UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

DANILLO WISKY SILVA

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE FIBROCIMENTO REFORÇADO COM FIBRAS DE EUCALIPTO TRATADAS TERMICAMENTE

LAVRAS - MG

2015

DANILLO WISKY SILVA

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE FIBROCIMENTO REFORÇADO COM FIBRAS DE EUCALIPTO TRATADAS TERMICAMENTE

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Prof.Dr. Lourival Marin Mendes

Co-orientador

Prof.Dr. Rafael Farinassi Mendes

LAVRAS - MG

2015

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

Silva, Danillo Wisky.
Propriedades físico-mecânicas de fibrocimento reforçado com fibras de eucalipto tratadas termicamente / Danillo Wisky Silva. – Lavras : UFLA, 2016.
66 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de Lavras, 2015.
Orientador(a): Lourival Marin Mendes.
Bibliografia.

1. Fibrocimento. 2. Fibras de Eucalipto. 3. Tratamento térmico. 4. Extrusão. 5. Composição química das fibras. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

DANILLO WISKY SILVA

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE FIBROCIMENTO REFORÇADO COM FIBRAS DE EUCALIPTO TRATADAS TERMICAMENTE

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 09 de outubro de 2015.

Dr. Lourival Marin Mendes UFLA

Dr. Rafael Farinassi Mendes UFLA

Dr. José Benedito Guimarães Junior UFG

Prof.Dr. Lourival Marin Mendes

Orientador

LAVRAS - MG

2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me presenteou com dádiva da vida e nunca deixou de guiar meus passos.

Aos meus pais José Aparecido e Rosemeire Wisky, por me apoiar, transmitir amor, carinho, confiança e pelo exemplo de esforço e dignidade.

Ao meu irmão Gabriel Wisky que sempre consegue me transmitir paz e alegria com seu jeito feliz e sorridente, além de sua notória solicitude.

Ao professor Lourival pelo acolhimento, conhecimento, companheirismo, orientação e amizade, ou seja, pelo exemplo de vida.

Aos professores Rafael e Gustavo, por todo o ensinamento, paciência, confiança, orientação e amizade.

Aos amigos da UEPAM por todo o aprendizado, parceria e pelos momentos de descontração. Em especial ao Alan, Ney, Camila e Tamires.

Aos eternos brejeiros, amigos para a vida toda, pelas histórias vivenciadas, pelos risos compartilhados e os apertos superados sempre como uma família. Em especial ao Douglas, Willian, Thales e Tadeu.

As inúmeras amizades, aos colegas de turma, aos professores e em geral a Universidade Federal de Lavras, que possibilitou minha estadia e uma notória fonte de conhecimento.

Enfim, a todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito de diferentes níveis de reforço com fibras de eucalipto nas propriedades físico-mecânicas de fibrocimentos, bem como, o efeito de um pré-tratamento térmico das fibras nas propriedades físico-mecânicas dos fibrocimentos, ambos produzidos pelo processo de extrusão. Para a produção dos fibrocimentos foram utilizados cimento Portland CPV-ARI, calcário agrícola, fibras de *Eucalyptus* spp., Hidroxipropelmetilcelulose (HPMC) e poliéter carboxílico (ADVA). Os tratamentos foram divididos em duas fases, sendo que a primeira fase consistiu em se avaliar diferentes níveis de reforço com fibras (0; 1; 2; 3; 4 e 5%) em substituição ao cimento (68 a 63%), na segunda fase foi avaliado diferentes temperaturas (0; 140; 170; 200 e 230 °C) de tratamento térmico das fibras de eucalipto, foi utilizado 3% de reforço com fibras (definido após análise dos resultados da primeira fase) e 65% de cimento. Para ambas as fases deste trabalho foram adicionadas a mistura 30% de calcário, 1% de HPMC e 1% de ADVA. A relação água:cimento foi de aproximadamente 0,40. Os corpos de prova (10 repetições por tratamento) foram confeccionados pelo processo de extrusão. Na primeira fase houve diferença significativa para as propriedades absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e Energia específica, onde os fibrocimentos com 4 e 5% de fibras obtiveram os maiores valores, também foram observadas diferenças significativas para as propriedades densidade aparente (DA), módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e limite de proporcionalidade (LOP), onde os fibrocimentos com 4 e 5% obtiveram os menores valores. Na segunda fase deste trabalho foram observadas diferenças significativas apenas para as propriedades PA e DA, onde os fibrocimentos reforçados com fibras tratadas com 200 e 230°C obtiveram os maiores valores. No geral, o uso de fibras de eucalipto como reforço em fibrocimentos se mostrou viável nos diferentes níveis de reforço avaliados. Os tratamentos térmicos modificaram a composição química da fibra influenciando nas propriedades PA e DA, porem se deve ressaltar a necessidade de avaliar o efeito destes tratamentos na durabilidade dos fibrocimentos, quesito este fundamental para viabilizar o uso de novos materiais reforçantes.

Palavras-chave: Fibrocimento, Fibras de eucalipto, Tratamento térmico, Extrusão, Composição química das fibras.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of different reinforcement levels of eucalyptus fibers in the physical-mechanical properties of fiber cements, as well as the effect of a thermal pretreatment of the fibers in the physical-mechanical properties of the fiber cements, both produced by extrusion process. For the production of fiber cements were used CPV-ARI Portland cement, agricultural lime, fibers *Eucalyptus* spp., Hidroxipropelmetilcellulose (HPMC) and carboxylic polyether (ADVA). The treatments were divided into two stages, the first stage was to evaluate different reinforcement levels with fibers (0, 1, 2, 3, 4 and 5%) to replace the cement (68 to 63%) in the second phase was rated different temperatures (0; 140; 170; 200 and 230 ° C) heat treatment of the eucalyptus fibers was used 3% reinforcing fiber (set after analysis of the results of phase) and 65% cement. For both phases of this work were added to 30% mixture of lime, and 1% HPMC 1% ADVA. The relative water: cement ratio was approximately 0.40. The samples (10 replicates per treatment) were prepared by the extrusion process. In the first phase there was a significant difference for the water absorption properties (WA), porosity void (PV) and specific energy, where the fiber cements with 4 to 5% fibers had the highest values were also no significant differences in the properties of apparent density (AD), modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE) and the limit of proportionality (LOP), where the fiber cements 4 and 5% were smaller values. In the second phase of this study were significant differences only for the PV and AD properties where the fiber cements reinforced with fibers treated with 200 and 230 ° C obtained the highest values. In general, the use of eucalyptus fibers as reinforcements in fiber cements proved feasible at different levels evaluated reinforcement. Heat treatments changed the chemical composition of the fiber influencing the PA and DA property, however one should emphasize the need to assess the effect of these treatments on the durability of fiber cements, question this key to enable the use of new reinforcing materials.

Keywords: Fiber Cement, eucalyptus fibers, Thermal processing, extrusion, chemical composition of the fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representação esquemática do comportamento à flexão de um compósito: a) compósito sem fibras, b) compósito com fibras e c) caminhamento da trinca através do compósito com fibras: [1] deslocamento, [2] interceptação, [3] arrancamento (*pull-out*) da fibra e [4] rompimento da fibra 15

Figura 3 Microestrutura de uma fibra vegetal, onde a imagem de MEV se refere a uma fibra de *Eucalyptus* sp. 21

Figura 4 Forno "Macro ATG" desenvolvido em parceria entre a UFLA e o CIRAD 31

Figura 5 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão para a propriedade absorção de água após 24 horas de imersão em água nos diferentes níveis de reforço avaliados 37

Figura 6 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão para a propriedade porosidade aparente nos diferentes níveis de reforço avaliados .. 38

Figura 7 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão para a propriedade densidade aparente nos diferentes níveis de reforço avaliados 38

Figura 8 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão da propriedade módulo de ruptura à flexão estática nos diferentes níveis de reforço avaliados 40

Figura 9 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão da propriedade módulo de elasticidade à flexão estática nos diferentes níveis de reforço avaliados 41

Figura 10 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão da propriedade limite de proporcionalidade à flexão estática nos diferentes níveis de reforço avaliados 41

Figura 11 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão da propriedade energia específica (tenacidade) nos diferentes níveis de reforço avaliados 42

Figura 12 Absorção de água dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.....45

Figura 13 Porosidade aparente dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.....45

Figura 14 Densidade aparente dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.....46

Figura 15 Môdulo de ruptura dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.....48

Figura 16 Môdulo de elasticidade dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.....49

Figura 17 Limite de proporcionalidade dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.....49

Figura 18 Energia específica (tenacidade) dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Plano experimental da primeira fase deste trabalho.....29

Tabela 2 Propriedades anatômicas das fibras de eucalipto.....34

Tabela 3 Variação dos componentes químicos das fibras após tratamento térmico 35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 OBJETIVO 14
3 REFERENCIAL TEÓRICO 14
3.1 Desenvolvimentos do fibrocimento sem amianto 14
3.3 Processos de extrusão na produção de fibrocimento 17
3.4 Usos de fibras vegetais em compósitos cimentícios 19
3.5 Durabilidades dos fibrocimentos sem amianto 23
3.6 Estratégias para melhorar a durabilidade dos compósitos 25
3.7 Tratamento térmico 26
4 MATERIAL E MÉTODOS 28
4.1 Matéria-prima 28
4.2 Produção dos compósitos 29
4.3 Caracterização das fibras de eucalipto 32
4.4 Propriedades mecânicas dos compósitos 33
4.5 Propriedades físicas dos compósitos 33
4.6 Análise dos resultados 34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 34
6 CONCLUSÃO 51
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 52
APÊNDICES 62

1 INTRODUÇÃO

Pode-se notar um grande esforço das pesquisas atuais, quanto ao uso das fibras vegetais como reforço em compósitos cimentícios, devido a apresentarem um satisfatório desempenho mecânico, serem renováveis, terem baixo custo de processamento, ser produzidas em abundancia, bem como o baixo impacto ambiental na obtenção quando comparadas com as fibras sintéticas e as fibras de amianto (BELAADI et al., 2013; SAWSEN et al., 2015).

Uma variedade considerável de fibras vegetais vem mostrando potencial como reforço em fibrocimentos, entre elas as fibras de sisal, fibras de pseudocaule de bananeira (SAVASTANO JR et al., 2005), fibras de lufa (TONG et al., 2014), talos de bambu (XIE et al., 2015), polpa celulósica de sisal, algodão, eucalipto (CLARAMUNT et al., 2011; TONOLI, 2009a), entre outras. No entanto falta conhecimento sobre o uso das fibras lignocelulósicas de eucalipto como reforço em fibrocimentos. Estas são produzidas em grande escala no Brasil e no mundo, através de processos mecânicos e termomecânicos, caracterizando um produto com impacto ambiental reduzido e um baixo custo de produção.

Apesar do potencial uso das fibras vegetais como reforço na produção de fibrocimentos, existem alguns pontos críticos quanto à durabilidade dessas fibras na matriz cimentícia, devido principalmente ao caráter higroscópico das fibras e aos produtos da hidratação do cimento (SAWSEN et al., 2015; CHAFEI et al., 2014). Além do que, as dissoluções dos extrativos presentes na superfície das fibras prejudicam a hidratação do cimento, bem como ocasionam atrasos consideráveis no tempo de pega do cimento (SELLAMI; MERZOUD; AMZIANE, 2013; CHAFEI et al., 2012).

Vários estudos vêm discutindo e sugerindo tratamentos que buscam aumentar a vida útil dos fibrocimentos reforçados com fibras vegetais, assim

como diminuírem os problemas de incompatibilidade entre as matrizes cimentícias e as fibras a serem utilizadas como reforço (KHASMA et al., 2012; SAWSEN et al., 2015; WEI; MEYER, 2014; WEI; MEYER, 2015; SANTOS et al., 2015b).

Entre os tratamentos mais utilizados se tem a modificação superficial, que visa diminuir o caráter higroscópico das fibras e melhorar a interface fibra/matriz (TONOLI et al., 2013b; MENDES, 2014), o uso de agentes químicos que visam degradar os componentes não celulósicos das fibras vegetais também vem sendo testado com intuito de diminuir a incompatibilidade com a matriz cimentícia, bem como, os mecanismos de degradação das fibras (JARABO et al., 2013; JARABO et al., 2012; CORREIA et al., 2013; CORREIA et al., 2014).

Uma técnica bastante consolidado no tratamento da madeira maciça, de lâminas e de partículas de madeira, é o tratamento térmico que tem por finalidade melhorar as propriedades da madeira pela aplicação de calor (SILVA, 2012), no entanto, existem poucas informações quanto ao efeito deste tipo de tratamento em fibras vegetais, assim como o uso dessas fibras como reforço em fibrocimentos. Entre os benefícios do uso da termorretificação nos materiais lignocelulósicos estão à melhora da estabilidade dimensional, aumento da cristalinidade da celulose, degradação da hemicelulose e extrativos, aumento do teor de lignina, aumento da dureza superficial entre outros (GOODRICH et al., 2010; SILVA, 2012), características estas, que em partes trariam melhorias na vida útil dos fibrocimentos, além de eliminar possíveis problemas de incompatibilidade devido à presença de extrativos e hemiceluloses.

