

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5517>

ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 03/02/2021

APROVADO 14/04/2021

PUBLICADO ON-LINE 22/08/2021

PUBLICADO 30/12/2022

EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

# Análise físico-mecânica de compósitos madeira-cimento e uso de modelos micromecânicos na predição de suas propriedades

 Heloiza Candeia Ruthes <sup>[1]\*</sup>

 César Augusto Galvão de Morais <sup>[2]</sup>

 Diego Henrique de Almeida <sup>[3]</sup>

 Cristiane Inácio de Campos <sup>[4]</sup>

 André Luis Christoforo <sup>[5]</sup>

 Marília da Silva Bertolini <sup>[6]</sup>

[1] [heliozaruthes@estudante.ufscar.br](mailto:heliozaruthes@estudante.ufscar.br)

[5] [alchristoforo@ufscar.br](mailto:alchristoforo@ufscar.br)

Departamento de Engenharia Civil /  
Universidade Federal de São Carlos  
(UFSCar), Brasil

[2] [cesar.morais@unesp.br](mailto:cesar.morais@unesp.br)

[6] [marilia.bertolini@unesp.br](mailto:marilia.bertolini@unesp.br)

Departamento de Engenharia de  
Produção / Universidade Estadual  
Paulista (UNESP), Brasil

[3] [diegoestruturas@gmail.com](mailto:diegoestruturas@gmail.com)

Departamento de Engenharia Civil /  
Universidade Federal do Rondônia (UNIR),  
Brasil

[4] [cristiane.campos@unesp.br](mailto:cristiane.campos@unesp.br)

Departamento de Engenharia Industrial  
Madeira / Universidade Estadual  
Paulista (UNESP), Brasil

**RESUMO:** Os compósitos madeira-cimento são formados por uma mistura de cimento Portland, água e resíduos de madeira em fibras ou partículas, aplicando-se principalmente em painéis, obtendo-se um destino aos resíduos da indústria madeireira. Fatores como a espécie, tratamento e dimensão das partículas de madeira interferem no desempenho físico e mecânico dos compósitos e por isso são continuamente investigados na literatura. Dessa forma, nesse trabalho apresentou-se uma análise físico-mecânica experimental de compósitos madeira-cimento com resíduos de *Pinus* sp. e bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* tratados em água quente e analisou-se seus efeitos na densidade, o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura obtidos através de ensaio de compressão. Avaliou-se, também, a aplicação de modelos micromecânicos (regras de mistura) na predição do módulo de elasticidade. Por fim, os resultados experimentais foram analisados estatisticamente e o módulo de elasticidade obtido pelos modelos micromecânicos foram comparados aos obtidos experimentalmente.

**Palavras-chave:** bambu; compósitos; madeira; propriedades dos compósitos; regra de mistura.

## Physical-mechanical analysis of wood-cement composites and use of micromechanical models to predict their properties

**ABSTRACT:** Wood-cement composites are formed by a mixture of Portland cement, water and wood residues in fibers or particles, applied mainly in panels, obtaining a destination for the residues of the wood industry. Factors such as the species, treatment, and size of the wood particles interfere with the physical and mechanical performance of the composites and are therefore continuously investigated in the literature. Thus, this work presented an

\*Autor para correspondência.

*experimental physical-mechanical analysis of cement-wood composites with Pinus sp. and Dendrocalamus giganteus bamboo treated in hot water and its effects on density, the modulus of elasticity, and the modulus of rupture obtained through compression testing were analyzed. The application of micromechanical models (mixing rules) in the prediction of the modulus of elasticity was also evaluated. Finally, the experimental results were analyzed statistically, and the modulus of elasticity obtained by micromechanical models was compared to those obtained experimentally.*

**Keywords:** bamboo; composites; composite properties; rule of mixture; wood.

## 1 Introdução

Materiais compósitos são definidos como a combinação de um material principal (matriz) com materiais secundários (fases) que tenham propriedades mais vantajosas que o primeiro, com o objetivo de se obter um material final com melhores propriedades ou mais adequado à sua finalidade. Dessa forma, vem avançando a possibilidade da criação de novos materiais com propriedades como rigidez e resistência melhores ou equivalentes à sua matriz, com melhor desempenho quanto ao impacto ambiental gerado.

Nesse contexto, estão os compósitos de madeira-cimento obtidos a partir da mistura simultânea de resíduos em partículas ou fibras de madeira com cimento Portland e água, variando-se a proporção de cada fase, a espécie da madeira, seu tratamento, dentre outros, conforme destacado por Jorge, Pereira e Ferreira (2004) que discorrem também que sua aplicação principal é a fabricação de painéis. Dentre as vantagens da inserção de partículas de madeira na matriz de cimento está a destinação de resíduos gerados pela indústria madeireira.

De acordo com Frybort *et al.* (2008) e Ashori, Tabarsa e Amosi (2012), os compósitos de madeira-cimento podem ter maior estabilidade dimensional, resistência ao fogo e à agentes deterioradores, bem como desempenho das propriedades físicas e mecânicas melhor ou equivalente quando comparado a produtos constituídos somente de madeira. Além disso, sua produção é de baixo custo e há a possibilidade de variar suas propriedades conforme as necessidades a serem atendidas.

Para Jorge, Pereira e Ferreira (2004) há diversas variáveis que podem interferir no desempenho do compósito, entre elas estão as características físicas e químicas da espécie de madeira escolhida, dimensão e tipo da partícula, tipo do cimento, uso de aditivos, tratamento da madeira e a proporção de cada fase, sendo que a maior influência desses fatores ocorre na hidratação do cimento e na adesão entre as partículas e a matriz. Quanto à espécie utilizada e sua composição física e química, Kochova *et al.* (2017) e Caprai *et al.* (2018) observaram que a lignina e a celulose da madeira têm pouco impacto na hidratação do cimento Portland enquanto a sacarose tem maior impacto no retardamento da hidratação do cimento, ocasionando perda de resistência do compósito.

Nesse sentido alguns aditivos podem ser utilizados para aprimorar esse aspecto. Castro *et al.* (2019) analisaram o potencial de uso de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), cloreto de magnésio ( $\text{MgCl}_2$ ) e cal hidratada em compósitos de madeira-cimento com partículas de duas espécies de madeira popularmente conhecidas como madeira costaneira de piãozinho (*Eschweilera coriacea* (DC.) Mart) e matá-mata-branco (*Eschweilera odora* (poepp.) Miers), cimento Portland tipo CP II-Z e relação de madeira:cimento de 1:2,75. Os resultados demonstraram que o uso dos aditivos químicos em compósitos

fabricados com as espécies citadas anteriormente e por vibrocompactação não resultaram em efeitos positivos significativos nas propriedades físicas e químicas do compósito. Já Ribeiro e Vasconcelos (2018) avaliaram os compósitos madeira-cimento onde se substituiu, parcialmente, a matriz de cimento Portland CP-IV-32 por Metacaulinita (10%) e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (5%) com o objetivo de acelerar a hidratação do cimento e, partículas de resíduos de madeira de cedro (*Cedrela fissilis*), maracatiara (*Astronium lecointei*) e cerejeira (*Amburana Cearensis*). Os resultados mostraram redução na densidade e consumo de materiais convencionais e a Metacaulinita e o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  adicionados resultaram em melhorias no desempenho físico-mecânico dos compósitos, principalmente nas primeiras idades.

