Academy**, Bacau, Romania, v. 3, p. 280-285, 2007. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/2401/c3269f2144dfbde958c8e835146c7b0147cc.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2020.

TEIXEIRA, Ronaldo Soares. **Utilização de resíduos sucro-alcooleiros na fabricação de fibrocimento pelo processo de extrusão**. 2010. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Caracterização e Aplicação de Materiais, Universidade de São Paulo, Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA). São Carlos, 2010. <http://dx.doi.org/10.11606/d.88.2010.tde-18112010-112218>. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-18112010-112218/pt-br.php>. Acesso em: 08 dez. 2020.

TERRA, ISABELLE CRISTINE DE CARVALHO; PAULA, WISNER COIMBRA DE; SCHNEIDER, GUILHERME LEAL. **Influência do macrospec I-37 nas propriedades físico-mecânicas de fibrocimentos com celulose branqueada**. 2017. 23 f. Curso de Projeto Apresentado A Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.

TONOLI, GUSTAVO HENRIQUE DENZIN. **Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas**. 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, SP, 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74131/tde-11052006-145210/pt-br.php>. Acesso em: 05 nov. 2019.

TONOLI, GUSTAVO HENRIQUE DENZIN. **Fibras curtas de Eucalipto para novas tecnologias em fibrocimento**. 2009. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Inter unidades Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais, Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-18022010-142936/pt-br.php>. Acesso em: 05 mar. 2020.

WERLE, ANA PAULA. **Vida útil de revestimento frio e autolimpante**. 2015. 272 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-02052016-163421/>. Acesso em: 12 mar. 2020.