2 OBJETIVO

Avaliar o uso de fibras lignocelulósicas de eucalipto como reforço em compósitos cimentícios, assim como avaliar o efeito do tratamento térmico das fibras na qualidade dos fibrocimentos.

- ✓ Identificar a porcentagem ótima de reforço das fibras de eucalipto nos fibrocimentos;
- ✓ Avaliar o efeito de diferentes temperaturas de tratamento térmico na composição química das fibras, bem como sua influência nas propriedades físico-mecânicas dos fibrocimentos;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Desenvolvimentos do fibrocimento sem amianto

Com a introdução de fibras nas matrizes à base de cimento inicialmente se buscava uma melhora na resistência à tração, em conceito, o uso dessas fibras próximas uma das outras poderiam obstruir a propagação das microfissuras, aumentando assim, a resistência à tração das matrizes cimentícias (TEIXEIRA, 2010). Com o avanço das pesquisas, pode-se observar que as adições de fibras nos compósitos não proporcionavam um aumento substancial na resistência mecânica, porém, uma melhora considerável quanto ao comportamento frágil e quebradiço das matrizes cimentícias (Figura 1), possibilitando inúmeras pesquisas que buscavam entender e melhorar a resistência deste material no estágio pós-fissurado (AGOPYAN; SAVASTANO Jr., 1997; MEHTA; MONTEIRO, 1994; LIMA et al., 2007).

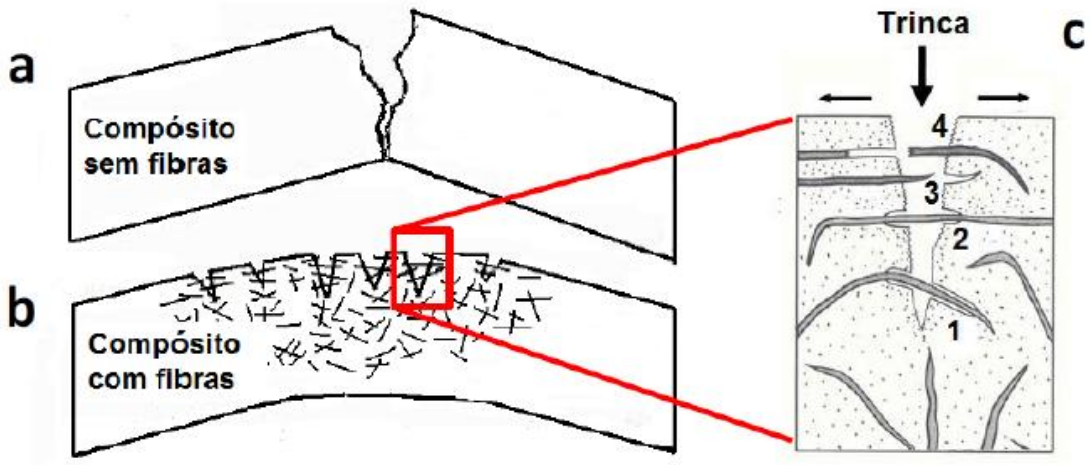

Figura 1 Representação esquemática do comportamento à flexão de um compósito: a) compósito sem fibras, b) compósito com fibras e c) caminhamento da trinca através do compósito com fibras: [1] deslocamento, [2] interceptação, [3] arrancamento (*pull-out*) da fibra e [4] rompimento da fibra
Fonte: Coutts (2005)

Em meados de 1940, James Hardie e Coy Pty Ltda. introduziram fibras celulósicas como substituinte econômico ao amianto em fibrocimentos. Durante a segunda guerra mundial houve uma intensificação deste trabalho, devido principalmente a escassez mundial de fibras de amianto. Entretanto, com a normalização dos estoques de amianto este trabalho foi descontinuado (TONOLI, 2009b).

Na década de 1960 o interesse pelas fibras vegetais foi restabelecido, James Hardie conseguiu baixar o custo de produção dos fibrocimentos utilizando fibras de amianto em mistura com as fibras vegetais como reforço nos compósitos, o mesmo, aplicava a técnica de autoclavagem para melhorar a hidratação do cimento. Os resultados foram promissores, os fibrocimentos com a mistura de fibras apresentavam melhores resultados de conformação e

uniformidade que os produtos cimentícios com fibras de amianto (COUTTS, 2005).

A descoberta de possíveis problemas de saúde relacionados com a extração e manuseio do amianto contribuíram para que em meados de 1970 começa-se um esforço global de remoção do amianto como reforço em uma grande variedade de produtos. A Austrália foi pioneira no uso de tecnologia livre de amianto na produção de fibrocimento. As indústrias James Hardie vêm produzindo desde 1981 fibrocimentos sem amianto, aonde vêm disseminando sua tecnologia para outros lugares, como Nova Zelândia, Ásia, América do Norte e recentemente para a América do Sul (COUTTS, 2005).

Atualmente os fibrocimentos sem amianto são produzidos com o uso de fibras celulósicas, onde no processo de cura, estes, são autoclavados e destinados para revestimento externo, para divisórias internas e para forros. Quando os fibrocimentos são destinados para a confecção de telhas onduladas, normalmente são utilizadas fibras sintéticas resistentes a álcalis em combinação com as fibras celulósicas, estes compósitos são curados ao ar (TONOLI, 2009b).

3.2 Processos de produção dos fibrocimentos

De acordo com Ikai et al. (2010), os produtos oriundos de fibrocimento fabricados no mundo são, em sua maioria, produzidos pelo processo Hatschek. Este processo foi desenvolvido por Ludwig Hatschek no final do século XIX baseado no processo de produção do papel (IKAI et al., 2010). Por outro lado, a composição do fibrocimento vem sofrendo constantes mudanças pela incorporação de novos aditivos e minerais, diferentes fibras e cimento com novas características (BEZERRA et al., 2006).

Uma alternativa para a produção de fibrocimento que vêm sendo muito estudado é o processo de extrusão, as pesquisas apontam este método como uma

alternativa econômica de manufatura na produção de fibrocimento que pode produzir elementos construtivos com características mecânicas e físicas iguais ou superiores aos provenientes do processo Hatschek (SHAO et al., 2000; SHAO; MARIKUNTE; SHAH, 1995; TAKASHIMA et al., 2003).

De acordo com Horst (2002), as extrusoras utilizadas na indústria de cerâmicas são adaptáveis para o processo de extrusão dos fibrocimentos. Segundo Santos et al. (2015a), algumas vantagens do processo de extrusão são o uso de máquinas mais simples para a produção contínua e a possibilidade de alinhamento parcial das fibras (o que o torna vantajoso para certo produtos). Assim, assume-se um menor custo de investimento inicial quando comparado ao processo Hatschek, outro ponto relevante é que as fábricas de fibrocimento por extrusão podem ser descentralizadas e distantes dos grandes centros, ao contrário das fábricas de fibrocimento Hatschek que devido ao alto valor de implantação necessitam de alta produtividade e movimentação de capital.

3.3 Processos de extrusão na produção de fibrocimento

O processo de extrusão vem sendo estudado e aperfeiçoado para produção dos fibrocimentos. Uma de suas principais características é a utilização de baixas relações de água/cimento, variando de 0,2 a 0,3, assim como a utilização de misturas com comportamento reológico pseudoplástico (SOTO, 2010). A possibilidade de utilização de baixa razão água/cimento promove uma maior compactação do compósito gerado, e, consequentemente, uma maior resistência as intempéries climáticas (SANTOS et al.,2015a).

De acordo com Soto (2010), o método da extrusão consiste em comprimir um material com comportamento pseudoplástico, com tensão de escoamento, através de uma abertura onde irá gerar um fluxo desse material e atingir uma configuração geométrica que será formada de acordo com a

geometria da boquilha, onde o material é submetido a altas tensões tangenciais e normais. O método de extrusão é mais eficiente que os demais quando comparado ao gasto de energia na produção, variedades de geometrias dos produtos e menor custo de implantação da linha de produção, além de ter um melhor desempenho mecânico e uma maior durabilidade (TEIXEIRA, 2010).

Segundo Soto (2010), as máquinas extrusoras podem ser conceitualmente de dois mecanismos: por pistão (ram extruder) e à rosca (auger extruder). A extrusora por pistão funciona em regime intermitente onde um pistão ligado excentricamente a um grande volante, força o material a ser compactado por meio de um tronco de cone, enquanto a extrusora à rosca, trabalha em regime contínuo e é um processo muito usado para resíduos (QUIRINO, 1991). As máquinas à rosca podem ser fabricadas com uma câmara de vácuo que tem o objetivo de reduzir a quantidade de vazios existentes na mistura que estiver sendo extrudada (TEIXIERA, 2010).

As partes constituintes de uma máquina extrusora de vácuo estão apresentados na Figura 2, onde está sendo detalhada a câmara de mistura, a câmara de vácuo, a câmara de compactação e a boquilha.

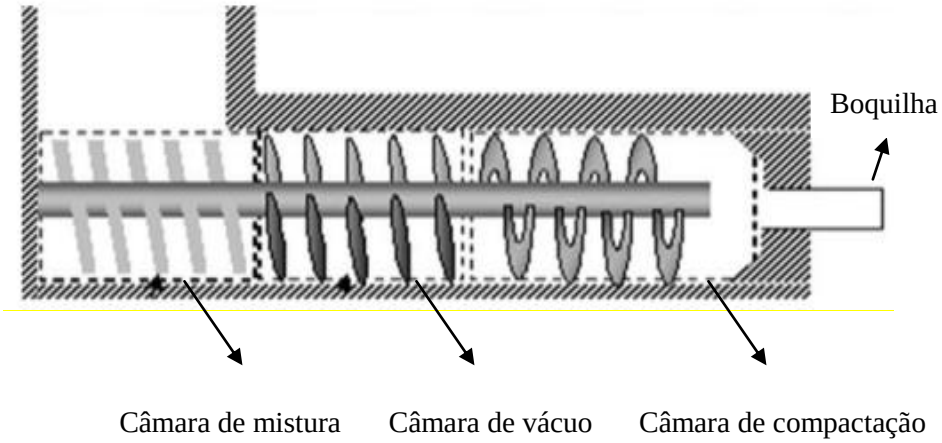

Figura 2 Detalhes do mecanismo de extrusão a vácuo

Fonte: Soto (2010)

A câmara de mistura faz a homogeneização da massa, enquanto a câmara de vácuo tem o papel de misturar e eliminar possíveis bolsões de ar e o excesso de água da massa, já a câmara de compactação tem a função de pressionar a massa contra boquilha, compactando e auxiliando na orientação das fibras na matriz cimentícia.

Apesar do grande potencial da tecnologia de extrusão, ela não tem sido amplamente adotada pela indústria de fibrocimento. Algumas razões são a falta de informação sobre a reologia apropriada das misturas extrudáveis e o elevado custo dos modificadores reológicos (SANTOS et al., 2015a).

3.4 Usos de fibras vegetais em compósitos cimentícios

Os principais constituintes das fibras lignocelulósicas são a celulose, a hemicelulose e a lignina. Outros componentes também podem ser encontrados, entre eles, compostos inorgânicos e moléculas extraíveis com solventes

orgânicos, como pectinas, carboidratos simples, terpenos, alcalóides, saponinas, polifenólicos, gomas, resinas, gorduras e graxas, entre outros (ARAÚJO; WALDMAN; PAOLI, 2008; MOHAM et al., 2006). As plantas lenhosas em média são constituídas de 40-50% de celulose, 20-30% de hemicelulose e 20-28% de lignina, além de outras substâncias em menores teores (ROGALINSKY; INGRAM; BRUNNER, 2008). As fibras vegetais podem ser encontradas em uma ampla variedade morfológica (diâmetro, comprimento, relação de esbeltez e rugosidade da superfície) e de forma (feixes de fibra ou polpa). Além disso, a superfície pode ser facilmente modificada unindo grupos funcionais ao OH de modo obter um caráter menos hidrofílico (FARAUK et al., 2012).

Na engenharia dos materiais as fibras vegetais podem ser classificadas como um compósito natural, em que as fibrilas de celulose são mantidas coesas por uma matriz constituída de lignina e hemicelulose (JAYARAMAN, 2003), cuja função é agir como barreira natural à degradação microbiana e servir como proteção mecânica, já as características estruturais estão relacionadas à natureza da celulose e à sua cristalinidade (SILVA et al., 2009). Um esquema mostrando o arranjo mais comum dos componentes lignocelulósicos presentes nas fibras vegetais está apresentado na Figura 3.