Quanto às espécies dos resíduos de madeira, utilizam-se principalmente o *Pinus* sp. devido à sua alta disponibilidade. Cabral *et al.* (2020) analisaram a compatibilidade de resíduos de madeira dessa espécie, tratados e não tratados, com a matriz cimentícia, bem como a influência do tratamento da madeira. A madeira foi tratada com água fria, água quente e com hidróxido de sódio (NaOH), além disso, os testes foram realizados em um grupo de controle dos compósitos com madeira não tratada. Para avaliar os efeitos na hidratação do cimento, foram conduzidos testes de compressão axial aos 28 dias nos compósitos manufaturados com cimento CP-V-ARI. Os resultados demonstraram que não houve diferenças significativas entre os compósitos com madeira tratada e com madeira não tratada. Além disso, a madeira demonstrou boa compatibilidade na utilização no compósito. O desempenho de resíduos em partículas de *Pinus* sp. também foi avaliado e se mostrou satisfatório no estudo realizado por Lima *et al.* (2020), em que houve a substituição parcial do cimento Portland por materiais pozolânicos como resíduos de cerâmica calcinada e metacaulinita em teores de 50% e 30%, respectivamente, para a melhoria entre a compatibilidade madeira-cimento.

Diversas outras espécies de madeira podem ser igualmente empregadas na manufatura desses compósitos, como por exemplo, a palmeira-das-canárias (*Phoenix canariensis*). Ferrandez-Villena *et al.* (2020) utilizaram a referida madeira com o propósito de avaliar sua compatibilidade e as propriedades mecânicas de painéis compósitos de madeira-cimento, contendo 20% de cimento em relação ao peso das partículas, em que concluíram que as propriedades mecânicas foram satisfatórias para o emprego considerado e que os valores de módulo de elasticidade e de rigidez aumentaram conforme o tempo de cura, ou seja, as partículas foram capazes de suportar a alcalinidade do cimento. O eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*) e o álamo (*Populus deltoides*) também foram avaliados por Ashori *et al.* (2011) quanto à compatibilidade ao cimento, sendo que o eucalipto se mostrou menos compatível gerando decréscimo nas propriedades mecânicas dos compósitos.

O tratamento nas partículas da madeira com o objetivo de melhorar o desempenho do compósito também pode ser empregado. Nesse aspecto, Bertolini *et al.* (2014) produziram e avaliaram o desempenho mecânico na compressão paralela às fibras de compósitos fabricados com partículas de resíduos de *Pinus* sp. tratadas em banho de água quente por 6 horas e cimento Portland CP-II-E-32 e, concluíram que a inclusão das partículas tratadas influenciou na redução da densidade em 7%, bem como no aumento do módulo de elasticidade em 126% e da resistência à compressão em 70%. Quiroga, Marzocchi e Rintoul (2016) utilizaram a madeira de *Populus X Euroamericana* CV e a trataram com os métodos de imersão em água a 25 °C, 62,5 °C e 100 °C, imersão em solução de hidróxido de sódio por 4, 24 e 72 horas e, por último, utilizou-se estireno acrílico para revestimento. O tratamento com solução de hidróxido de sódio resultou no maior decréscimo das propriedades mecânicas dos compósitos.

Devido aos diversos fatores que interferem nas propriedades dos compósitos madeira-cimento, Jorge, Pereira e Ferreira (2004) afirmam que há grande dificuldade em predizê-las ou de caracterizar esse tipo de material. Dessa forma, alguns artifícios podem ser dispostos a fim de se obter os principais parâmetros que descrevem os compósitos madeira-cimento, como por exemplo, as regras de mistura. De acordo com Kim (2000), as regras de mistura são uma metodologia simples, porém efetiva de se predizer propriedades mecânicas dos compósitos, especialmente do módulo de elasticidade, quando comparada a outras metodologias tais como o método dos elementos finitos.

Loja, Barbosa e Soares (2012) descrevem ainda que essa metodologia pode ser empregue para obter estimativas de limites para as propriedades do material de estruturas compostas particuladas. Dentre as propriedades que podem ser obtidas através da regra das misturas estão o módulo de elasticidade e a rigidez do compósito. Existem diversos modelos para a regra das misturas e, entre os mais difundidos estão o modelo de Voigt e de Reuss, também denominados limite superior de Voigt e limite inferior de Reuss e o modelo de Halpin-Tsai, considerado mais preciso que os anteriores. Há alguns aspectos que podem ser levados em consideração por cada modelo, como por exemplo, a orientação das fibras, a quantidade de fibras e a adesão à matriz.

Quiroga e Rintoul (2015) compararam os resultados obtidos pelos modelos de Reuss e Voigt para tensão e deformação com os obtidos experimentalmente em compósitos madeira-cimento em duas situações diferentes: fibras de madeira paralelas e perpendiculares à tensão aplicada. Para a tensão aplicada paralelamente às fibras, os resultados experimentais foram próximos aos obtidos através do modelo de Reuss e, quando se aplicou a tensão perpendicularmente às fibras, o modelo que mais se aproximou dos resultados experimentais foi o modelo de Voigt.

Sabendo-se, portanto, que a compreensão do comportamento mecânico dos compósitos madeira-cimento é ainda limitada, há a necessidade de maior investigação desses compósitos, a fim de avaliar seu desempenho e caracterizá-lo de acordo com os materiais utilizados. Portanto, neste trabalho produziu-se e analisou-se o desempenho mecânico de compósitos empregando-se cimento Portland e fibras de *Pinus* sp. e bambu *Dendrocalamus giganteus*, ambos provenientes do beneficiamento primário sob forma de resíduos, comparando-os entre si e entre os tratamentos aplicados. Além disso, estimou-se as propriedades do compósito através de modelos micromecânicos, como o limite superior de Voigt, o limite inferior de Reuss e o modelo de Halpin-Tsai, e comparou-se os resultados obtidos com os resultados experimentais obtidos.

## 2 Metodologia

As etapas da pesquisa consistiram na produção dos compósitos madeira-cimento, em que inicialmente se realizou o tratamento dos resíduos de madeira; em seguida, determinou-se as propriedades dos compósitos e, a partir dos resultados obtidos, efetuou-se a análise estatística. Por fim, fez-se a estimativa das propriedades dos compósitos analisados através dos modelos micromecânicos. Essas etapas estão pormenorizadas nos subitens a seguir.

