

# Análise da influência do traço nas propriedades do compósito cimento-madeira

Alessandra Monique Weber<sup>[1]</sup>, Luana Cechin<sup>[2]</sup>, Rosângela Basso Tokarski<sup>[3]</sup>, Adalberto Matoski<sup>[4]</sup>

[1] alessandramoniqueweber@gmail.com, [2] luhcechin@gmail.com, [3] rosangela.tokarski@ifsc.edu.br, [4] adalberto@utfpr.edu.br – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-Paraná.

## RESUMO

Os compósitos de cimento com adição de madeira apresentam vantagens, quando comparados a outros materiais convencionais da construção civil, como resistência à água, ao fogo e aos agentes deterioradores. Um dos obstáculos para o uso desse compósito é a inibição causada pela madeira na cura do cimento, devido aos componentes da madeira afetarem as reações, tendo como consequência um compósito de baixa qualidade. Dessa forma, este trabalho teve por objetivo avaliar diferentes traços do compósito cimento-madeira, utilizando resíduos de *Pinus spp.*, por meio de ensaios de laboratório. Foi utilizado o cimento Portland CP II Z 32, relação água/cimento igual a 0,4; o aditivo químico escolhido foi o cloreto de cálcio para acelerar a pega. Para a comparação de desempenho, foram delimitadas quatro dosagens diferentes, com teores de adição de madeira de 10%, 20%, 25% e 33% em relação à massa de cimento. Para a análise, foram feitos ensaios das propriedades físicas e mecânicas para todas as dosagens, sendo, posteriormente, submetidas à análise da variância e teste de Tukey. Os resultados dos ensaios das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos demonstraram que, para as relações escolhidas, quanto menor for a adição de madeira melhores serão os resultados das propriedades, mas mesmo os traços com maiores teores de madeira apresentam resultados relevantes, atentando-se apenas para o fato da relação água/cimento ser baixa para os casos analisados, e, devido a isso, ter influenciado negativamente nos resultados.

**Palavras-chave:** Compósitos cimento-madeira. *Pinus spp.* Resíduos.

## ABSTRACT

*The cement composites with addition of wood have advantages when compared to other conventional materials of construction, such as resistance to water, fire and deteriorating agents. One obstacle to the use of this composite is caused by the inhibition of timber in the cement cures, due to the wood components affect the reactions, resulting in a low quality composite. Thus, this study aimed to evaluate different traits of the composite cement-wood, using residues of *Pinus spp.*, through laboratory tests. Was used Portland cement CP II 32 Z, water/cement ratio equal to 0,4; was used, and the chosen chemical additive is calcium chloride to accelerate the handle. For performance comparison, four different dosages were defined with addition levels of 10% wood, 20%, 25% and 33% in relation to cement mass. For examination of the physical and mechanical property tests were performed for all doses, being subsequently submitted to analysis of variance and Tukey test. The test results of physical and mechanical properties of the composites showed that for the chosen relationship, the smaller the addition of timber better are the results of properties, but even traces with larger timber contents have relevant results, considering only the fact of the water/cement ratio is low for the analyzed cases, and because of this, had a negative influence on the results.*

**Keywords:** *Cement-wood composites. Pinus spp. Residues.*

## 1 Introdução

A preocupação atual com as questões ambientais que interferem na vida do planeta demanda que haja o uso consciente de seus recursos naturais. Essa necessidade crescente da utilização de resíduos incentiva as indústrias a buscarem alternativas para a oferta dos produtos no mercado. As fibras vegetais aparecem nesse cenário como uma excelente alternativa para substituir outros materiais, viabilizando o custo de produções.

Segundo Matoski (2005), é durante a fabricação de diversos materiais que ocorre a emissão de dióxido de carbono na atmosfera, o que é prejudicial para o meio ambiente por contribuir com o aquecimento global. O material que mais emite CO<sub>2</sub> durante o processo de produção é o cimento; já construções compostas com madeira utilizam menos energia, logo eliminam menor quantidade de dióxido de carbono. Para otimizar a utilização de materiais, são desenvolvidos novos compostos que, combinados entre si, melhoram as características um do outro, sendo este o caso do compósito cimento-madeira.