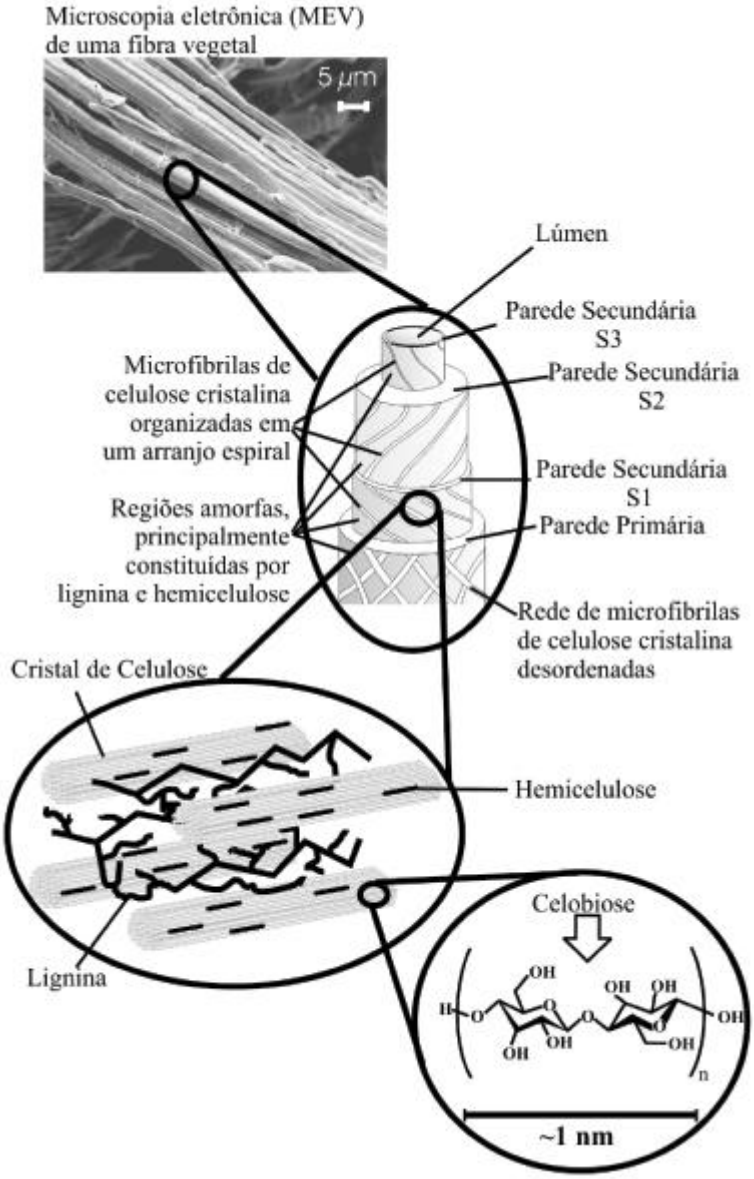

Figura 2 Microestrutura de uma fibra vegetal, onde a imagem de MEV se refere a uma fibra de *Eucalyptus* sp.

Fonte: Silva et al., (2009)

Nas ultimas duas décadas, um esforço considerável tem sido destinado ao uso de fibras vegetais, nas mais variadas composições e misturas, como reforço em compósitos cimentícios. Essas fibras são encontradas em abundancia nos países tropicais e subtropicais, apresentam relativo baixo custo, são renováveis, não tóxicas, apresentam boas propriedades térmicas e mecânicas, o que viabiliza e incentiva o uso dessas fibras na busca por materiais compósitos de alto desempenho e baixo custo (RAMAKRISHNA; SUNDARARAJAN, 2005; BELAADI et al., 2013).

Estudos apontam que os compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais melhoram o isolamento térmico (KHEDARI, WATSANASATHAPORN; HIRUNLABH, 2005), diminuem a massa específica, apresentam ótimos valores de resistência à tração e ao impacto, além de obter um maior controle da fissuração e comportamento dúctil na ruptura (TONOLI., 2009b; TEIXEIRA, 2010; IKAI et al., 2010; TONOLI et al., 2013a). O uso dessas fibras naturais como reforço em compósitos, no geral, é considerado uma das mais promissoras tecnologias da engenharia sustentável (AZIZ; PARAMASIVAM; LEE, 1981).

As pesquisas apontam uma infinidade de fibras naturais com potencial uso como reforço em fibrocimento, tais como as fibras celulósicas, juta, sisal, linho, cânhamo, agave, lufa (TOLEDO FILHO; SANJUÁN, 1999; MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2005; TONOLI et al., 2007; JOHN; THOMAS, 2008; TONOLI et al., 2013a; JUÁREZ et al., 2007; TONG et al., 2014), partículas de malva, kenaf, coco, bagaço de cana, talos de trigo, pseudocaule de bananeira (SAVASTANO Jr; AGOPYAN, 1999; KIM et al., 2014; RAMAKRISHNA; SUNDARARAJAN, 2005; TEIXEIRA, 2010; KHORAMI et al., 2011; SAVASTANO Jr et al., 2005), entre outras.

O gênero *Eucalyptus* vem despertando o interesse dos produtores e pesquisadores que trabalham com fibrocimentos, devido ao seu rápido

crescimento, boa distribuição, abundancia e baixo custo, quando comparado as coníferas. As principais pesquisas englobam o uso da polpa celulósica de eucalipto em substituição a polpa celulósica de coníferas (TONOLI., 2009b; PIZZOL, 2013; SANTOS et al., 2015a), no entanto, falta conhecimento quanto ao uso de fibras da madeira de eucalipto (processos mecânicos e termomecânicos) como reforço em fibrocimentos.

Atualmente o processo mais utilizado para a produção de fibras para painéis MDF é a polpação termomecânica, está, envolve um pré-tratamento com calor e pressão, objetivando reduzir o consumo de energia e melhorar a qualidade das fibras (KOLLMANN; KNENZIE; STAMM, 1975). Segundo Iwakiri (2005) podem ser empregados métodos de impregnação com água ou mesmo, por aquecimento a vapor, com ou sem a combinação de um cozimento químico suave, como por exemplo, hidróxido de sódio (NaOH). As vantagens desse tratamento são rendimentos superiores, na faixa de 90 a 93%, e a obtenção de uma polpa mais homogênea com as paredes das fibras pouco danificadas, fibras mais flexíveis com melhores propriedades de feltragem (entrelaçamento) produzindo chapas mais resistentes.

3.5 Durabilidades dos fibrocimentos sem amianto

Apesar das pesquisas apontarem o potencial uso de fibras naturais como reforço em compósitos cimentícios, existe algumas ressalvas quanto à baixa durabilidade dos compósitos e os mecanismos de degradação dessas fibras na matriz cimentícia. Muitas tentativas de produção de argamassas ou pastas de cimento *Portland* comum reforçadas com fibras vegetais não obtiveram êxito devido aos compósitos apresentarem vida útil entre 2 a 4 anos (AGOPYAN, 1991).

Uma das principais causas dessa rápida degradação é a elevada alcalinidade (pH próximo de 13) da água presente nos poros da matriz de cimento *Portland*, os álcalis agem principalmente nas regiões amorfas das fibras, degradando primeiramente as hemiceluloses e a lignina (GRAM, 1983; TOLÊDO FILHO et al., 2000). Outro mecanismo de degradação importante é a chamada mineralização das fibras, que consiste no acumulo dos álcalis da hidratação do cimento no interior da célula (lúmen), acarretando na diminuição da flexibilidade, bem como, em um comportamento frágil e quebradiço das fibras, diminuindo assim a tenacidade do compósito (MOHR; NANKO; KURTIS, 2005; TOLÊDO FILHO et al., 2000).

A baixa estabilidade dimensional normalmente característica das fibras lignocelulósicas também prejudica a durabilidade dos compósitos, devido ao efeito de expansão e contração das fibras, que com o tempo vai quebrando as ligações na interface fibra/matriz, formando espaços vazios, o que pode acarretar em uma diminuição significativa das propriedades mecânicas dos compósitos (SAWSEN et al., 2015).

Quanto ao efeito dos componentes químicos das fibras lignocelulósicas na matriz cimentícia, algumas pesquisas revelam que a lignina presente nas fibras é facilmente degradada pelos álcalis presentes na água do cimento, enfraquecendo as ligações entre fibra/matriz, corroborando com a diminuição da vida útil dos compósitos (AGOPYAN et. al., 2005; BENTUR; AKERS, 1989). Porém outras pesquisas apontam que a lignina aumenta a estabilidade dimensional e diminui o caráter higroscópico das fibras, acarretando em melhora da interface fibra/matriz e diminuição do mecanismo de mineralização das fibras (MORH et. al., 2006; NANKO; OHSAWA, 1991). Já os extrativos presentes nos materiais lignocelulósicos podem interferir no tempo de pega e hidratação do cimento, prejudicando a resistência mecânica dos compósitos, ou mesmo, inviabilizando o uso das fibras *in natura* (SELLAMI; MERZOUD; AMZIANE,

2013; CHAFEI et al., 2014). As hemiceluloses são responsáveis por boa parte da higroscopicidade das fibras, agindo como um facilitador do processo de mineralização das fibras, além de ser facilmente degradada pelos álcalis presentes na água do cimento, prejudicando a interface fibra/matriz (CHAFEI et al., 2012; CHAFEI et al., 2014).

3.6 Estratégias para melhorar a durabilidade dos compósitos

Inúmeras técnicas vêm sendo testadas com intuito de diminuir o caráter higroscópico das fibras naturais (variação dimensional) e o efeito dos mecanismos de degradação das fibras pelos álcalis presentes na água do cimento (SANTOS et al., 2015b).

Muitas pesquisas apontam o uso de tratamentos químicos que visam degradar os componentes não-celulósicos presentes nas fibras naturais, assim diminuem-se possíveis incompatibilidades entre fibras e matriz, bem como, aumenta a resistência do material de reforço à alcalinidade do cimento. Entre as polpas celulósicas testadas tem-se polpa de sisal, de pseudocaule de bananeira, bambu, algodão, talos de milho, talos de canabis, entre outras (JAROBA et al., 2013; JAROBA et al., 2012; SAVASTANO Jr. Et al., 2005; SAVASTANO Jr et al., 2009; JOAQUIM et al., 2009; SAVASTANO Jr. et al., 2003; SAVASTANO Jr. et al., 1999). Porém estes tratamentos encarecem o processo produtivo, utiliza produtos químicos nocivos ao meio ambiente e produz uma série de resíduos agroindustriais.

A modificação superficial das fibras também vem sendo muito cogitada, e consiste em ligar outras moléculas às fibras com intuito de diminuir a higroscopicidade do material de reforço e melhorar a ligação fibra/matriz (SANTOS et al., 2015b). O uso de silanos na modificação das fibras tem sido promissor, estudos mostram o bom desempenho mecânico e a redução do caráter

higroscópico das fibras de bagaço de cana modificada e polpa de eucalipto modificada (BARRA et al., 2012; BILBA; ARSÈNE, 2008; ABDELMOULEH et al., 2002; TONOLI et al., 2013b). Um aspecto desfavorável desta técnica é o uso de grandes quantidades de reagentes químicos e o relativo alto custo dos silanos, necessitando de aprimoramento e desenvolvimento de tecnologias que viabilizem seu uso.

Uma técnica que também vem sendo estudada é a chamada cornificação das fibras, que consiste em ciclos de saturação por água e posterior secagem, onde por efeito de colapso ocorre o achatamento da parede celular e a diminuição de espaços vazios. O efeito da cornificação das fibras nos compósitos cimentícios ainda está em discussão. Resultados preliminares apontam uma melhora na estabilidade dimensional das fibras, bem como, uma melhor ancoragem das fibras na matriz cimentícia (SANTOS et al., 2015b). Novos estudos estão em andamento, com intuito de entender o efeito desta técnica nas fibras destinadas ao reforço de matrizes cimentícias.

3.7 Tratamentos térmico

O tratamento térmico vem sendo muito empregado no tratamento da madeira maciça, partículas e lâminas de madeira para uso geral. Está técnica consiste de aquecer o material lignocelulósico em faixas de temperaturas inferiores à carbonização, ou seja, abaixo de 280 °C (SILVA, 2012; BORGES; QUIRINO, 2004). O efeito desta técnica varia dependendo do tipo de material, da temperatura e do tempo de exposição, em geral, acarreta em aumento da cristalinidade da celulose, aumento da quantidade de lignina, diminuição da quantidade de hemicelulose e extrativos, gerando um produto com melhor estabilidade dimensional, com maior dureza superficial, resistente contra intempéries nas propriedades de molhabilidade, além de melhorar a ligação com adesivos hidrofóbicos (KOCAEFE; PONCSAK; BOLUK, 2008; GOODRICH et

al, 2010; WINDEISEN; WEGWNER, 2008; AWOYEMI; JONES, 2011; BRITO et al., 2006).

Em geral o tratamento térmico em fibras de madeira é pouco usual, necessitando de estudos que visem difundir o efeito deste tipo de tratamento nas propriedades físico-mecânicas e na composição química das fibras. No entanto, considerando que as modificações nas fibras sejam semelhantes as que ocorrem na madeira, este tipo de tratamento em fibras de madeira pode ser uma alternativa viável quanto ao aumento da durabilidade de fibrocimentos reforçados com fibras naturais.