### 2.1 Produção dos compósitos madeira-cimento

As partículas de *Pinus* sp. foram obtidas de serrarias da região de Itapeva, em São Paulo, em forma de maravalhas e sem preservantes. A espécie de bambu utilizada foi

a *Dendrocalamus giganteus*, cujos resíduos com idade maior do que 3 anos foram fornecidos pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus de Bauru (SP). Estes foram reduzidos às partículas de granulometria controlada em moinho do tipo martelo Marconi modelo MA-680, no Laboratório de Propriedades Mecânicas da Madeira, UNESP – Campus de Itapeva (SP), sendo classificadas quanto a sua granulometria, em peneira de abertura 20 *mesh*, através de processo manual, utilizando-se o material retido, ou seja, partículas de tamanho no intervalo de 0,841 mm a 2 mm.

Posteriormente, realizou-se o tratamento das partículas pelo método de imersão em água quente a 80 °C em um recipiente de alumínio, levado em banho térmico da marca Quimis, modelo Q 250-E em três ciclos de 2 horas cada. Em seguida retirou-se a umidade das partículas utilizando-se a secagem em estufa (105 ± 1 °C) até a constância de massa. Além disso, para a produção do compósito utilizou-se o cimento Portland CP II E-32 adquirido em saco de 50 kg, vendido comercialmente. O procedimento utilizado baseou-se no estudo de Souza (2005), em que se utilizou água destilada produzida em laboratório.

Preliminarmente produziram-se duas amostras piloto com o objetivo de definir-se o traço adequado, sendo que uma destas foi confeccionada partindo-se da relação unitária cimento-madeira-água de 0,375:1: 0,71, adotada por Campos (2000), e na segunda, utilizou-se a mesma relação cimento-fibra aumentando a quantidade de água para a melhora da hidratação do cimento, resultando, portanto, no traço de 0,375:1:1,064. Observou-se, no entanto, fragilidade nos corpos de prova após a cura e, portanto, diminuiu-se a quantidade de água na mistura, de forma a obter eficiente hidratação e prevenir a perda do cimento durante a compactação, além da redução da quantidade de fibras em relação ao cimento.

Desse modo, a proporção adotada foi de 21% de fibras em relação ao cimento e água suficiente para proporcionar adesão entre as fases do compósito. Por fim, os compósitos foram preparados observando-se o tipo da fibra, influência do tratamento nas mesmas e características físicas e mecânicas do material compósito obtido, conforme a Tabela 1 sendo que as letras C, M, B e t nessa tabela denotam, respectivamente: cimento, madeira, bambu e tratamento. Além disso, para cada formulação prepararam-se cinco corpos de prova.

**Tabela 1** ►  
Formulações dos  
compósitos analisados.  
Fonte: dados da pesquisa

Compósito	Cimento: fibra: água	Dosagem (g/CP)
CM	1:0,21:0,6	217,16:45:130
CB	1:0,21:0,6	217,16:45:130
CMB	1:0,105:0,6	217,16:22,5:22,5:130
CMt	1:0,21:0,6	217,16:45:130
CBt	1:0,21:0,6	217,16:45:130
CMtBt	1:0,105:0,6	217,16:22,5:22,5:130
CMtB	1:0,105:0,6	217,16:22,5:22,5:130
CMBt	1:0,105:0,6	217,16:22,5:22,5:130

O processo de manufatura dos compósitos consistiu inicialmente em homogeneizar os componentes secos e posteriormente adicionar a água. Para a confecção dos cinco corpos de prova, inseriu-se a mistura em moldes com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, compactando-se a mistura com auxílio de um soquete de madeira de diâmetro igual a 45 mm a cada 40 gramas da mistura inserida no molde.

O desmolde ocorreu após 48 horas e os corpos de prova foram acondicionados por 5 dias em um saco plástico, conforme processo de cura úmida adotado por Beraldo *et al.* (2002), com o objetivo de tornar a cura mais lenta, evitando, assim, o aparecimento de fissuras. A secagem dos corpos de prova ocorreu ao ar livre por 21 dias. Ao completar o período de 28 dias determinados para a cura, de forma a simplificar o processo e no intuito de encontrar uma utilidade para os resíduos da indústria madeireira, foram incluídas as partículas de madeira e bambu nos corpos de prova.

## 2.2 Determinação das propriedades dos compósitos

Após o período de cura de 28 dias, obteve-se as densidades dos compósitos por meio da relação entre massa e volume considerando-se as dimensões e massa dos corpos de prova. Para uniformização das superfícies dos corpos de prova em contato com o equipamento dos ensaios, utilizou-se uma camada fina de gesso, devido à sua boa compatibilidade química com o concreto, fluidez e boa aderência ao corpo de prova, além da resistência à compressão compatível sem interferir nos resultados.

O ensaio de compressão foi realizado no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LAMEM) da Universidade de São Paulo (USP) – Campus de São Carlos (SP), de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT, 1996) em uma Máquina Universal de Ensaio AMSLER, capacidade de carregamento de 25 ton por Bertolini e Campos (2010). Através desse ensaio obtiveram-se o módulo de elasticidade (*MOE*) e módulo de ruptura (*MOR*).

Os corpos de prova foram ensaiados até a sua ruptura com velocidade de carregamento de 0,08 mm/s e incrementos de carga de 100 kgf, sendo as deformações medidas com relógios comparadores Mitutoyo, com 0,01 mm de precisão e medições até 5 mm.

Através do ensaio de compressão obtiveram-se os valores de carga aplicada, média das variações de comprimento, área e comprimento inicial dos corpos de prova que possibilitaram o cálculo da tensão e deformação correspondentes em todos os pontos, bem como o cálculo do *MOE* e *MOR* de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 1984).

## 2.3 Análise estatística

Para investigar a influência do tipo de partículas de reforço (madeira [M]; bambu [B]) e do tratamento das partículas (tratadas [T]; não tratadas [UT]) na densidade ( $\rho$ ), no módulo de elasticidade à compressão (*E*) e na resistência à compressão (*S*) dos compósitos em matriz cimentícia, foi utilizada a análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância, com o auxílio do software Minitab®.

A combinação dos níveis dos dois fatores resultou em quatro condições experimentais distintas, explicitadas no Quadro 1, sendo madeira-cimento (CM) e bambu-cimento (CB) sem tratamento (U) e com tratamento (T).

### Quadro 1 ►

Condições experimentais do planejamento fatorial completo.  
Fonte: dados da pesquisa

Condições experimentais	Adição		Tratamento	
	[M]	[B]	[U]	[T]
C-MU	X		X	
C-BU		X	X	
C-MT	X			X
C-BT		X		X

Considerados significativos à interação entre os fatores, na sequência, foram utilizados gráficos de interações para auxiliarem na interpretação dos efeitos de interação. Também foi utilizado o teste de comparações múltiplas de Tukey como forma de eleger o melhor tratamento por variável-resposta investigada.