De acordo com Rim *et al.* (1999), deve-se enfatizar o impacto ambiental gerado pelos materiais utilizados em geral. Com a aplicação destes compostos (cimento-madeira), utiliza-se uma quantidade menor de materiais que consomem energia durante a produção e há, ainda, a possibilidade de reutilizar resíduos.

Garcez *et al.* (2016a) ressaltam que, devido ao fato de o Brasil ter alta produção de madeiras em toras, há, na mesma proporção, altas quantidades de geração de resíduos. Tais resíduos podem ser utilizados na produção de compostos, como proposto neste trabalho.

A produção de materiais de construção de cimento reforçados com fibras de madeira vem crescendo rapidamente. Além da viabilidade econômica, a vantagem é que se podem desenvolver componentes esbeltos, com bom desempenho mecânico e termo acústico (BERALDO; CHEN; AZZINI, 2003). Pimentel (2000) ainda indica o uso de compósito cimento com biomassa vegetal, pela facilidade de serragem e acabamento, permitindo o uso do compósito na produção de painéis, forros, telhas, elementos de vedação, pisos e blocos não estruturais.

Dessa forma, além das vantagens econômicas proporcionadas pela utilização de resíduos na produção de um novo material, existe o fato de se utilizar

um material que elimina menos quantidade de dióxido de carbono, e, ainda, diminui o impacto ambiental, já que propõe também a redução de uso de cimento em substituição por madeira. Quando comparado com painéis constituídos apenas de madeira, os painéis de cimento-madeira se destacam pela baixa toxicidade que a produção possui, por não utilizar resinas e ainda não gerar, por consequência, efluentes líquidos.

Apesar das vantagens do compósito, a incompatibilidade de várias espécies de madeira com o cimento pode restringir o uso desses materiais para a produção. Isso acontece devido a componentes químicos da madeira, principalmente aos extrativos que retardam a pega do cimento. Segundo Pimentel (2000), pelo fato de o início de pega ser muito longo, a produtividade pode decair. Por isso, são empregados tratamentos para extração de substâncias químicas inibidoras ou é feita a adição na mistura de aditivos que aceleram a pega do cimento (LATORRACA, 2000). Beraldo, Chen e Azzini (2003) indicam aceleradores como o cloreto de cálcio e sulfato de alumínio para evitar que os extrativos da madeira afetem a hidratação do cimento.

A função dos tratamentos na madeira é promover a extração de seus materiais orgânicos. Os métodos extrativos constituem-se basicamente em solubilizar o material vegetal com alguma substância polar ou apolar (CASTRO, 2015).

Nesse sentido, diversas pesquisas estão sendo feitas para verificar as propriedades do produto final, com a finalidade de encontrar soluções para a incompatibilidade do cimento com as fibras vegetais.

No estudo de Castro *et al.* (2014), foi comparada a utilização de tratamentos com água fria, água quente, solução alcalina em cal hidratada e adição de aditivo cloreto de cálcio. Apresentou-se, como resultado, a prescindibilidade de tratamentos na madeira, sendo mais efetiva, entre todos os tratamentos, a utilização do aditivo cloreto de cálcio.

Para tratamento de *Eucalyptus dunnii* com água quente e com hidróxido de sódio foram obtidos resultados inferiores aos corpos de prova *in natura* (LATORRACA, 1996).

Pereira *et al.* (2006) examinaram a hidratação do cimento com *Pinus spp.* tratado com substâncias apolares, como o etanol e éter etílico. Os resultados demonstraram que não há diferença significativa na compatibilidade da mistura quando a madeira está *in natura* ou após os métodos extrativos.

Matoski (2005) utilizou *Pinus spp.* em painéis cimento-madeira e obteve como resultado que os aditivos à base de cloreto resultam em melhores resultados de módulo de ruptura e módulo de elasticidade.

Conforme Pimentel (2000), para a avaliação de compatibilidade entre o cimento e a madeira, o ensaio de compressão em corpos de prova é um método que irá avaliar a capacidade de o sistema atingir a resistência final. Já para a resistência inicial, o teste adequado é o de calor de hidratação.