O aumento da estabilidade dimensional das fibras de madeira em uma matriz cimentícia pode promover uma melhor interface fibra-matriz, alem de diminuir o efeito da mineralização das fibras, quantidades menores de extrativos e hemiceluloses na superfície das fibras também são desejáveis, já que estes podem interferir no tempo de pega do cimento prejudicando as propriedades físico-mecânicas dos fibrocimentos. No entanto altos teores de lignina podem prejudicar a interface fibra-matriz, ocasionando um aumento da porosidade nesta região (MORH et. al., 2006; TONOLI et al., 2012; SELLAMI; MERZOUD; AMZIANE, 2013; CHAFEI et al., 2014). Devido às características peculiares desta técnica, o seu baixo custo quando comparado às técnicas atualmente estudadas para aumentar a durabilidade dos fibrocimentos, assim como a falta de informação, estudos que visem avaliar pré-tratamentos térmicos nos materiais de reforço são justificáveis, e podem contribuir no aumento da vida útil desses compósitos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste estudo foi realizado no complexo laboratorial da Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM), localizado na Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, Brasil.

Na primeira fase deste trabalho foi avaliada a qualidade de reforço proporcionado por diferentes porcentagens de fibras de eucalipto em compósitos cimentícios, bem como, realizado uma avaliação quanto ao efeito da composição química das fibras no tempo de pega e na hidratação do cimento. O melhor nível de

reforço foi escolhido através das propriedades físico-mecânicas dos compósitos cimentícios, com intuito de dar início à segunda fase deste trabalho.

Na fase seguinte deste projeto, foi avaliado o uso de diferentes temperaturas no tratamento térmico das fibras de eucalipto, com intuito de avaliar o efeito das modificações térmicas nas fibras, bem como, nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos cimentícios.

4.1 Matéria-prima

O material reforçante utilizado para o desenvolvimento deste trabalho foi as fibras de *Eucalyptus* spp. (árvores em média com 7 anos de idade) provindas de processo termomecânico, onde na passagem dos cavacos pelos rotores é adicionado 0,8% em massa de emulsão de parafina com intuito de melhorar a estabilidade dimensional das fibras e diminuir o desgaste dos rotores. Estas fibras foram coletadas na unidade industrial de produção de Painéis de Fibras de Média Densidade (MDF) da empresa ECTX.SA (Eucatex), Salto de Itu – SP, Brasil. A escolha destas fibras se deve ao baixo custo de produção, por existir abundância de matéria-prima (plantios de eucaliptos) no Brasil e no mundo, por ser um processo de produção pouco agressivo ao meio ambiente,

bem como, pela ausência de trabalhos que tenham utilizado este tipo de fibra na produção de fibrocimentos por extrusão.

A matriz cimentícia utilizada neste estudo foi composta por cimento Portland CPV–ARI (NBR 5733) e calcário agrícola moído. A escolha deste cimento se deve a sua alta resistência inicial. Quanto ao uso do calcário agrícola, este se deve a diminuição de custos, prática bastante usual em empresas produtoras de compósitos cimentícios. Para auxiliar no processo de extrusão foi adicionado à mistura dois modificadores reológicos, Hidroxipropelmetilcelulose (HPMC) e poliéter carboxílico (ADVA).

4.2 Produção dos compósitos

Os compósitos foram produzidos em escala laboratorial por procedimento de extrusão, de modo a se poderem utilizar os resultados posteriormente para aplicação na indústria. As variáveis e níveis que foram utilizados neste trabalho estão indicados na Tab. 1.

Tabela 1 Plano experimental da primeira fase deste trabalho

Fibra	Cimento (%)	Calcário (%)
0%	68	30
1%	67	30
2%	66	30
3%	65	30
4%	64	30
5%	63	30

A escolha dessas percentagens de fibras em substituição ao cimento foi definida em função de pesquisas e experiências anteriores.

Para o desenvolvimento da segunda fase deste projeto a porcentagem de fibras utilizada como reforço foi definida através da avaliação das propriedades físico-mecânicas da fase anterior, assim, foi utilizado 3% de fibras como reforço em todos os tratamentos presentes na segunda fase.

Com intuito de controlar precisamente os parâmetros definidos para os tratamentos térmicos das fibras foi utilizado um forno "Macro-ATG" (Figura 5) desenvolvido através de uma parceria da Universidade Federal de Lavras com o Centro de Pesquisa Agrícola Francês para o Desenvolvimento Internacional (CIRAD - França). Os parâmetros passíveis de controle neste forno são:

- Capacidade de até 10 Kg de material;
- Temperatura de até 1000°C, podendo realizar ilimitadas programações de temperatura;
- Taxa de aquecimento de até 40° $C.min^{-1}$;
- Atmosfera controlada com possibilidade de uso individual ou mistura com vários tipos de gases durante o tratamento térmico (N_2; CO_2; CO; O_2 e H_2);
- Fluxos gasosos controlado entre 0 a 100 $nL.min^{-1}$;
- Pressão no reator controlado entre pressão atm e 10 bar.

Figura 3 Forno “Macro ATG” desenvolvido em parceria entre a UFLA e o CIRAD

Os parâmetros utilizados foram taxa de aquecimento de 10° $C.min^{-1}$, tempo de exposição de 60 minutos em atmosfera livre de O_2 (atmosfera saturada em N_2). O plano experimental da segunda fase consistiu de tratar as fibras de eucalipto nas temperaturas de 140°; 170°; 200° e 230°C. Para posteriormente, produzir os fibrocimentos.

A composição (porcentagem em massa) de cada matéria-prima utilizada nas argamassas para produção dos compósitos foi de aproximadamente: 0 a 5% de fibras de eucalipto; 63 a 68% de cimento Portland (CPV-ARI); 30% de calcário; relação água/cimento de 0,4; 1% de Hidroxipropelmetilcelulose (HPMC); e 1% de poliéter carboxílico (ADVA).

A mistura dos materiais foi realizada em uma batedeira planetária. Primeiramente o cimento, o calcário e o HPMC foram misturados em uma rotação de 140 rpm (rotações por minuto) por um período de 2 minutos, posteriormente foi adicionada a fibra de eucalipto, o ADVA e a água (0,4 em

relação a massa do cimento), permanecendo em rotação de 285 rpm por mais 5 minutos a fim de promover a distribuição homogênea da fibra de eucalipto na argamassa formada.

Os compósitos foram obtidos com auxílio de uma extrusora laboratorial mono-rosca da marca Verdés mod. 051. A argamassa foi passada duas vezes na extrusora, com velocidade de rosca de aproximadamente 25 rpm, com intuito de homogeneizar a argamassa e orientar as fibras no sentido da extrusão. Corpos de prova medindo 28 mm x 18 mm x 200 mm (largura, espessura e comprimento, respectivamente) foram moldados pela extrusora. Para cada tratamento foram produzidos 30 corpos-de-prova.

Após a moldagem as placas foram armazenadas em sacos plásticos selados, onde ficaram mantidas em temperatura ambiente por dois dias. Em seguida as placas obtidas na primeira fase deste trabalho foram submetidas à cura em ambiente com alta umidade relativa (> 90% UR) para acelerar e/ou otimizar o processo de cura, que teve duração de 28 dias. Já as placas oriundas da segunda fase deste trabalho foram submetidas à cura em câmara de vapor por um período de 7 dias.

4.3 Caracterização das fibras de eucalipto

Os principais atributos físicos das fibras foram determinados por microscopia óptica: comprimento médio, largura média e razão de aspecto. A densidade básica da fibra foi definida segundo critérios da norma NBR 11.941 (ABNT, 2003), para medir o volume saturado foi necessário uma adaptação, este foi medido pelo deslocamento da água após adição das fibras de eucalipto já saturadas, com auxilio de uma proveta graduada.

Com intuito de avaliar as possíveis alterações na composição química das fibras, devido aos diferentes tratamentos térmicos, foi realizada uma análise

química criteriosa dessas fibras antes e após os tratamentos térmicos onde foram avaliadas:

- Porcentagem de lignina total de acordo com a NBR 7.989 (ABNT, 2010);
- Porcentagem de extrativos de acordo com a NBR 14.853 (ABNT, 2010);
- Porcentagem de cinzas de acordo com a NBR 13.999 (ABNT, 2003);
- Porcentagem de celulose segundo critérios descritos por Browning (1963);
- Porcentagem de hemicelulose calculada por diferença.

4.4 Propriedades mecânicas dos compósitos

Os testes mecânicos foram executados em uma máquina de testes universal da marca Arotec, equipada com célula de carga de 2 kN. Uma configuração com três cutelos (vão inferior igual a 150 mm) foi empregada na determinação dos valores de módulo de ruptura (MOR), limite de proporcionalidade (LOP), módulo elástico (MOE) e energia específica (Tenacidade) do material. Os parâmetros do ensaio foram uma configuração adaptada dos procedimentos descritos por RILEM (1984), sendo avaliados 10 corpos de prova por tratamento.

4.5 Propriedades físicas dos compósitos

As propriedades físicas avaliadas neste estudo foram: absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA). Os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas, para posteriormente adquirir as massas imersas (M_I) e úmidas (M_U), em seguida foram deixados em estufa a 105ºC por 24 horas para realização da pesagem a seco (M_S). Os procedimentos adotados para o calculo das propriedades físicas deste trabalho seguem as especificações

da norma ASTM C 948-81 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1981), sendo avaliados 10 corpos de prova por tratamento.

4.6 Análise dos resultados

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado. Para avaliar as variações nas propriedades físico-mecânicas dos fibrocimentos produzidos na primeira fase deste trabalho, estas foram submetidas à análise de variância e análise de regressão, ambas a 1% de significância. Já na segunda fase os resultados obtidos para as propriedades físico-mecânicas dos fibrocimentos foram submetidos à análise de variância e teste de média (Scott-Knott), ambas a 5% de significância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das fibras de eucalipto

Os valores médios com seus respectivos desvios padrão para as propriedades anatômicas das fibras estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 Propriedades anatômicas das fibras de eucalipto

Comprimento (μm)	979,11±193,29
Diâmetro (μm)	19,24±3,12
Parede celular (μm)	4,98±1,25
Diâmetro do lúmen (μm)	9,11±3,08
Razão de aspecto	46,95±10,69

Os valores encontrados neste estudo condizem com Gonçalez et al.

(2014) que avaliaram a variação de densidade básica da madeira e aspectos anatômicos das fibras de um clone de *Eucalyptus urograndis*, estes encontraram valor médio de comprimento de fibra de 900 μm, diâmetro médio da fibra de 16,91 μm, largura da parede celular de 5,61 μm e diâmetro do lúmen de 7,12 μm.

A densidade básica média com seu respectivo desvio padrão das fibras de eucalipto foi de 0,186±0,017 g/cm^3, valor este, bem abaixo dos valores de densidade básica comumente encontrado para madeira de *Eucalyptus* spp. que giram em torno de 0,436 a 0,668 g/cm^3 (RIBEIRO; ZANI FILHO, 1993). Isso porque foi calculado a densidade básica da fibra, ou seja, não existe um arranjo e uma densificação do número de fibras, diferentemente da madeira que é formada por um conjunto de inúmeras fibras unidas entre si.

A variação dos componentes químicos das fibras de eucalipto em função das diferentes temperaturas utilizadas no tratamento térmico (segunda fase) está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 Variação dos componentes químicos das fibras após tratamento térmico

Temp.	**Lignina**	**Extrativo**	**Cinzas**	**Holo**	**Celulose**	**Hemi**
Test.	20,52±1,99	10,42±0,43	0,472±0,044	69,59	46,09	23,50
140 °C	22,38±3,84	9,97±0,10	0,449±0,009	69,38	48,03	21,36
170 °C	21,50±0,41	10,49±0,04	0,640±0,010	68,88	48,61	20,27
200 °C	24,33±1,16	8,20±0,28	0,416±0,013	65,66	43,73	21,94
230 °C	24,97±0,11	7,53±0,48	0,600±0,039	65,90	44,44	21,46

Holo: holocelulose; Hemi: hemicelulose

Nota-se uma tendência de aumento no teor de lignina, de diminuição no teor de extrativo e de holocelulose na medida em que se aumenta a temperatura. Estas variações ocorrem devido aos extrativos e a hemicelulose terem menor temperatura de degradação inicial que a lignina e a celulose (SILVA, 2012). Os

valores observados neste trabalho foram próximos ou inferiores aos valores encontrados na literatura, segundo Sjostron (1981), Miller (1999), Klock (2005) e Mori et al. (2003) a quantidade de lignina na madeira pode variar entre 23 a 33%, a quantidade de extrativos pode variar de 5 a 30%, o teor de cinzas entre 0,2 a 1%, a quantidade de celulose entre 40 e 50% e a quantidade de hemicelulose entre 20 a 40%.

No geral, o tratamento térmico não foi muito eficiente, se pode observar pouca variação no teor de lignina e de extrativos. O que indica que o tempo de exposição não foi suficiente.