## 2.4 Estimativa das propriedades dos compósitos através dos modelos micromecânicos

O módulo de elasticidade (*MOE*) pode ser estimado de acordo com as regras da mistura ou análises micromecânicas, que são estimativas das propriedades dos compósitos realizadas através da propriedade de cada fase do compósito e de sua fração volumétrica. Dessa forma, os valores para os módulos de elasticidade dos compósitos madeira-cimento, cimento-bambu e madeira-cimento-bambu foram calculados. Para as situações em que as adições sofreram tratamento com o objetivo de melhorar suas propriedades os valores não foram estimados, visto que os materiais não foram caracterizados nessas situações. Os modelos utilizados foram do limite superior de Voigt e limite superior de Reuss, modelo de Halpin-Tsai.

O modelo de Voigt por definição é o limite superior do valor da propriedade a ser estimada, além disso, é considerado o modelo mais simples devido ao baixo gasto computacional necessário. A predição do módulo de elasticidade segundo o modelo de Voigt foi feita de acordo com a Equação 1, em que  $P_c$  é a propriedade requerida do compósito,  $P_m$  é a propriedade da matriz,  $V_m$  é a fração de volume da matriz e  $P_f$  e  $V_f$  são, respectivamente, a propriedade e a fração de volume das adições. Ghatage, Kar e Sudhagar (2020) afirmam que o limite superior de Voigt é um modelo simples e, conforme Quiroga e Rintoul (2015) reiteram, o modelo considera que as tensões nas fases do compósito são uniformes e iguais. Segundo esse modelo, as propriedades do compósito são dadas em função das propriedades e da fração de volume de cada fase incorporada, conforme demonstra a Equação 1 para o módulo de elasticidade ( $E$ ) do compósito.

$$P_c = P_m V_m + P_f V_f \quad (1)$$

Já para a predição do módulo de elasticidade do compósito seguindo o modelo de Reuss, definido como o modelo que retorna limite inferior da propriedade a ser estimada, a Equação 2 foi utilizada. O modelo de Reuss considera que todas as fases têm deformações iguais quando submetidas a um carregamento. Tan, Jia e Li (2016) destacam, portanto, que a deformação do compósito é a soma das deformações de cada fase, e as propriedades dele podem ser calculadas ponderando-se suas propriedades individuais pela fração de volume de cada fase, como mostra a Equação 2, onde  $P_c$  é a propriedade do compósito,  $P_m$  é a propriedade da matriz,  $V_m$  é a fração volumétrica da matriz e  $P_f$  e  $V_f$  são o módulo de elasticidade e a fração de volume das adições, respectivamente.

$$\frac{1}{P_c} = \frac{V_f}{P_f} + \frac{V_m}{P_m} \quad (2)$$

O terceiro modelo utilizado foi o modelo de Halpin-Tsai, demonstrado na Equação 3, considerado um modelo mais complexo e preciso que os anteriores, tendo sido desenvolvido por Halpin e Kardos (1976). Esse modelo leva em consideração a adesão na interface da fibra com a matriz, ao contrário dos modelos anteriores. A predição das propriedades dos compósitos por esse modelo depende do parâmetro empírico relativo à quantificação a geometria do reforço,  $\zeta$ , igual a 2 para módulo de elasticidade, conforme Halpin e Kardos (1976), e da função  $\eta$ , dada pela Equação 4 que estabelece a condição de que  $P_c = P_m$  quando  $V_f = 0$  e  $P_c = P_f$  quando  $V_f = 1$

$$P_c = \frac{P_m(1 + \zeta\eta V_f)}{1 - \eta V_f} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\frac{P_f}{P_m} - 1}{\frac{P_f}{P_m} + \zeta} \quad (4)$$

As frações volumétricas da matriz e das adições utilizadas para a predição do módulo de elasticidade do compósito foram calculadas através da densidade dos materiais utilizados, conforme as Equações 5 e 6. Para a madeira optou-se por utilizar os valores para suas propriedades referentes à variedade *Pinus taeda* L., de acordo com os valores definidos pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Desse modo, a densidade utilizada foi de 0,645 g/cm<sup>3</sup> e o módulo de elasticidade igual a 13304 MPa. Para o bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* utilizou-se os valores da caracterização realizada por Brito *et al.* (2015) e por Carbonari *et al.* (2017) para a densidade e o módulo de elasticidade, sendo, portanto, iguais a 0,66 g/cm<sup>3</sup> e 21800 MPa, respectivamente. Para a matriz cimentícia utilizada, os valores utilizados foram os obtidos por Ashori, Tabarsa e Amosi (2012), cuja relação água/cimento é a mesma e, portanto, utilizou-se a densidade igual a 1,13 g/cm<sup>3</sup> e o módulo de elasticidade de 2261 MPa.

Logo, para a proporção entre os materiais do compósito madeira-cimento, onde 11,475% da massa é referente às partículas de madeira adicionadas, obteve-se  $V_f$  igual a 18,506% e  $V_m$  igual a 81,494%. Para o compósito cimento-bambu com 11,475% da massa referente às partículas, obteve-se  $V_f$  de 18,16% e  $V_m$  igual a 81,84%. Por fim, para a mistura com madeira-cimento-bambu, os valores de fração volumétrica para a madeira e bambu foram 9,06% e 9,27% e, para a matriz igual a 81,67%.

$$V_m = \frac{m_m/\rho_m}{m_m/\rho_m + m_f/\rho_f} \quad (5)$$

$$V_f = \frac{m_f/\rho_f}{m_f/\rho_f + m_m/\rho_m} \quad (6)$$

### 3 Resultados

Nesse item são apresentados os resultados experimentais para o módulo de elasticidade e ruptura para todas as configurações dos materiais compósitos, as análises estatísticas e das mesmas propriedades segundo os modelos micromecânicos analisados.

#### 3.1 Propriedades dos compósitos

Os resultados dos valores médios e desvio padrão obtidos para a densidade, *MOE* e *MOR* dos compósitos madeira-cimento estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** ►  
Propriedades dos  
compósitos estudados.  
Fonte: dados da pesquisa

Compósito	Propriedades analisadas		
	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	<i>MOE</i> (MPa)	<i>MOR</i> (MPa)
CM	1,344 (0,016)	519,365 (227,211)	5,697 (0,178)
CB	1,165 (0,020)	103,269 (28,661)	0,657 (0,075)
CMB	1,157 (0,019)	184,917 (83,025)	0,625 (0,111)
CMt	1,248 (0,018)	1175,002 (287,053)	9,668 (0,531)
CBt	1,332 (0,008)	867,121 (318,663)	8,644 (0,736)
CMtBt	1,158 (0,016)	959,438 (119,532)	8,991 (0,181)
CMtB	1,338 (0,018)	48,239 (17,788)	0,592 (0,103)
CMBt	1,341 (0,003)	907,747 (216,263)	8,264 (0,517)

Através desses resultados observou-se que as densidades obtidas para os compósitos com fibras do bambu não tratadas foram menores que as demais, possivelmente, devido à presença de extrativos, o que pode causar fraca interação entre a inclusão e a matriz, por meio do ataque pela alcalinidade do cimento devido ao excesso de água em suas paredes capilares, ocasionando a perda de cimento durante a compactação dos corpos de prova. A menor densidade foi observada nas misturas em que se utilizaram as fibras de madeira e bambu tratadas, já que o tratamento contribuiu para a retirada de extrativos das partículas.