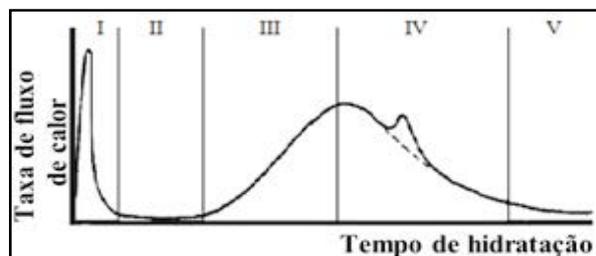
Segundo Lee e Hong (1986 *apud* LIMA, 2009), a compatibilidade entre o cimento e a madeira também pode ser mensurada por um indicador, baseado em resultados de ensaios, para a determinação da resistência à compressão axial de corpos de prova cilíndricos feitos com um molde padrão da ASTM. Para a determinação deste indicador, os corpos de prova foram produzidos com cimento Portland Tipo I (no Brasil este cimento é similar ao cimento Portland Comum, segundo a NBR 5732 – 1991) e com resíduos de madeira das espécies *Southern-pine*, *White-oak*, *Yellow-poplar*, *Sweet-gum* e *Hickory*, na proporção 13:1. E os resultados demonstraram que a resistência à compressão é diretamente proporcional à temperatura máxima de hidratação.

As características de hidratação são comumente utilizadas para verificar a compatibilidade do cimento com materiais lignocelulósicos (HACHMI, MOSLEMI; CAMPBELL, 1990). São cinco as etapas de hidratação do cimento: hidratação inicial (0 a 15 min), período de indução (15 min a 4 h), período de aceleração (4 h a 8 h), período de desaceleração (8 h a 24 h) e cura (1 a 28 dias) (CATARINO, 2012).

Na Figura 1 está demonstrada a representação esquemática da liberação de calor durante o processo de hidratação do cimento.

**Figura 1** – Curva de hidratação do cimento.

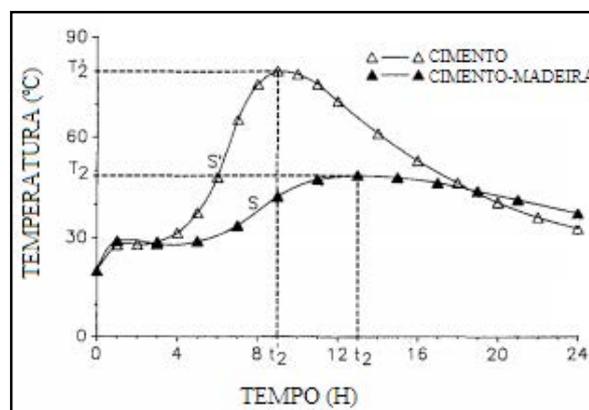
Indicação das etapas de reação: (I): hidratação inicial; (II): período de indução; (III) período de aceleração; (IV): período de desaceleração e (V): cura



Fonte: Adaptado de Zampieri (1989).

Segundo Zhengtian e Moslemi (1986), o teor de extrativos presentes na madeira influencia a curva do calor de hidratação. Como podemos observar na Figura 2, o efeito das partículas de madeira na curva de hidratação do cimento afetam a temperatura máxima e o tempo para atingi-la, considerando a curva do cimento uma mistura de cimento e água e a curva do cimento-madeira uma mistura de cimento, água e partículas de *Quercus suber L.*

**Figura 2** – Curva de hidratação do cimento comparado ao cimento-madeira



Fonte: Adaptado de Hachmi, Moslemi e Campbell (1990).

A espécie de madeira *Pinus spp.* é considerada uma espécie de baixa inibição (CASTRO, 2015), e trabalhos como os de Lima (2009) e Matoski (2005) apresentaram bons resultados de ensaios de compatibilidade dessa espécie com o cimento.

Além da incompatibilidade química que pode ocorrer em compostos cimento-madeira, existe ainda a incompatibilidade física, que ocorre devido à movimentação higroscópica diferenciada entre as matrizes cimentícias e as fibras. Isso ocorre porque as fibras possuem a tendência de se movimentar mais do que o cimento, o que acarretará em esforços mecânicos cíclicos e resultará, provavelmente, em micro fissuração generalizada no compósito (PIMENTEL; BERALDO; SAVASTANO JÚNIOR, 2006).