5.2 Fibrocimentos reforçados com diferentes porcentagens de fibras

Os fibrocimentos produzidos com diferentes porcentagens de fibras de eucalipto (0 a 5%) obtiveram tempos de pega e hidratação diferenciados. Foi observado que o tempo de pega com 0% de fibra começou com 1 dia, de 1 a 3% de fibras o tempo de pega foi entre 4 a 6 dias, enquanto com 4 e 5% de fibras o tempo de pega variou entre 17 a 19 dias. Assim este atraso pode ser explicado pelo aumento em massa de extrativos e hemiceluloses que ocorre devido ao aumento da porcentagem de fibras em substituição a massa do cimento. Pois segundo Sellami; Merzoud; Amziane (2013) e Chafei et al. (2014) os extrativos e as hemiceluloses presentes nos materiais lignocelulósicos podem interferir no tempo de pega e hidratação do cimento, prejudicando a resistência mecânica dos compósitos, ou mesmo, inviabilizando o uso das fibras *in natura*.

5.2.1 Propriedades físicas

Os valores médios com seus respectivos desvios padrão, bem como, as análises de regressão para as propriedades: absorção de água, porosidade

aparente e densidade aparente, estão apresentadas nas Figuras 5, 6 e 7, respectivamente.

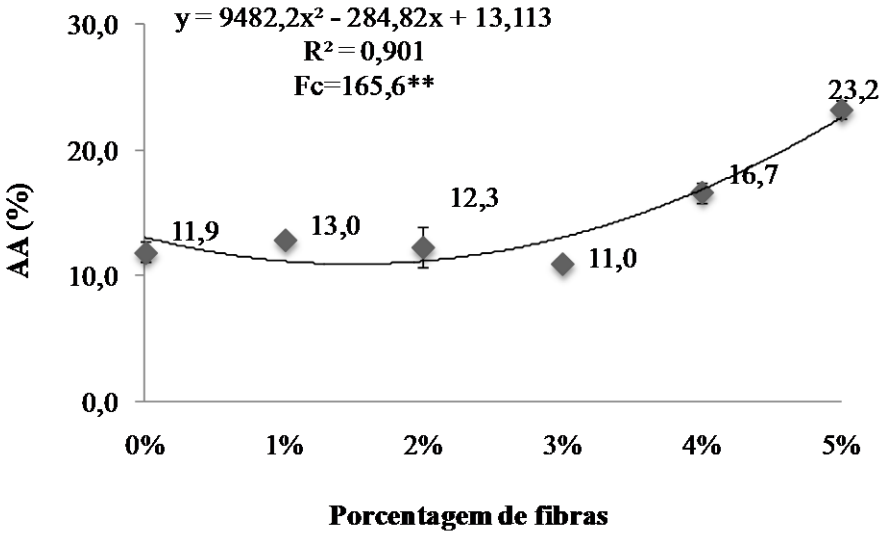

Figura 4 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão para a propriedade absorção de água após 24 horas de imersão em água nos diferentes níveis de reforço avaliados

**Análise de regressão significativa à nível de 1%

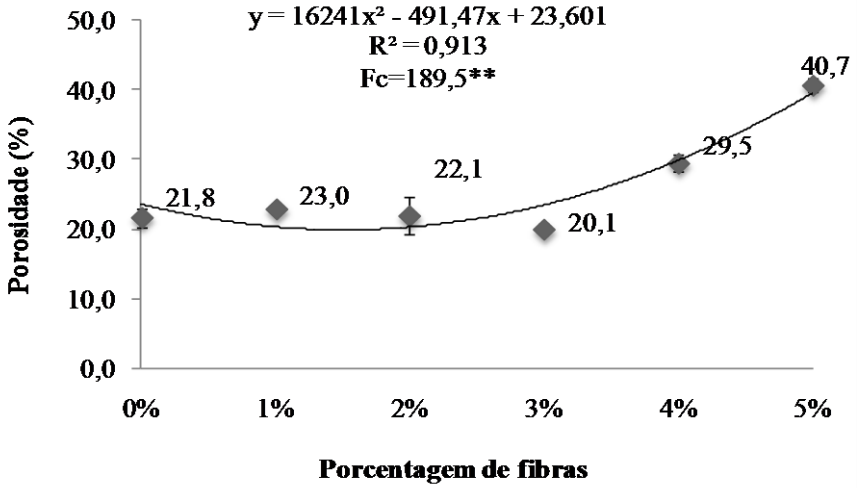

Figura 5 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão para a propriedade porosidade aparente nos diferentes níveis de reforço avaliados
**Análise de regressão significativa à nível de 1%

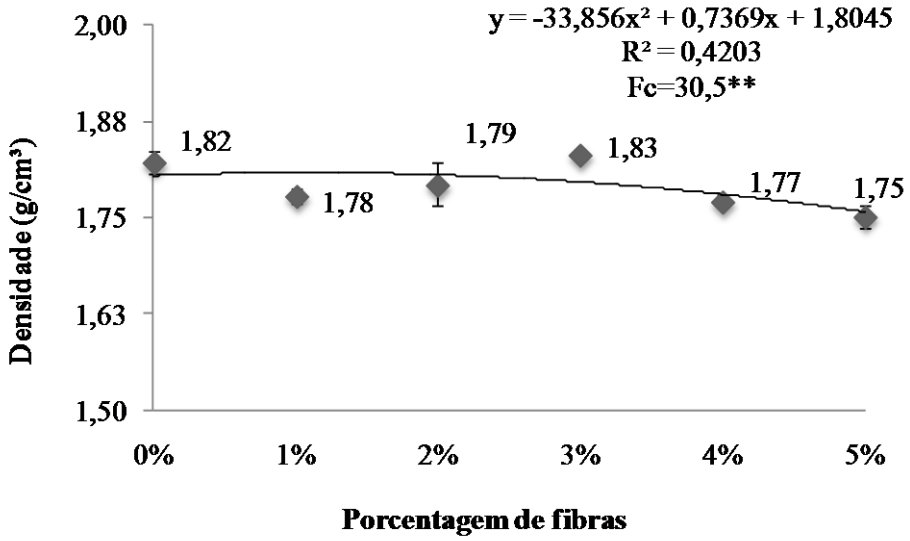

Figura 6 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão para a propriedade densidade aparente nos diferentes níveis de reforço avaliados
**Análise de regressão significativa à nível de 1%

Houve diferença significativa na análise de regressão para as propriedades físicas absorção de água, porosidade e densidade aparente. Foi observado uma tendencia positiva das propriedades absorção de água e porosidade na medida em que se aumentava a porcentagem de reforço com fibras de eucalipto. Ao passo que os valores de densidade aparente obtiveram um leve decréscimo na medida em que se aumentava os níveis de reforço.

Estes resultados podem ser explicados pela baixa densidade básica (0,186 g/cm^3), pela própria higroscopicidade das fibras, além da alta área superficial das fibras, que acarretam em compósitos menos densos e com mais espaços vazios, bem como, o atraso na pega e hidratação do cimento (incompatibilidade com extrativos e hemiceluloses), prejudicando a interface fibra-matriz, o que explica o aumento da absorção de água e da porosidade dos fibrocimentos com 4% e 5% de fibras.

Em um estudo realizado por Brasileiro, Vieira e Barreto (2013) os autores avaliaram o uso de fibra de coco na produção de compósitos cimentícios, bem como, o efeito da adição de areia quanto as propriedades físico-mecânicas e encontraram valores de AA entre 12 a 37%, de PA entre 23 a 37% e de DA entre 0,99 a 2,00 g/cm³. Já Teixeira (2010) avaliando diferentes níveis de reforço (0 a 5%) de bagaço de cana em fibrocimentos produzidos pelo processo de extrusão encontrou valores de PA variando de 29 a 31% e de DA entre 1,64 a 1,75 g/cm³. Os valores obtidos neste estudo foram coerentes com os resultados encontrados na literatura.

De maneira geral os resultados obtidos para as propriedades físicas foram satisfatórios e coerentes com a literatura, segundo critérios da norma NBR 12800 (ABNT, 1993) que estabelece que os fibrocimentos utilizados nas telhas livres de amianto não podem ter absorção de água acima de 37%. Assim todos

os resultados obtidos neste estudo para os fibrocimentos com diferentes níveis de reforço, após 28 dias de cura, atenderam este requisito.

5.2.2 Propriedades mecânicas

As análises de regressão, com os seus devidos valores médios e respectivos desvios padrão para as propriedades: módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE), limite de proporcionalidade (LOP) e energia específica (tenacidade) estão apresentados nas Figuras 8, 9, 10 e 11, respectivamente.

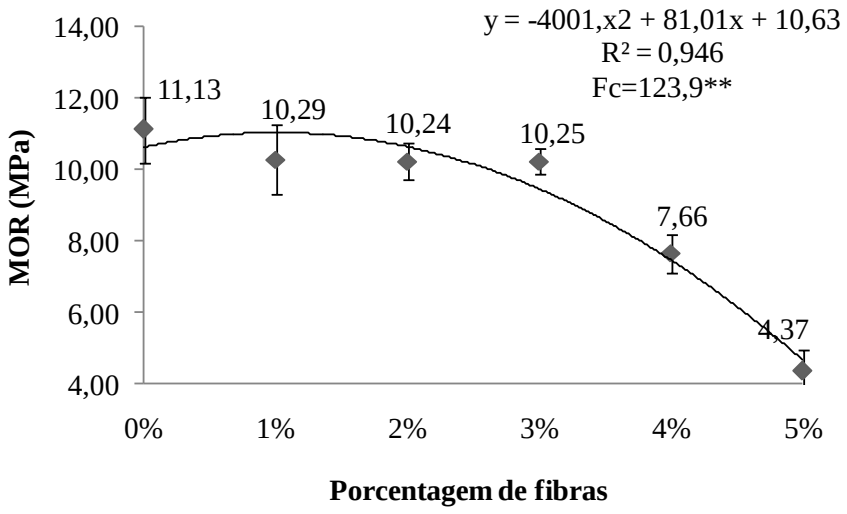

Figura 7 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão da propriedade módulo de ruptura à flexão estática nos diferentes níveis de reforço avaliados

**Análise de regressão significativa à nível de 1%

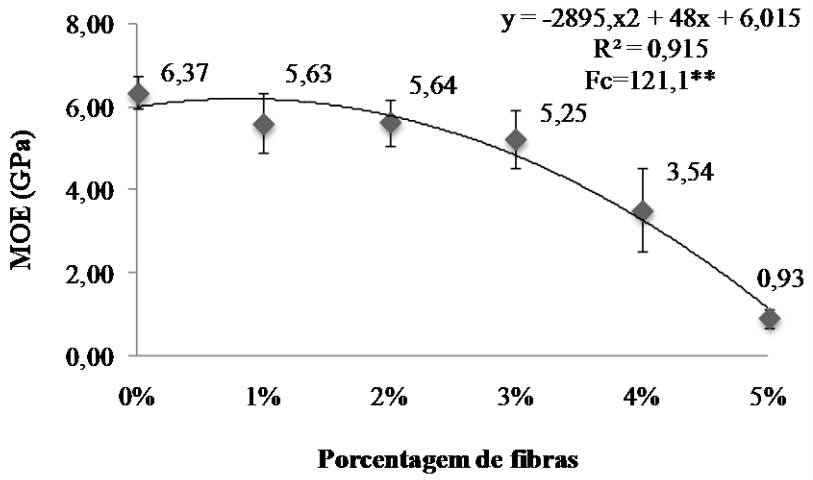

Figura 8 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão da propriedade módulo de elasticidade à flexão estática nos diferentes níveis de reforço avaliados

**Análise de regressão significativa à nível de 1%

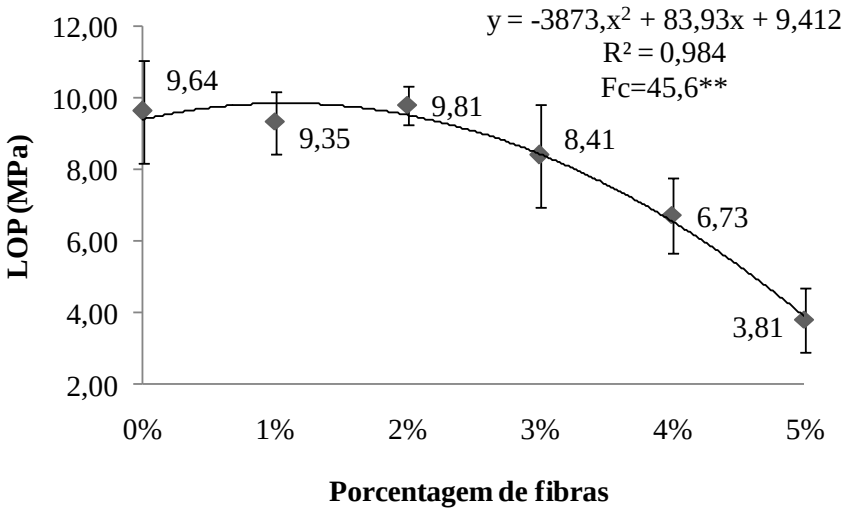

Figura 9 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão da propriedade limite de proporcionalidade à flexão estática nos diferentes níveis de reforço avaliados