Dessa forma, concluiu-se que com o tratamento das partículas há tendência de diminuição da densidade obtida nos compósitos. Quanto aos resultados obtidos para *MOE* e *MOR* em relação ao tipo de fibra, constatou-se que para os compósitos CM e CMt os resultados foram mais satisfatórios quando comparados aos resultados obtidos para os compósitos CB e CBt e, portanto, concluiu-se que a madeira apresentou maior compatibilidade com o cimento do que o bambu. Já o compósito CMtB apresentou menor resistência que os demais devido à deficiência na cura do cimento ocasionado pela presença de extrativos inibidores de cura no bambu utilizado, observado através do líquido residual escuro obtido no tratamento.

Além disso, observou-se que os compósitos manufaturados com as fibras sem tratamento apresentaram valores de resistência inferiores aos fabricados com as fibras tratadas em água quente, e, portanto, pode-se atribuir que o tratamento das fibras contribuiu com os valores de resistência dos compósitos.

Estudos realizados por Beraldo *et al.* (2002) obtiveram módulo de ruptura (*MOR*) superior para o compósito com fibra de bambu do que para o compósito em que se utilizou resíduos de madeira, diferentemente dos resultados obtidos neste trabalho, conforme a Tabela 3. Isso porque a espécie de bambu utilizada por Beraldo *et al.* (2002) tem maior solubilidade em água quente do que a espécie *Dendrocalamus giganteus*, podendo concluir, portanto, que a espécie da adição colaborou para os valores de resistência obtidos para os compósitos. Na Tabela 3, pode-se observar também que os valores obtidos no trabalho em questão foram superiores aos da literatura, mesmo tendo sido utilizada uma espécie de bambu mais adequada ao uso em compósitos cimentícios. Esse fato pode ser explicado pelo tipo de aglomerante utilizado, visto que o CP-II-E-32 tende a ser mais resistente do que o CP-III-40-RS.

**Tabela 3 ▼**

Comparativo dos compósitos em relação ao tipo de fibras.

Fonte: dados da pesquisa

Condições	Trabalho em questão		Beraldo et al. (2002)	
Espécie	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	<i>Pinus sp.</i>	<i>Bambusa vulgaris</i>	<i>Pinus caribaea</i>
Cimento	CP-II-E-32	CP-II-E-32	CP-III-40-RS	CP-III-40-RS
Cimento-fibra-água	1:0,21:0,6	1:0,21:0,6	1:0,375:0,75	1:0,375:0,75
Tratamento	Água quente (80 °C – 6 horas)	Água quente (80 °C – 6 horas)	Água quente (80 °C – 2 horas)	Água quente (80 °C – 2 horas)
<i>MOR</i> (MPa)	8,644	9,668	3,0	1,8

**Tabela 4 ▼**

Comparativo entre as propriedades do compósito com bambu tratado.

Fonte: dados da pesquisa

Comparando-se os valores obtidos experimentalmente para o compósito com partículas de bambu tratado (CBt) com os resultados de Beraldo *et al.* (2000) obtidos com as mesmas condições, exceto pela relação cimento-fibra-água, conforme a Tabela 4, observou-se que no trabalho em questão os valores foram superiores. Os resultados também foram superiores aos obtidos por Beraldo *et al.* (2002), onde utilizou-se a espécie *Bambusa vulgaris* e aditivo acelerador de cura, ressaltando-se os resultados satisfatórios obtidos.

Condições	Trabalho em questão	Beraldo et al. (2000)	Beraldo et al. (2002)
Espécie bambu	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	<i>Bambusa vulgaris</i>
Cimento	CP-II-E-32	CP-II-E-32	CP-III-40-RS
Cimento-fibra-água	1:0,21:0,6	1:0,35:0,75	1:0,375:0,75
Tratamento	Água quente (80 °C – 6 horas)	Água quente (80 °C – 2 horas)	Água quente (80 °C – 2 horas)
Aditivos	-	-	Sulfato de alumínio
<i>MOR</i> (MPa)	8,644	8,0	7,5

Como citado anteriormente, os resultados para os módulos de ruptura e de elasticidade obtidos para os compósitos com adição de madeira foram superiores aos obtidos para

os compósitos com bambu, justificando-se pela maior compatibilidade entre a adição e a matriz cimentícia. No entanto, quando são empregados aditivos e cimento com maior compatibilidade, os valores podem ser maiores, devido à aceleração do processo de cura, como mostra a Tabela 5 em que os resultados são comparados aos obtidos nessas condições por Matoski e Iwakari (2007).

**Tabela 5 ►**

Comparativo entre os compósitos com madeira de *Pinus sp.*  
Fonte: dados da pesquisa

Condições	Trabalho em questão	Matoski e Iwakari (2007)
Espécie madeira	<i>Pinus sp.</i>	<i>Pinus sp.</i>
Cimento	CP-II-E-32	CP-V-ARI
Cimento-fibra-água	1:0,21:0,6	1:0,25:variável
Tratamento	Água quente (80 °C – 6 horas)	Água quente (80 °C – 2 horas)
Aditivos	-	Cloreto de cálcio (4% b.c.)
MOR (MPa)	9,668	14,13
MOE (MPa)	1175,002	2332,86

Os resultados obtidos para os compósitos com cimento CP-II-E-32 e partículas de madeira *Pinus sp.* não tratadas e tratadas são inferiores aos obtidos por Matoski (2005) em condições análogas, mas com a utilização do cimento CP-V-ARI e teor de fibras de 8%, conforme a Tabela 6. A utilização de outro tipo de cimento e menor teor de fibras contribuiu para a obtenção de valores superiores visto que, a reação de hidratação do cimento pode ter ocorrido mais rapidamente, mantendo-se, portanto, as propriedades das fibras.

**Tabela 6 ►**

Comparativo de resultados quanto ao tipo de cimento utilizado em compósitos com adição de partículas de madeira.  
Fonte: elaboração própria

Condições	Trabalho em questão		Matoski (2005)
Espécie	<i>Pinus sp.</i>	<i>Pinus sp.</i>	<i>Pinus sp.</i>
Cimento	CP-II-E-32	CP-II-E-32	CP-V-ARI
Quantidade de fibras	21%	21%	8%
Tratamento	-	Água quente (80 °C – 6 horas)	Água quente (80 °C – 2 horas)
MOR (MPa)	5,697	9,668	12,173
MOE (MPa)	519,365	1175,0	2029,52

O mesmo pode ser observado para os compósitos com a adição de fibras de bambu, conforme a Tabela 7 e a Tabela 8, em que a utilização do tratamento das fibras em água quente associado ao uso do cimento CP-V-ARI por Beraldo *et al.* (2000) resultou em módulo de ruptura superior para esses compósitos em relação aos fabricados com cimento CP-II-E-32 do trabalho em questão.