Além da avaliação de compatibilidade do compósito cimento-madeira, as propriedades físicas dos compósitos também são importantes para a sua avaliação. De acordo com Garcez, Santos e Gatto (2013), a redução da massa específica, que acontece conforme o aumento de teor de madeira, acarreta diminuição do limite de resistência. Em contrapartida, conforme Garcez *et al.* (2016b), a vantagem de uma

massa específica baixa é a de apresentar, por consequência, um produto mais leve, resultando então em produtos com maior facilidade de manuseio. E ainda, a análise dos parâmetros de índice de vazios e de absorção de água é importante devido à influência que ocorre na estabilidade dimensional, o que é um fator indispensável para a aplicação prática do compósito.

Altos índices de vazios resultarão em peças mais leves, e este fator auxiliará no desempenho térmico do material. Baixos fatores de massa específica, por consequência, contribuem na absorção de tração por compressão, o que facilita o uso do composto em blocos, telhas, placas, entre outros. (ARRUDA; SILVA; MARTINEZ, 2012).

Segundo Macêdo *et al.* (2011), foi verificado, por meio do ensaio de consistência, que há uma dificuldade de manter a trabalhabilidade em misturas com material fibroso, devido ao fato de estes materiais absorverem a água de amassamento.

Jorge, Pereira e Ferreira (2004) dizem que são diversas as variáveis que irão definir as propriedades finais do produto, sendo, assim, difícil ter uma previsão teórica da resposta que o composto apresentará. Algumas dessas variáveis são: espécie da madeira e suas características físicas e químicas, a granulometria da madeira, tipo de cimento, o aditivo escolhido, proporções de madeira-cimento/água e a temperatura do ambiente durante o processo de produção.

Como o estudo deste material apresenta diversas variáveis que irão influenciar nas propriedades do produto final, foram definidos os materiais com base em estudo bibliográfico. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da proporção de madeira adicionada à matriz cimento por meio de ensaios em laboratório, sendo escolhido o aditivo cloreto de cálcio para a composição, por proporcionar melhores resultados em estudos desse tipo de mistura. Com o propósito final, pretende-se verificar a utilização do compósito para as mais diversas produções, como blocos, painéis e telhas.

## 2 Metodologia

Foram produzidos corpos de prova de cimento-madeira compostos de resíduo de *Pinus spp.* com presença de aditivo químico, com os traços propostos de adição de madeira de 10%, 20%, 25% e 33%, e realizados ensaios para determinação de suas propriedades físicas e mecânicas, sendo então analisados os resultados, utilizando-se análise de variância ANOVA, para verificar se a variação do traço influencia as pro-

priedades, e comparação múltipla entre as médias de cada ensaio pelo teste de Tukey.

### 2.1 Materiais

A farinha de madeira utilizada como material lignocelulósico é proveniente de reciclagem de uma indústria de processamento de madeira, resíduo da espécie *Pinus spp.* Para a determinação de sua granulometria, foi adotado um tamanho máximo de partícula, ou seja, foram utilizadas todas as partículas passantes na peneira de abertura, de malha de 1,2 mm. A madeira foi utilizada *in natura*, ou seja, sem prévio tratamento.

O aglomerante utilizado foi o Cimento Portland CP II-Z-32 R composto com pozolana, escolhido por ampla disponibilidade no mercado. O cimento utilizado está em conformidade com a NBR 11578 (ABNT, 1991).

Foi empregado cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) como aditivo químico, para acelerar a pega do cimento e reduzir o tempo de cura, o que acarreta em resistência inicial elevada. O uso do aditivo se deve ao fato de que em outros estudos ele demonstrou os melhores resultados de compatibilidade, de propriedades físicas e mecânicas. A água utilizada é da rede de abastecimento da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), devido o trabalho ter sido realizado na cidade de Curitiba, no estado do Paraná.

### 2.2 Produção do compósito

Para o delineamento experimental, a variável estabelecida é a relação cimento-madeira, formando, assim, quatro composições de traço, conforme Quadro 1.

São apresentados no Quadro 1, as quatro composições de estudo, sendo que a composição T1 se refere a adição de 10% de madeira, T2 a adição de 20%, T3 a adição de 25% e T4 a adição de 33% de madeira na mistura.

Quadro 1 – Delineamento Experimental

Identificação da composição	Relação cimento: madeira (em massa)
T1	10:1
T2	5:1
T3	4:1
T4	3:1

Fonte: autoria própria (2016).