**Análise de regressão significativa à nível de 1%

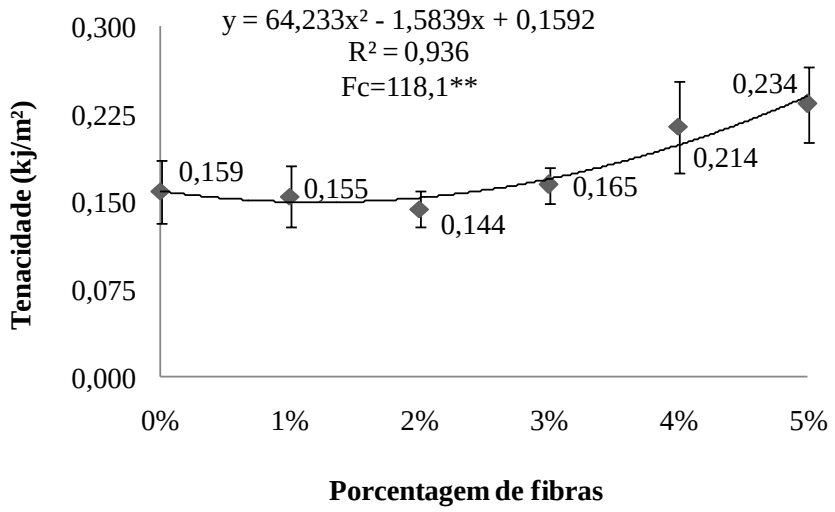

Figura 10 Análise de regressão, valores médios e respectivos desvios padrão da propriedade energia específica (tenacidade) nos diferentes níveis de reforço avaliados

**Análise de regressão significativa à nível de 1%

Houve diferença significativa nas análises de regressão para as propriedades mecânicas módulo de ruptura, módulo de elasticidade e energia específica em função do nível de reforço dos fibrocimentos. Os fibrocimentos com 4% e 5% de reforço com fibras tiveram as propriedades MOR, MOE e LOP menores em comparação com os demais níveis de reforço. Já a energia específica desses fibrocimentos foi significativamente maior que aos demais níveis de reforço.

Estes resultados podem ser explicados pelo atraso na pega do cimento, ocasionados pela presença de extrativos e hemiceluloses nas superfícies das fibras. Os fibrocimentos com 4% e 5% de fibras iniciaram a pega após 17 e 19

dias, respectivamente. Enquanto que a pega dos outros níveis iniciou-se antes dos 6 primeiros dias de cura.

Teixeira (2010) estudando o bagaço de cana como reforço na produção de fibrocimentos pelo processo de extrusão encontrou valores de MOR entre 9,5 a 11,6 e de tenacidade entre 0,32 a 0,63 kJ/m². Já Mendes (2014) estudando o efeito da modificação química por silanos em polpa celulósica de eucalipto quanto as propriedades físico-mecânicas de fibrocimentos produzidos por extrusão, relatou valores de 6,42 a 8,29 MPa para o MOR, 6,20 a 8,17 MPa para o LOP, 2,99 a 5,09 GPa para o MOE e 0,33 a 0,42 kJ/m² para a tenacidade.

De modo geral, os resultados das propriedades mecânicas deste trabalho foram próximos ou inferiores aos encontrados na literatura. Os fibrocimentos com até 4% de reforço com fibras foram classificados como de categoria 3 pela norma NBR 15.498 (ABNT, 2007), que considera para essa categoria fibrocimentos com MOR entre 7 a 13 MPa. Os fibrocimentos com 5% foram classificados como categoria 2, segundo a mesma norma, onde o MOR varia entre 2 a 7 MPa.

5.3 Fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente

Para o desenvolvimento da segunda fase deste projeto, que se define pelo uso de fibras de eucalipto tratadas termicamente em diferentes temperaturas com intuito de diminuir a hidrofilicidade e a quantidade de extrativos das fibras, de modo a melhorar as propriedades físicas e a interface fibra-matriz dos fibrocimentos, foi utilizado à quantidade de 3% em massa de fibras em substituição ao cimento.

A escolha desta porcentagem se deve aos resultados satisfatórios do MOR, LOP e do MOE, bem como, pelo menor tempo de pega e hidratação em comparação com os níveis de 4 e 5% de reforço. Tonoli et al. (2012) avaliando o

impacto do branqueamento da polpa celulósica de pinus na interface fibra-matriz, correlaciona de maneira positiva a tenacidade com a capacidade de reforço do material, deste modo, o uso de 3% de fibras acabou prejudicando inicialmente a capacidade de reforço e absorção de energia do fibrocimento quando comparado aos níveis de 4 e 5% de fibras. Porem é esperado com o tempo que ocorra a reprecipitação dos íons das fases do cimento na interface fibra-matriz, possibilitando um aumento da energia específica (MOHR, BIERNACKI; KURTIS, 2007; TEIXEIRA, 2010).

5.3.1 Propriedades físicas

Os valores médios com seus respectivos desvios padrão, bem como, o teste de Scott-Knott a 5% de significância para as propriedades: absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA) dos fibrocimentos reforçados com 3% de fibras tratadas termicamente nas diferentes temperaturas estão apresentadas nas Figuras 12, 13 e 14, respectivamente.

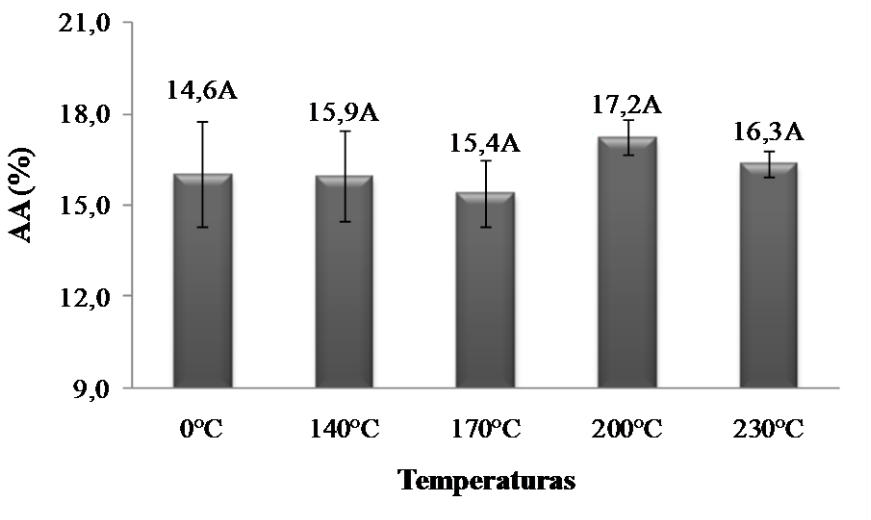

Figura 11 Absorção de água dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância

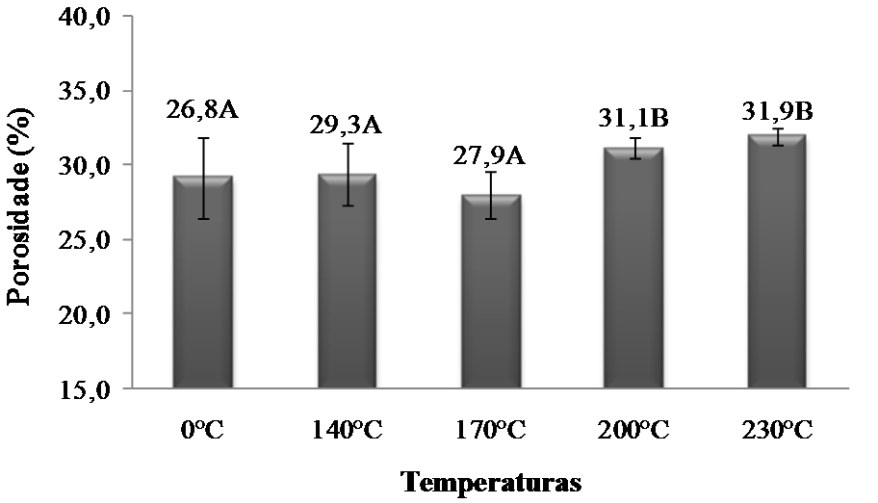

Figura 12 Porosidade aparente dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância

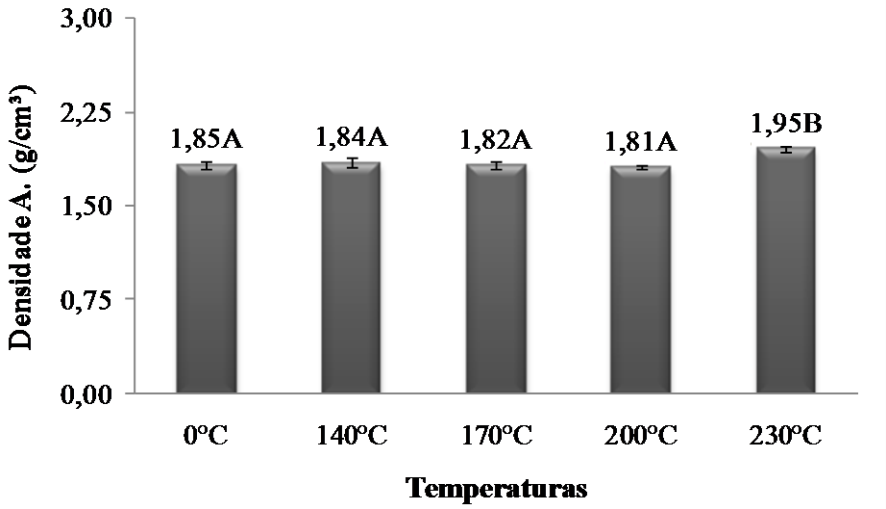

Figura 13 Densidade aparente dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância

Não houve diferença significativa para a propriedade AA entre os fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente com diferentes temperaturas. Já para as propriedades PA e DA houve diferença significativa, sendo os fibrocimentos reforçados com fibras tratadas a 200°C e 230°C os mais porosos e a 230°C os mais densos.

O aumento da PA nos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente nas temperaturas de 200°C e 230°C pode ser explicado pelo aumento do teor de lignina na composição das fibras (Tabela 3), que acarreta em um aumento de poros na região da interface fibra-matriz (TONOLI et al., 2012), bem como, a possível degradação da parafina presente nas fibras acarretando em um caráter mais hidrofílico, o que explica o aumento da PA.

Já o aumento da densidade aparente pode ser explicado pela diminuição do teor de extrativos das fibras (Tabela 3) na medida em que se aumentava a temperatura do tratamento térmico, fato este que pode ter interferido no deslocamento dos extrativos para o interior da matriz cimentícia, de modo que a inibição da hidratação do cimento foi amenizada nos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente com temperaturas mais elevadas.

As propriedades AA e PA deste trabalho foram inferiores ao estudo de Mendes (2014) estudando o efeito da modificação química de polpa celulósica de eucalipto com silanos nas propriedades físico-mecânicas de fibrocimentos produzidos por extrusão. O autor relatou valores variando de 20,89 a 24,74% para AA e 38,03 a 44,87% para PA. Já a DA calculada neste trabalho foi superior ao relatado pelo autor, sendo de 1,75 a 1,86 g/cm³.

Tonoli et al. (2009a) estudando a modificação química de polpa celulósica de eucalipto com silanos metacriloxipropiltri-metoxisilano (MPTS) e aminopropiltri-etoxisilano (APTS) na concentração de 6% em relação a massa de celulose, para a produção de telhas cimentícias, usando a técnica de drenagem à vácuo da mistura e posterior prensagem, obtiveram valores médios, após 28 dias de cura, para a DA entre 1,75 a 1,79 g/cm³, para a AA entre 16,4 a 17,7% e para a PA entre 29,0 a 30,8%. Estes valores de AA e PA foram muito próximos aos encontrados para os fibrocimentos deste trabalho, já as DAs deste estudo foram superiores ao relatado pelos autores.

Em geral as propriedades físicas deste trabalho foram condizentes com o relatado em literatura, em comparação com a norma NBR 12.800 (ABNT, 1993) para telhas livres de amianto, que estabelece AA máxima de 37%, se nota que todos os fibrocimentos reforçados com fibras de eucalipto, independente da temperatura de tratamento térmico atenderam os requisitos mínimos de referência.

5.3.2 Propriedades mecânicas

Os valores médios com seus respectivos desvios padrão, bem como, o teste de Scott-Knott a 5% de significância para as propriedades módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE), limite de proporcionalidade (LOP) e energia específica (Tenacidade) dos fibrocimentos reforçados com 3% de fibras tratadas termicamente nas diferentes temperaturas estão apresentadas nas Figuras 15, 16, 17 e 18, respectivamente.