**Tabela 7 ▶**

Comparativo de resultados quanto ao tipo de cimento utilizado em compósitos com adição de partículas de bambu tratado.  
*Fonte: dados da pesquisa*

Condições	Trabalho em questão	Beraldo <i>et al.</i> (2000)	
Espécie	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	
Cimento	CP-II-E-32	CP-II-E-32	CP-V-ARI
Cimento-fibra-água	1:0,21:0,6	1:0,35:0,75	1:0,35:0,75
Tratamento	Água quente (80 °C – 6 horas)	Água quente (80 °C – 2 horas)	Água quente (80 °C – 2 horas)
MOR (MPa)	8,644	8,0	10

**Tabela 8 ▶**

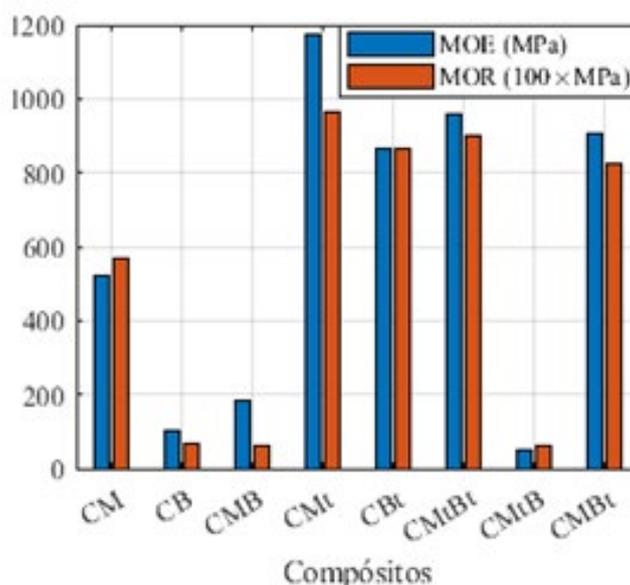
Comparativo de resultados quanto ao tipo de cimento utilizado em compósitos com adição de partículas de bambu sem tratamento.  
*Fonte: dados da pesquisa*

Condições	Trabalho em questão	Beraldo <i>et al.</i> (2000)	
Espécie	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	
Cimento	CP-II-E-32	CP-II-E-32	CP-V-ARI
Cimento-fibra-água	1:0,21:0,6	1:0,35:0,75	1:0,35:0,75
Tratamento	-	-	-
MOR (MPa)	0,675	2,1	1,8

Além disso, os resultados experimentais demonstraram haver uma relação entre os módulos de elasticidade e de ruptura obtidos para os casos estudados, como mostra a Figura 1, podendo-se atribuir esse comportamento à homogeneidade da mistura que apresentou deformação proporcional à ruptura.

**Figura 1 ▶**

Relação entre MOE e MOR dos tratamentos analisados.  
*Fonte: dados da pesquisa*



### 3.2 Análise estatística

Os resultados obtidos na análise estatística ANOVA realizada estão na Tabela 9, onde são apresentados os resultados dos fatores (partículas; tratamento) e da interação (partícula × tratamento) para cada propriedade investigada, estando sublinhados os *p*-valores considerados significativos (*p*-valor < 0,05).

Com exceção do tratamento das partículas para a densidade, os fatores individuais foram significativos nas demais propriedades investigadas, e com relação à interação entre os dois fatores avaliados, não houve significância em nenhuma das propriedades.

**Tabela 9 ▶**  
Resultados da ANOVA para os compostos fabricados.  
*Fonte: dados da pesquisa*

Resposta	<i>p</i> -valor – ANOVA		
	Partícula	Tratamento	Partícula x tratamento
<i>ρ</i>	<u>0,000</u>	0,091	0,080
<i>MOE</i>	<u>0,004</u>	<u>0,000</u>	0,625
<i>Rc</i>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,076

No Quadro 2 são apresentados os resultados do teste de Tukey dos fatores individuais, cabendo destacar que A denota o grupo de maior valor médio, B o de segundo maior valor médio, e assim sucessivamente. Ainda, letras iguais implicam em tratamentos com médias estatisticamente equivalentes ao nível de 5% de significância.

**Quadro 2 ▶**  
Resultados do teste de Tukey.  
*Fonte: dados da pesquisa*

Resposta	Partícula		Tratamento	
	Madeira	Bambu	Não tratado	Tratado
<i>P</i>	A	B	A	A
<i>MOE</i>	A	B	B	A
<i>Rc</i>	A	B	B	A

Nota-se que os compostos fabricados com partículas de madeira tratadas forneceram os melhores resultados para o módulo de elasticidade e resistência na compressão, justificados possivelmente pela menor quantidade de extrativos nas partículas devido ao tratamento realizado.

**Tabela 10 ▼**  
Resultados do módulo de elasticidade de acordo com os modelos micromecânicos.  
*Fonte: dados da pesquisa*

### 3.3 Propriedades de acordo com os modelos micromecânicos

Os resultados experimentais do módulo de elasticidade (*E<sub>c</sub>*) foram comparados com os estimados através da aplicação dos modelos de Voigt, Reuss e Halpin-Tsai, como pode ser visto na Tabela 10.

Composição	<i>E<sub>c</sub></i> (MPa)			
	Voigt	Reuss	Halpin-Tsai	Experimental
CM	4305,059	2671,448	3139,527	519,365
CB	5809,282	2666,324	3317,832	103,269
CMB	5072,761	2686,193	3229,446	184,917

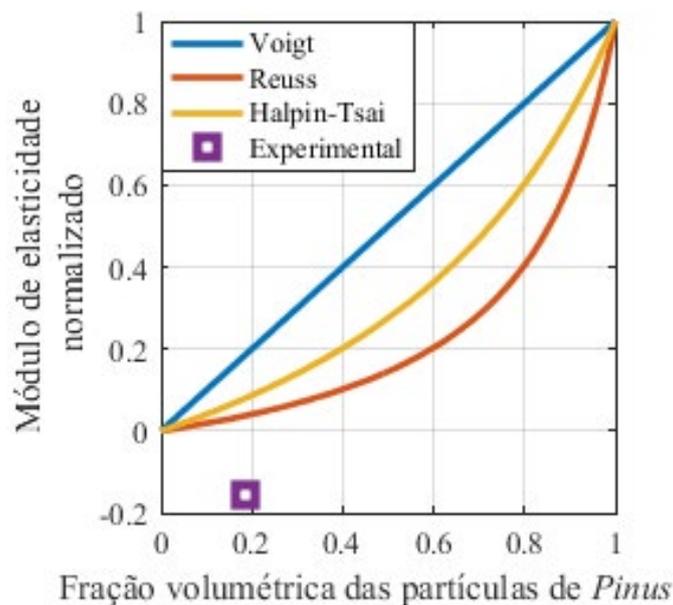
As frações volumétricas obtidas foram de 81,49% e 18,51% para matriz cimentícia e adição de madeira, respectivamente, no compósito CM. Para o compósito CB obtiveram-se as frações 81,84% e 18,16% para a matriz e adição, respectivamente e, para o compósito CMB as frações volumétricas encontradas foram 81,67%, 9,6% e 9,27%.