O compósito foi homogeneizado em misturador mecânico, em que foram adicionados o cimento e a farinha de madeira, e, lentamente, foi adicionada a água com o aditivo. O teor de cloreto de cálcio adicionado foi de 4% (em massa) em todos os casos, sendo o aditivo sempre diluído em água. A relação de água/cimento determinada foi igual a 0,4. A massa foi misturada durante 1 minuto em velocidade baixa e mais 1 minuto em velocidade alta.

Para a manufatura dos corpos de prova foram utilizados moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Sendo três corpos de prova de cada traço para o ensaio das propriedades físicas de absorção de água, índice de vazios e massa específica seca, e quatro corpos de prova de cada traço para o ensaio de resistência a compressão. A confecção dos corpos de prova seguiu a NBR 5739 (ABNT, 2007). A cura ocorreu em temperatura e umidade ambiente do laboratório. Não foi possível manter os corpos de prova imersos em água saturada com cal, devido às características higroscópicas do resíduo.

### 2.3 Determinação das propriedades físicas e mecânicas

Primeiramente, foram feitos os ensaios de índice de consistência e o de calorimetria. E aos 28 dias de idade, os corpos de prova foram ensaiados para a verificação de suas propriedades físico-mecânicas: absorção de água, índice de vazios, massa específica e ensaio de compressão.

Para a determinação do índice de consistência de mesa (*flow table*) foi adaptado a norma NBR 13276 (ABNT, 2005b). Este ensaio foi realizado para verificar a coesão entre os componentes da mistura e caracterizar o comportamento do compósito. O ensaio consiste na medida do espalhamento (diâmetro) de uma quantidade do compósito moldado em forma tronco-cônica sobre uma mesa de consistência. Após a remoção da forma, o compósito é forçado a deformar-se mediante a deflagração de 30 golpes padronizados a uma altura de  $12,5 \pm 2$  mm. São medidos dois diâmetros ortogonais na base desse tronco de cone, onde a média aritmética é o índice de consistência, expresso em milímetros.

Para caracterizar a evolução do calor de hidratação, adaptou-se a NBR 12006 (ABNT, 1990). A norma determina a utilização de um calorímetro semi-adiabático para a realização do ensaio, e por não haver a disponibilidade deste foram utilizadas caixas de isopor para que ocorresse o isolamento

da temperatura. Foram analisados os quatro traços com duas repetições cada, e a aquisição de dados foi através do aparelho Master Logger A 202, com termopares do tipo K (níquel - cromado) ANSI 2 x 24 (0,51mm) AWG em silicone com 8 canais. Com o material depositado no isopor, foram feitas leituras da temperatura através de termopares, no intervalo de cada 10 segundos, durante aproximadamente 45 horas. O objetivo desse ensaio é verificar se o calor de hidratação do cimento será afetado conforme se aumenta o teor de madeira adicionada ao composto.

O ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica foi realizado aos 28 dias de idade dos corpos de prova, adotando-se os procedimentos da norma NBR 9778 (ABNT, 2005a).

Para a determinação da porcentagem de água absorvida foi utilizada a Equação 1. O índice de vazios é a relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total, sendo calculado pela Equação 2. Para o cálculo das massas específicas, foram utilizadas a Equação 3, para a massa específica da amostra seca; Equação 4, para a massa específica da amostra saturada e a Equação 5, que define a massa específica real.

$$A = \left( \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

$$I_v = \left( \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

$$\rho_s = \left( \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \right) \quad (3)$$

$$\rho_{sat} = \left( \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \right) \quad (4)$$

$$\rho_r = \left( \frac{m_s}{m_s - m_i} \right) \quad (5)$$

Em que:

$m_{sat}$  = massa do corpo de prova saturado

$m_s$  = massa do corpo de prova seco em estufa

$m_i$  = massa do corpo de prova saturado, imerso em água.

A massa da amostra seca ( $m_s$ ) foi obtida após 72 h em estufa à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Posteriormente, as amostras foram levadas a imersão em água, com temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , por 72 h e então levada para fervura por

5 h. A massa da amostra saturada ( $m_{sat}$ ) é obtida após imersão em água e fervura, e a massa da amostra saturada imersa em água, após fervura ( $m_i$ ), é a massa registrada em balança hidrostática.