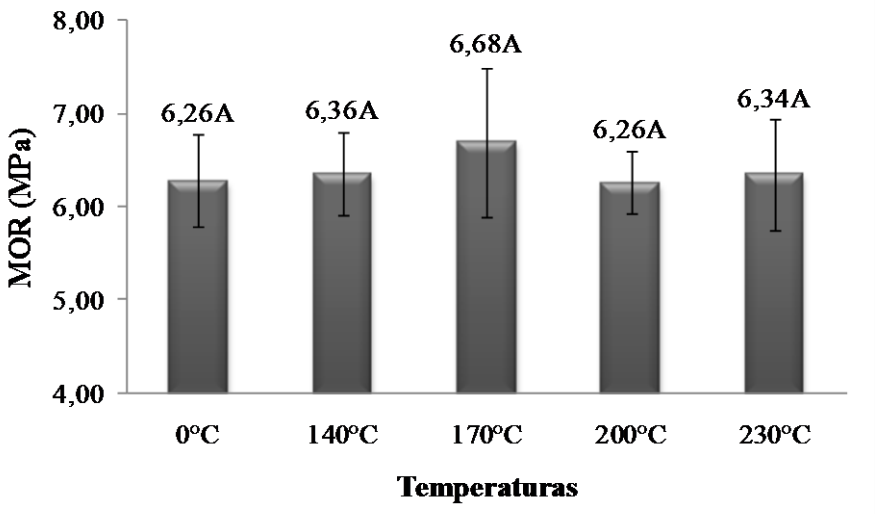

Figura 14 Môdulo de ruptura dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância

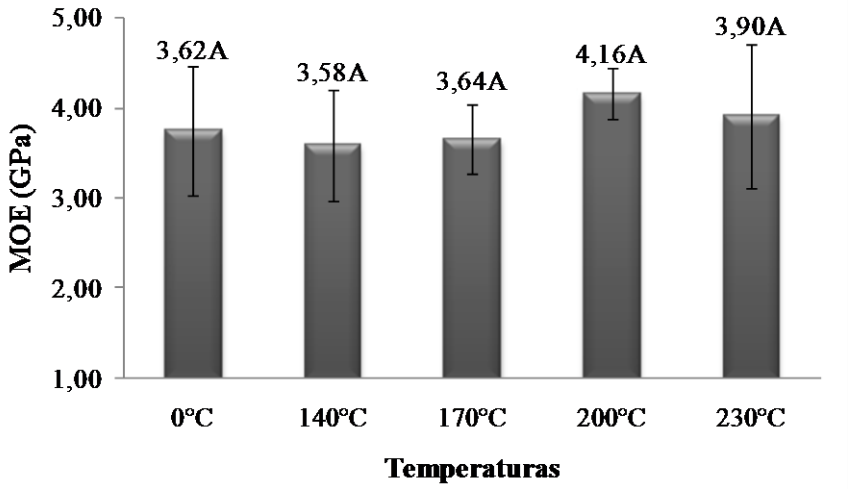

Figura 15 Môdulo de elasticidade dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância

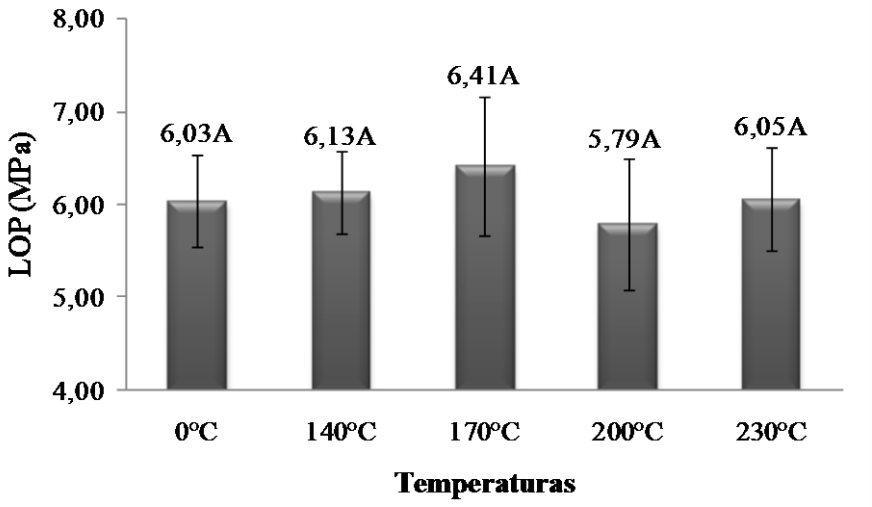

Figura 16 Limite de proporcionalidade dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância

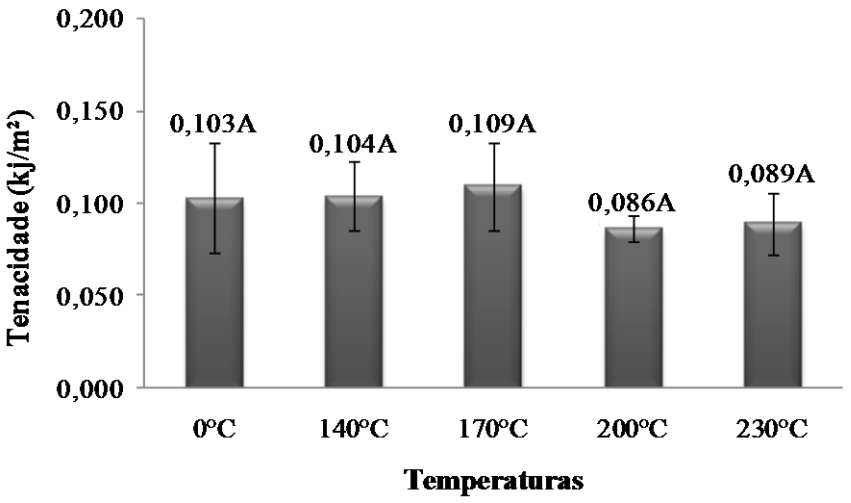

Figura 17 Energia específica (tenacidade) dos fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente em diferentes temperaturas. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância

Não houve diferença significativa nas propriedades MOR, MOE, LOP e Energia específica para os fibrocimentos reforçados com fibras tratadas termicamente com diferentes temperaturas. Estes resultados indicam que as diferentes temperaturas utilizadas no tratamento térmico não interferiram nas propriedades mecânicas das fibras de eucalipto.

Mendes (2014) estudando o efeito da modificação química por silanos em polpa celulósica de eucalipto quanto as propriedades físico-mecânicas de fibrocimentos produzidos por extrusão, relatou valores de 6,42 a 8,29 MPa para o MOR, 6,20 a 8,17 MPa para o LOP, 2,99 a 5,09 GPa para o MOE e 0,33 a 0,42 kJ/m² para a tenacidade, valores estes próximos ou mesmo acima dos resultados observados no presente trabalho.

A norma técnica NBR 15.498 (ABNT, 2007) para placas cimentícias planas livres de amianto determina valores de MOR à flexão para as placas

ensaiadas em estado saturado, de 4 MPa para categoria 2, de 7 MPa para a categoria 3 e de 13 MPa para a categoria 4. Deste modo os fibrocimentos reforçados com fibras de eucalipto tratadas termicamente em diferentes temperaturas e curados em 7 dias na câmara de vapor foram classificados na categoria 2.

6 CONCLUSÃO

Foi observado um aumento do teor de lignina e uma diminuição do teor de extrativos e da holocelulose na medida em que se aumentava a temperatura do tratamento.

Os diferentes níveis de reforço (1 a 5% de fibras) avaliados neste trabalho mostraram-se satisfatórios, no entanto foi observado um aumento das propriedades AA, PA e Tenacidade e menores valores de DA, MOR, MOE e LOP aos 4 e 5% de fibras como reforço. Todos os níveis de reforço testados ficaram abaixo do máximo de AA (37%) exigido pela norma NBR 12.800 (ABNT, 1993). Quanto ao MOR, os fibrocimentos reforçados com 0 a 4% de fibras ficaram dentro da categoria 3 (de 7 a 13 MPa) e os fibrocimentos reforçados com 5% foram classificados como categoria 2 (de 2 a 7 MPa) segundo critérios da norma NBR 15.498 (ABNT, 2007).

As diferentes temperaturas utilizadas no tratamento térmico das fibras influenciaram significativamente nas propriedades PA e DA dos fibrocimentos, onde os tratamentos com 200 e 230°C obtiveram um aumento destas propriedades. No entanto não houve diferença significativa para as demais propriedades (AA; MOR; MOE; LOP e Tenacidade). Os fibrocimentos reforçados com as fibras tratadas termicamente atenderam os requisitos mínimos das normas NBR 12.800 (ABNT, 1993) e NBR 15.498 (ABNT, 2007), sendo classificados na categoria 2 (MOR entre 2 a 7 MPa).

Em geral o uso de até 5% de fibras de eucalipto, bem como, o pré-tratamento dessas fibras com até 230 °C com tempo de exposição de até uma hora, podem ser destinadas a produção de fibrocimentos. No entanto vale ressaltar que estudos visando avaliar a durabilidade desses fibrocimentos são de extrema importância, já que a durabilidade é um fator que vem inviabilizando inúmeros materiais lignocelulósicos estudados como reforço na produção de fibrocimentos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELMOULEH, M. et al. Interaction of silane coupling agents with cellulose. **Langmuir,** Washington, v. 18, p. 3203–3208, 2002.

AGOPYAN, V. et al. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement and Concrete Composites,** Barking, v. 27, p. 527-536, May 2005.

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para construção civil nos países em desenvolvimento:** uso de fibras vegetais. 1991. 204 f. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JUNIOR, H. Uso de materiais alternativos à base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO DE MATERIALES FIBRORREFORZADOS, 1.,1997, Cali.; REUNIÓN PROYECTO PIP VIII.5 CYTED, 3.,1997, Cali. **Proceedings**… Cali: Universidad del Valle, 1997. p. 23-40.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 948-81:** test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken, 1981. 2 p.

ARAÚJO, J. R.; WALDMAN, W. R.; PAOLI, M. A. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. **Polymer Degradation and Stability**, Essex, v. 93, n. 10, p. 1770-1775, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial, especificação. Rio de Janeiro, 1983. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010a. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003a. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C**.** Rio de Janeiro, 2003b. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: madeira: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010b. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498:** placa plana cimentícia sem amianto – requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 2007. 26 p.

AWOYEMI, L.; JONES, I. P. Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (Thuja plicata) wood during heat. **Wood Science Technology**, Cham, n. 45, p. 261–267, 2011.

AZIZ, M. A.; PARAMASIVAM, P.; LEE, S. L. Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete,** Oxford, v. 3, n. 2, p. 123-132, May 1981.

BARRA, B. et al. Effects of methane cold plasma in sisal plasma. **Key Engineering Materials,** Pfaffikon, v. 517, p. 458–468, 2012.

BELAADI, A. et al. Tensile static and fatigue behavior of sisal fibres. **Materials & Design,** Surrey, v. 46, p. 76-83, 2013.

BENTUR, A.; AKERS, S. A. S. The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced cement composites cured in a normal environment. **The International Journal Cement Composites Lightweight Concrete,** Oxford, v. 11, n. 2, p. 99-109, 1989.

BEZERRA, E. M. et al. The effect of different mineral additions and synthetic fibre contents on properties of cement based composites. **Cement and Concrete Composites,** Barking, v. 28, n. 6, p. 555-563, 2006.

BILBA, K.; ARSÈNE, M. A. Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites. **Composites: Part A, Applied Science and Manufacturing,** Kidlinton, v. 39, p. 1488–1495, Sept. 2008.

BORGES, L. M.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var.*hondurensis* tratado térmicamente. **Revista Biomassa & Energia**, Dourados, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

BRASILEIRO, G. A. M.; VIEIRA, J. A. R.; BARRETO, L. S. Use of coir pith particles in composites with Potland cement. **Journal of Environmental Management,** London, v. 131, p. 228-238, 2013.

BRITO, J. O. et al. Densidade básica e retratibilidade da madeira de Eucalyptus grandis, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 182-188, abr./jun. 2006.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: Interscience, 1963.

CLARAMUNT J. et al. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. **Cement Concrete Composites,** Barking, v. 33, n. 5, p. 586-595, May 2011.

CHAFEI, S. et al. Influence du traitement des fibres de lin sur la rhéologie et les erformances d'un mortier-analyse de la durabilité. In: FRENCH INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1., 2012, Toulouse. **Proceedings…** Toulouse: NoMaD, 2012. 1 CD ROM.

CHAFEI, S. et al. Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites. **Constr Build Mater,** Guildford, v. 54, p. 59-64, 2014.

CORREIA, V. C. et al. Bamboo cellulosic pulp produced by the ethanol/water process for reinforcement applications. **Ciência Florestal,** Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 127-135, Jan./Mar. 2015.

CORREIA, V. C. et al. Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber-cement materials. **Construction and Building Materials,** Guildford, v. 72, p. 65–71, 2014.