De maneira geral os resultados estimados superestimaram o módulo de elasticidade do compósito obtido experimentalmente. A maior diferença entre os valores foi obtida para o compósito CB calculado pelo limite superior de Voigt em relação ao valor experimental de 103,269 MPa.

Já os módulos de elasticidade obtidos pelos modelos micromecânicos aumentam com a adição da fibra à matriz, tanto para o bambu quanto para o *Pinus* sp., conforme ilustrado pelas Figuras 2, 3, 4 e 5, em que são expostas as curvas dos modelos e os resultados experimentais de acordo com a fração volumétrica da adição.

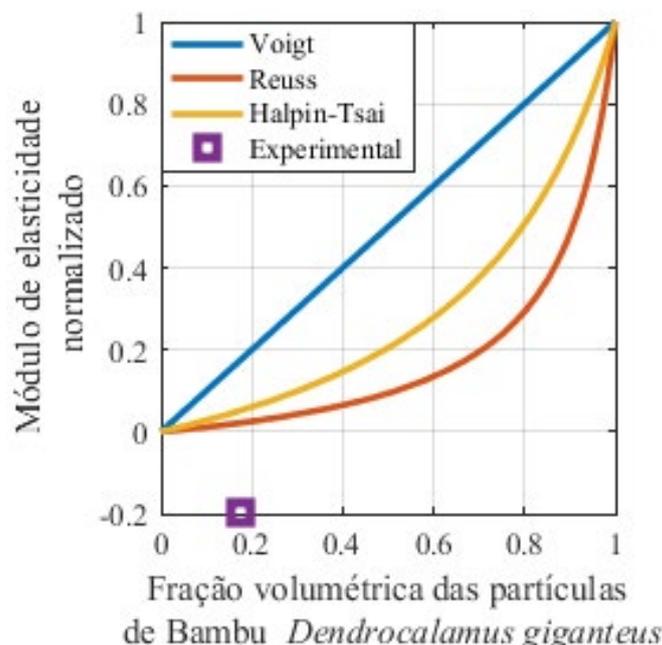
**Figura 2** ►

Módulo de elasticidade pela fração volumétrica das adições nos modelos para o compósito CM.  
Fonte: dados da pesquisa



**Figura 3** ►

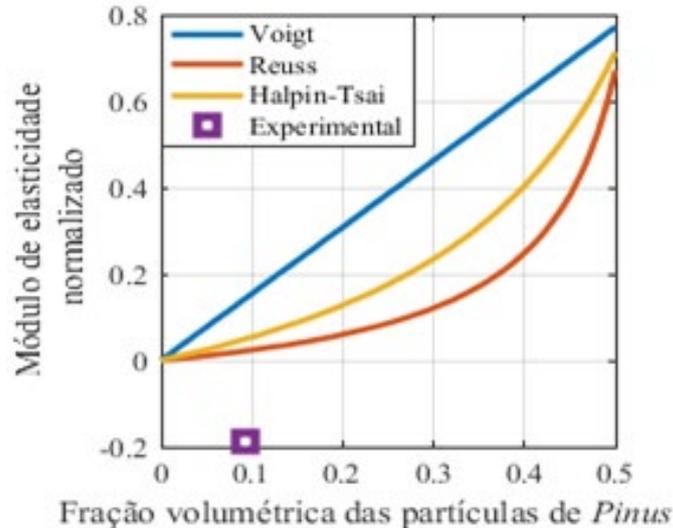
Módulo de elasticidade pela fração volumétrica das adições nos modelos para o compósito CB.  
Fonte: dados da pesquisa



**Figura 4** ▶

Módulo de elasticidade pela fração volumétrica da madeira nos modelos para o compósito CMB.

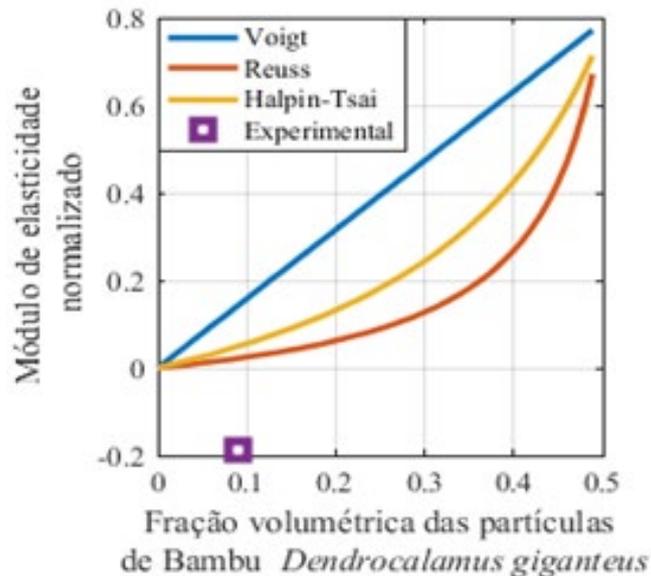
Fonte: dados da pesquisa



**Figura 5** ▶

Módulo de elasticidade pela fração volumétrica do bambu nos modelos para o compósito CMB.

Fonte: dados da pesquisa



As discrepâncias de valores encontradas entre os valores obtidos pelos modelos e os valores experimentais podem ser justificadas pelo fato de que o módulo de elasticidade dos compósitos madeira-cimento tende a diminuir com a adição das partículas de madeira, devido à interação entre os extrativos da madeira e o cimento da matriz, como se verificou também no trabalho de Ashori, Tabarsa e Amosi (2012).

As diferenças podem se justificar também pelos dados de entrada nos modelos. Os módulos de elasticidade da matriz e das adições são variáveis devido a diversos fatores, entre eles: tipo do cimento, variedade da espécie de madeira e relação água/cimento da mistura que podem gerar resultados com grande variabilidade.

## 4 Conclusões

Por meio dos resultados experimentais obtidos e de suas análises, pode-se concluir que:

- i) os compósitos com adição de fibras de bambu apresentaram resultados satisfatórios com a aplicação de tratamento para a retirada de extrativos;
- ii) o tratamento das partículas contribuiu para a diminuição da densidade e para o aumento do módulo de elasticidade dos compósitos, exceto para o caso em que se adicionou madeira tratada e bambu sem tratamento;
- iii) os compósitos de madeira-cimento podem ser aplicados na construção civil em produtos que não haja a exigência de grande resistência;
- iv) o tipo de cimento utilizado no compósito influencia diretamente nos resultados de módulo de elasticidade e de ruptura dos compósitos, sendo mais adequada a utilização do cimento CP-V-ARI;
- v) os modelos micromecânicos empregados não foram capazes de predizer o módulo de elasticidade dos compósitos com adição de partículas de madeira e de bambu, visto que esse valor tende a diminuir com a adição desses elementos.