O ensaio para determinação da resistência à compressão foi realizado conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996). Foram utilizados discos de neoprene envoltos em aço para garantir que não houvesse influência na ruptura, devido a irregularidades nos topos dos corpos de prova. Para os ensaios mecânicos, foi utilizado o equipamento universal de ensaios (30 kN). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

### 3 Resultados e discussão

Os valores médios de índice de consistência estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** – Valores médios do índice de consistência

Composições	Índice de consistência (mm)	CVar (%)
T1	195 <sup>A</sup>	2,2
T2	160 <sup>B</sup>	1,3
T3	136 <sup>C</sup>	2,6
T4	126 <sup>C</sup>	1,1

\* Valores médios de duas repetições.

\*\* Médias seguidas pela mesma letra dentro da mesma coluna não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

\*\*\* CVar se refere ao coeficiente de variação.

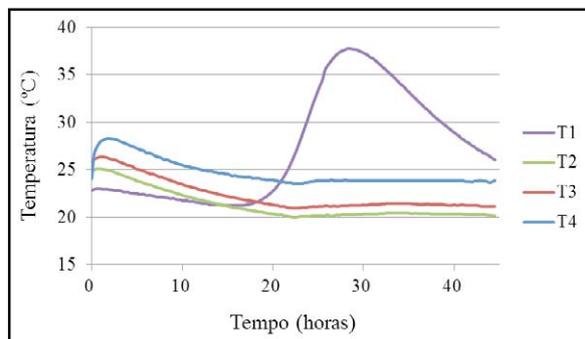
Fonte: autoria própria (2016).

Pelo ensaio realizado de índice de consistência, percebe-se a dificuldade de trabalhabilidade da mistura, conforme o aumento de massa de madeira adicionada. Os traços 3 e 4, que apresentaram menores valores de índice de consistência demonstraram comportamento de inferior trabalhabilidade da mistura.

A Figura 3 apresenta a curva de hidratação para as pastas de cimento dos respectivos corpos de prova, com as temperaturas médias medidas.

Analisando os resultados do ensaio de hidratação do cimento, vemos que os traços 2, 3 e 4 não atingem elevadas temperaturas para a hidratação do cimento, apresentando alto valor de inibição, ou seja, entende-se que a mistura não é compatível.

**Figura 3** – Curva de hidratação dos corpos de prova



Fonte: autoria própria (2016).

Para evitar a inibição do compósito, é aconselhado tratar as partículas de madeira quando a espécie possui altos índices de extrativos que irão inibir a cura do cimento. Como esse não é o caso do *Pinus spp.*, pois, a espécie é considerada de baixa inibição, constata-se que a grande influência no composto foi a baixa quantidade de água na mistura. Sendo então incoerentes os resultados das composições T2, T3 e T4, considerando que a quantidade estabelecida de água afetou a hidratação do cimento, conforme se aumenta a massa da composição.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios de absorção de água.

**Tabela 2** – Valores médios em porcentagem de absorção de água

Composições	Absorção de água (%)	CVar (%)
T1	19,4 <sup>C</sup>	4,7
T2	22,8 <sup>B</sup>	1,6
T3	23,9 <sup>B</sup>	2,6
T4	48,7 <sup>A</sup>	2,0

\* Valores médios de três repetições.

\*\* Médias seguidas pela mesma letra dentro da mesma coluna não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

\*\*\* CVar se refere ao coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2016).

O teor de fibras vegetais altera significativamente a absorção de água, sendo, que, quanto maior a porcentagem de madeira adicionada ao compósito, maiores serão os índices desse parâmetro. Fato que pode ser percebido nos corpos de prova, elevando a média de 19,4%, quando o teor é de 10% de *Pinus spp.*, para uma média de 48,7%, quando a adição é de 33% de *Pinus spp.* Observam-se coeficientes de variação baixa para as amostras, apenas para T1

encontramos um valor mais alto, mas, ainda assim, se considera homogêneo o conjunto de dados.

Na Tabela 3 estão indicados os resultados do ensaio de índice de vazios, que expressa a porosidade do compósito.

**Tabela 3** – Valores médios de índice de vazios

Composições	Índice de Vazios (%)	CVar (%)
T1	25,3 <sup>C</sup>	4,1
T2	31,6 <sup>B</sup>	1,2
T3	30,2 <sup>B</sup>	1,3
T4	49,1 <sup>A</sup>	2,6

\* Valores médios de três repetições.