COUTTS, R. S. P. A review of Australian research into natural fibre cement composites. **Cement and Concrete Composites,** Barking, v. 27, p. 518-526, May 2005.

FARAUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science,** Pittsburgh, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, Nov. 2012.

GONÇALEZ, J. C. et al. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis,** Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81-89, 2014.

GOODRICH, T. et al. High-temperature mechanical properties and thermal recovery of balsa Wood. **Journal of Wood Science,** Heidelberg, v. 56, p. 437–443, 2010.

GRAM, H. E. **Durability of natural fiber in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1983.

HORST, G. G. Extrusion of FRC products: technology and practical aspects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE INORGANIC-BONDED WOOD AND FIBER COMPOSITE MATERIALS, 8., 2002, Sun Valley. **Proceedings...** Sun Valley: [s. n.], 2002. p. 36-46.

IKAI, S. et al. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**. Guildford, v. 24, n. 2, p. 171-180, Feb. 2010.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: UFPR, 2005. 274 p.

JARABO, R. et al. Characterisation of agricultural residues used as a source of fibres for fibre-cement production. **Industrial Crops and Products,** Berlin, v. 36, p. 14–21, 2012.

JARABO, R. et al. Corn stalk from agricultural residue used as reinforcement fiber in fiber-cement production. **Industrial Crops and Products,** Berlin, v 43, p. 832–839, 2013.

JAYARAMAN, K. Manufacturing sisal-polypropylene composites with minimum fibre degradation. **Composites Science and Technology,** Barking, v. 63, p. 367-374, 2003.

JOAQUIM, A.P. et al. Sisal organosolv pulp as reinforcement for cement based composites. **Materials Research,** São Carlos, v. 12, n. 3, p. 305–314, July 2009.

JOHN, M. J.; THOMAS, S.. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**. Worcester, v. 71, p. 343–364, 2008.

JUÁREZ, C. et al. Performance of *Agave lecheguilla* natural fiber in Portland cement composites exposed to severe environment conditions. **Building and Environment,** Oxford, v. 42, p. 1151-1157, 2007.

KHAZMA, M. et al. Coating of a lignocellulosic aggregate with pectin/ polyethylenimin mixtures: effects on flax shive and cement-shive composite properties. **Cement Concr Compos**, Barking, v. 34, n. 2, p. 23-30, 2012.

KHEDARI, J.; WATSANASATHAPORN, P.; HIRUNLABH, J. Development of fibre-based soil–cement block with low thermal conductivity. **Cement and Concrete Composites,** Barking. v. 27, n. 1, p.111–116, 2005.

KHORAMI, M.; GANJIAN, E. Comparing flexural behaviour of fibre–cement composites reinforced bagasse: wheat and eucalyptus. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 25, p. 3661–3667, 2011.

KIM, D. Y. et. al. Mechanical properties of kenaf fiber-cement composites containing kenaf gamma-ray grafted with acrylamide. **Journal Wood Science,** Cham, v. 60, p. 263-268, 2014.

KLOCK, U. et al. **Química da madeira**. 3. ed. Curitiba: UFPR, 2005.

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; BOLUK, Y. Effect of thermal treatment on the mechanical composition and mechanical properties of Birch and Aspen. **BioResource Technology**, Essex, v. 3, n. 2, p. 517-537, 2008.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1975. v. 2, 728 p.

LIMA, P. R. L et al. Caracterização mecânica de laminados cimentíceos esbeltos reforçados com fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, p. 644-651, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MENDES, R. F. **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.

MILLER, R.B. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: Forest Products Laboratory, 1999. 463 p.

MOHAN, D.; PITTMAN JÚNIOR, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolisis of wood/ biomass for bio-oil: a critical review. **Energy & Fuels,** Washington, v. 20, p. 848-889, 2006.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites.** New York: CRC , 2005. 896 p.

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**, Elmsford, v. 36, n. 7, p. 1240-1251, 2006.

MOHR, B. J.; BIERNACKI, J. J.; KURTIS, K. E. Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 37, p. 1531-1543, Nov. 2007.

MOHR, B. J.; NANKO, H.; KURTIS, K. E. Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. **Cement and Concrete Composites,** Barking, v. 27, n. 4, p. 435-448, Apr. 2005.

MORI, F. A. et al. Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. **Ciência e Tecnologia de Alimentos,** Campinas, v. 23, n. 3, p. 342-350, 2003.

NANKO, H.; ASANO, S.; OHSAWA, J. Shrinkage behavior of pulp fibers during drying. In: TAPPI INTERNATIONAL PAPER PHYSICS CONFERENCE, 1., 1991, Kona. **Proceedings**… Kona: [s. n.], 1991, p. 365-374.

PIZZOL, V. D. **Carbonatação acelerada**: nova tecnologia de cura para firbocimento sem amianto. 2013. 60 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de resíduos ligno - celulósicos**. 1991. 10 p. Disponível em: <http://funtecg.org.br/arquivos/briquetagem.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2015.

RAMAKRISHNA, G.; SUNDARARAJAN, T. Studies on the durability of natural fibres and the effects of corroded fibres on the strength of mortar. **Cement and Concrete Composites,** Barking, v. 27, n. 5, p. 575-582, 2005.
RIBEIRO, F. A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, Piracicaba, n. 46, p. 76-85, jan./dez., 1993.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE 49 TFR. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. **Materials and Structures,** London, v. 17, n. 102, p. 441-456, 1984.

ROGALINSKY, T.; INGRAM, T.; BRUNNER, G. Hydrolysis of lignocellulosic biomass in water under elevated temperatures and pressures. **The Journal of Supercritical Fluids,** Oxford, v. 47, n. 1, p. 54-63, 2008.

SANTOS, S. F. et. al. Non-conventional cement-based composites reinforced with vegetable fibers: a review of strategies to improve durability. **Materiales de Construcción,** Madrid, v. 65, n. 317, p. 20, 2015b.

SANTOS, S. F. et. al. Supercritical carbonation treatment on extruded fibre-cement reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Research,** Elmsford, v. 56, p. 84-94, Feb. 2015a.

SAVASTANO JÚNIOR, H. et al. Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. **Cement and Concrete Composite**, Barking, v. 31, n. 4, p. 232– 243, Apr. 2009.

SAVASTANO JÚNIOR, H. et al. Plant fibre reinforced cement components for roofing. **Construction and Building Materials,** Guildford, v. 13, n. 8, p. 433–438, 1999.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. **Cement and Concrete Composites,** Barking, v. 21, n. 1, p. 49-57, 1999.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices. **Cement and Concrete Composite,** Barking, v. 25, n. 3, p. 311–319, Aug. 2003.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Microstructure and mechanical properties of waste fiber-cement composites. **Cement & Concrete Composites,** Barking, v. 27, p. 583-592, 2005.

SAWSEN, C. et al. Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite. **Construction and Building Materials,** Guildford, v. 79, p. 229-235, 2015.

SELLAMI, A.; MERZOUD, M.; AMZIANE, S. Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers. **Construction and Building Materials,** Guildford, v. 47, n. 11, p. 17-24, 2013.

SHAO, Y. et al. Wood fibre-cement composites by extrusion. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, v. 27, n. 3, p. 543-552, 2000.

SHAO, Y.; MARIKUNTE, S.; SHAH, S. P. Extruded fiber-reinforced composites. **Concrete International**, Detroit, v. 17, n. 4, p. 48-52, 1995.

SILVA, M. R. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalipto Citriodora* e *Pinus Taeda***. 2012. 223 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012.

SILVA, R. et al. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova,** São Paulo, v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009.

SJOSTROM, S. **Wood chemistry**: fundamentals and applications. London: Academic, 1981.

SOTO, Y. J. M. **Adequação de formulações para a produção de Placas de fibrocimento por extrusão**. 2010. 201 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

TAKASHIMA, H. et al. A design approach for the mechanical properties of polypropylene discontinuous fibre reinforced cementitious composites by extrusion molding. **Engineering Fracture Mechanics**, Ithaca, v. 70, n. 7/8, p. 853-870, 2003.

TEIXEIRA, R. S. **Utilização de resíduos sucro-alcooleiros na fabricação de fibrocimento pelo processo de extrusão**. 2010. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de

Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

TOLÊDO FILHO, R. D. et al. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites,** Barking, v. 22, n. 2, p. 127-143, Apr. 2000.

TOLÊDO FILHO, R. D.; SANJUÁN, M. A. Effect of low modulus sisal and polypropylene fibres on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 29, p. 1597-1604, 1999.

TONG, Y. et. al. Improving cracking and drying shrinkage properties of cement mortar by adding chemically treated luffa fibres. **Construction and Building Materials,** Guildford, v. 71, p. 327-333, 2014.

TONOLI, G. H. D. et al. Cellulose modified fibres in cement based composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Kidlinton, v. 40, n. 12, p. 2046-2053, 2009a.

TONOLI, G. H. D. et al. Impact of bleaching pine fibre on the fibre/cement interface. **Journal of Materials Science,** Norwell, v. 47, p. 4167-4177, 2012.

TONOLI, G. H. D. et al. Isocyanate-treated cellulose pulp and its effect on the alkali resistance and performance of fiber cement composites. **Holzforschung**, Berlin, v. 67, n. 8, p. 853-861, Dec. 2013a.

TONOLI, G. H. D. et al. Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp. **Materials and Manufacturing Processes**, Berlin, v. 22, p. 149-156, Feb. 2007.

TONOLI, G. H. D. et al. Processing and dimensional changes of cement based composites reinforced with surface-treated cellulose fibres. **Cement Concrete and Composites**, Barking, v. 37, p. 68–75, 2013b.

TONOLI, G. H. D. **Fibras curtas de Eucalipto para novas tecnologias em fibrocimento**. 2009. 148 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009b.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation rate of natural fiber in cement composites exposed to vatious accelerated aging environment conditions. **Corrosion Science,** Oxford, v. 88, p. 118-132, 2014.

WEY, J.; MEYER, C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. **Cement and Concrete Research,** Elmsford, v. 73, p. 1-16, July 2015.

WINDEISEN, E.; WEGENER, G. Behaviour of lignin during thermal treatmensts of wood. **Industrial Crops and Products**, Berlin, v. 27, p. 157-162, Mar. 2008.

XIE, X. et al. Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties. **Composites Part B,** New Orleans, v. 78, p. 153-161, 2015.

APÊNDICES

Níveis de reforço: AA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	714.061183	142.812237	165.608	0.000
erro	50	25.870567	0.862352		
Total corrigido	55	740.572612			

CV (%) = 6.29

Níveis de reforço: PA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	2038.880886	407.776177	189.505	0.0000
erro	50	64.553881	2.151796		
Total corrigido	55	2104.900714			

CV (%) = 5.57

Níveis de reforço: DA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	0.034038	0.006808	30.469	0.0000
erro	50	0.006703	0.000223		
Total corrigido	55	0.041452			

CV (%) = 0.84

Níveis de reforço: MOR

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	225.294326	45.058865	123.795	0.0000
erro	50	10.919357	0.363979		

Total corrigido	55	238.597383			
CV (%) =	6.60				

Níveis de reforço: MOE

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	139318967.18	27863793.44	121.067	0.0000
erro	50	6904529.92	230150.99		
Total corrigido	55	146687966.946564			
CV (%) =	10.01				

Níveis de reforço: LOP

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	259.674174	51.934835	45.632	0.0000
erro	50	56.906226	1.138125		
Total corrigido	55	316.580400			
CV (%) =	13.60				

Níveis de reforço: Tenacidade

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	0.064208	0.012842	17.451	0.0000
erro	50	0.036792	0.000736		
Total corrigido	55	0.101000			
CV (%) =	15.07				

Tratamento térmico: AA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	4	35.489575	8.872394	2.001	0.1134
erro	39	172.918144	4.433799		
Total corrigido	43	208.407719			

CV (%) = 13.28

Tratamento térmico: PA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	4	156.378226	39.094557	3.300	0.0201
erro	39	461.959654	11.845119		
Total corrigido	43	618.337880			

CV (%) = 11.77

Tratamento térmico: DA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	4	0.100097	0.025024	14.105	0.0000
erro	39	0.069189	0.001774		
Total corrigido	43	0.169287			

CV (%) = 2.28

Tratamento térmico: MOR

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	4	1.129426	0.282356	0.940	0.4512
erro	39	11.717618	0.300452		

Total corrigido	43	12.847044

CV (%) = 8.59

Tratamento térmico: MOE

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	4	2171844.98	542961.25	1.619	0.1888
erro	39	13076909.89	335305.38		
Total corrigido	43	15248754.866489			

CV (%) = 15.35

Tratamento térmico: LOP

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	4	1.830745	0.457686	1.278	0.2952
erro	39	13.967380	0.358138		
Total corrigido	43	15.798125			

CV (%) = 9.84

Tratamento térmico: Tenacidade

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	4	0.003408	0.000852	1.900	0.1298
erro	39	0.017489	0.000448		
Total corrigido	43	0.020897			

CV (%) = 21.45