Para trabalhos futuros sugere-se utilizar outros tratamentos na madeira utilizada na confecção dos painéis compósitos, assim como variar as espécies utilizadas, com o objetivo de se analisar o efeito dessas mudanças nas propriedades do material e na predição através dos modelos micromecânicos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

## Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

## Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: cimento Portland. Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**: Concreto – determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASHORI, A.; TABARSA, T.; AMOSI, F. Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood-cement composite materials. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 126-129, Feb. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.016>.

ASHORI, A.; TABARSA, T.; AZIZI, K.; MIRZABEYGI, R. Wood-wool cement board using a mixture of eucalypt and poplar. **Industrial Crops and Products**, v. 34, n. 1, p. 1146-1149, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.033>.

BERALDO, A. L.; LOPES, W. G. R.; CARVALHO, J. V.; ARZOLLA, J. A. P. R.; SEVEGNANI, K.; SOUZA, P. Efeito da espécie vegetal, do tipo de cimento e do tratamento utilizado sobre a resistência à compressão de compósito. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Infohab, 2000. Disponível em: [http://www.infohab.org.br/entac/entac2000\\_artigos.html](http://www.infohab.org.br/entac/entac2000_artigos.html). Acesso em: 21 fev. 2022.

BERALDO, A. L.; ARRUDA, A. C.; STANCATO, A. C.; SAMPAIO, C. A. P.; FERNANDES FILHO, O. P.; LEONEL, V. M. Compósitos à base de resíduos vegetais e cimento Portland. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais [...]**. Uberlândia, 2002.

BERTOLINI, M. S.; CAMPOS, C. I. Avaliação físico-mecânica de compósitos à base de cimento produzidos com resíduos de madeira e bambu. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 12., 2010, Lavras. **Anais [...]**. Lavras, 2010.

BERTOLINI, M. S.; CAMPOS, C. I.; SOUZA, A. M.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Wood-cement composites from wastes of *Pinus* sp. wood: effect of particles treatment. **International Journal of Composite Materials**, v. 4, n. 2, p. 146-149, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.5923/j.cmaterials.20140402.14>.

BRITO, F. M. S.; PAES, J. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; ARANTES, M. D. C.; FANTUZZI NETO, H. Caracterização anatômica e física do bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus* Munro). **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 4, p. 559-566, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.033913>.

CABRAL, M. R.; NAKANISHI, E. Y.; FRANCO, M. S. R.; SANTOS, S. F.; FIORELLI, J. Treatments of residual pine strands: characterization and wood-cement-compatibility. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 40, n. 6, p. 396-407, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773813.2020.1828474>.

CAMPOS, C. I. Caracterização mecânica de compósito madeira-cimento de reflorestamento (*Cunninghamia lanceolata* Hook). In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS (EBRAMEM), 7., 2000. São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos, 2000.

CAPRAI, V.; GAUVIN, F.; SCHOLLBACH, K.; BROUWERS, H. J. H. Influence of the spruce strands hygroscopic behaviour on the performances of wood-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 522-530, Mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.162>.

CARBONARI, G.; SILVA JUNIOR, N.; PEDROSA, N. H.; ABE, C. H.; SCHOLTZ, M. F.; ACOSTA, C. C. V.; CARBONARI, L. T. Bambu: o aço vegetal. **MIX Sustentável**, v. 3, n. 1, p. 17-25, 2017. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2017.v3.n1.17-25>.

CASTRO, V. G.; AZAMBUJA, R. R.; PARCHEN, C. F. A.; IWAKIRI, S. Influência de aditivos químicos na produção de compósitos madeira-cimento de duas espécies tropicais da Amazônia. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1343-1353, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509819497>.

FERRANDEZ-VILLENA, M.; FERRANDEZ-GARCIA, C. E.; GARCIA-ORTUÑO, T.; FERRANDEZ-GARCIA, A.; FERRANDEZ-GARCIA, M. T. Properties of cement-bonded particleboards made from Canary Islands Palm (*Phoenix canariensis* Ch.) trunks and different amounts of potato starch. **Forests**, v. 11, n. 5, p. 560, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11050560>.

FRYBORT, S.; MAURITZ, R.; TEISCHINGER, A.; MÜLLER, U. Cement bonded composites: a mechanical review. **BioResources**, v. 3, n. 2, p. 602-626, 2008. Disponível em: [https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_03\\_2\\_0602\\_CementBondedComposites](https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_03_2_0602_CementBondedComposites). Acesso em: 14 fev. 2022.

GHATAGE, P. S.; KAR, V. R.; SUDHAGAR, P. E. On the numerical modelling and analysis of multi-directional functionally graded composite structures: a review. **Composite Structures**, v. 236, p. 111837, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111837>.

HALPIN, J. C.; KARDOS, J. L. The Halpin-Tsai equations: a review. **Polymer Engineering and Science**, v. 16, n. 5, p. 344-352, 1976. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.760160512>.

JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 62, n. 5, p. 370-377, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>.

KIM, H. S. On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites. **Materials Science and Engineering: A**, v. 289, n. 1-2, p. 30-33, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00909-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00909-6).

KOCHOVA, K.; SCHOLLBACH, K.; GAUVIN, F.; BROUWERS, H. J. H. Effect of saccharides on the hydration of ordinary Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 268-275, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.149>.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S.; SATYANARAYANA, K. G.; LOMELÍ-RAMÍREZ, M. G. Preparation, and characterization of wood-cement particleboards produced using metakaolin, calcined ceramics, and residues of *Pinus* spp. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101722, Nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101722>.

LOJA, M. A. R.; BARBOSA, J. I.; SOARES, C. M. M. A study on the modeling of sandwich functionally graded particulate composites. **Composite Structures**, v. 94, n. 7, p. 2209-2217, June 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.02.015>.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira**. 2005. 187 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. DOI: <http://hdl.handle.net/1884/2378>.

MATOSKI, A.; IWAKIRI, S. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis de cimento- madeira utilizando farinha de madeira com granulometria controlada. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 2, p. 149-158, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v37i2.8646>.

QUIROGA, A.; MARZOCCHI, V.; RINTOUL, I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood–cement composites and of *Populus Euroamericana* wood fibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 84, p. 25-32, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.069>.

QUIROGA, A.; RINTOUL, I. Mechanical properties of hierarchically structured wood–cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 253-260, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.091>.

RIBEIRO, U. G.; VASCONCELOS, R. P. DE. Estudo de propriedades térmicas e mecânicas de compósitos cimentícios produzidos com resíduos da indústria madeireira de Porto Velho. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0575>.

SOUZA, A. A. C. **Utilização de resíduos da indústria madeireira para a fabricação de chapas cimento-madeira**. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2005. Disponível em: <http://www.repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/1858>. Acesso em: 21 fev. 2022.

TAN, J. F.; JIA, Y. J.; LI, L. X. A series-parallel mixture model to predict the overall property of particle reinforced composites. **Composite Structures**, v. 150, p. 219-225, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.04.047>.