\*\* Médias seguidas pela mesma letra dentro da mesma coluna não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

\*\*\* CVar se refere ao coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2016).

Constatam-se melhores resultados para o T1 novamente, por apresentar menor índice de vazios, quando comparado as demais misturas. E é visualizado que o T4 apresentou o percentual de índice de vazios mais elevado, tendo uma diferença de 94%, quando comparado à menor média obtida dos demais compósitos. Em contrapartida, são favoráveis os valores altos de índice de vazios, pois, este fator refletirá em um conforto térmico no ambiente onde será aplicado o material.

Os valores médios de massa específica seca são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** – Valores médios de massa específica seca

Composições	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	CVar (%)
T1	1,39 <sup>A</sup>	0,5
T2	1,30 <sup>B</sup>	1,2
T3	1,26 <sup>C</sup>	1,1
T4	1,01 <sup>D</sup>	0,7

\* Valores médios de três repetições.

\*\* Médias seguidas pela mesma letra dentro da mesma coluna não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

\*\*\* CVar se refere ao coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2016).

Os resultados da determinação da massa específica da amostra saturada são apresentados na Tabela 5. Pode-se notar que quanto maior a proporção de resíduo de madeira no compósito mais ocorre uma

diminuição da massa específica tanto da amostra seca, como da amostra saturada. Isso acontece devido à presença de madeira, e também pela presença de poros na mistura que aumentam na mesma proporção da quantidade de madeira, devido à dificuldade de adensamento da mistura, o que pode ser observado também na Tabela 3 com os valores de índice de vazios.

**Tabela 5** – Valores médios de massa específica da amostra saturada

Composições	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	CVar (%)
T1	1,70 <sup>A</sup>	0,0
T2	1,56 <sup>B</sup>	0,9
T3	1,56 <sup>B</sup>	0,4
T4	1,50 <sup>C</sup>	1,1

\* Valores médios de três repetições.

\*\* Médias seguidas pela mesma letra dentro da mesma coluna não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

\*\*\* CVar se refere ao coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2016).

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios de massa específica real.

**Tabela 6** – Valores médios de massa específica real

Composições	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	CVar (%)
T1	2,02 <sup>A</sup>	0,4
T2	1,81 <sup>B</sup>	0,8
T3	1,74 <sup>B</sup>	0,9
T4	1,98 <sup>A</sup>	3,1

\* Valores médios de três repetições.

\*\* Médias seguidas pela mesma letra dentro da mesma coluna não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

\*\*\* CVar se refere ao coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2016).

A massa específica real é a massa do composto, excluindo os poros permeáveis e os vazios do composto. Observou-se que o menor valor de massa específica real foi para a composição T3 e o valor mais alto de massa específica para a composição T1.

Para todas as massas específicas, nas diferentes composições, os valores de coeficiente de variação são considerados baixos, caracterizando assim a uniformidade do conjunto de dados das amostras.

O resultado dos ensaios de compressão aos 28 dias está apresentado na Tabela 7, expondo os valores médios para cada corpo de prova.

O compósito T1, com adição de 10% de *Pinus spp.*, apresentou o melhor desempenho mecânico aos 28 dias. Já o compósito T4, com teor de 33% de *Pinus spp.*, apresentou os piores desempenhos, demonstrando, assim, o desempenho do composto T4, a situação limite para a resistência. A resistência diminui conforme se aumenta o teor de madeira na mistura, porque o cimento é o material ligante do composto.

**Tabela 7** – Valores médios da resistência à compressão aos 28 dias

Composições	Resistência à compressão (MPa)	CVar (%)
T1	20,9 <sup>A</sup>	9,9
T2	17,6 <sup>AB</sup>	9,2
T3	15,0 <sup>B</sup>	15,1
T4	4,0 <sup>C</sup>	6,3

\* Valores médios de quatro repetições.

\*\* Médias seguidas pela mesma letra dentro da mesma coluna não se diferenciam estatisticamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

\*\*\* CVar se refere ao coeficiente de variação.

Fonte: autoria própria (2016).

A análise de variância ANOVA realizada para as propriedades de absorção de água, índice de vazios, massa específica seca, massa específica da amostra saturada, massa específica real e a resistência à compressão, considerou as hipóteses de:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H1: pelo menos dois  $\mu_s$  são diferentes.

A análise ANOVA, com confiança de 95%, foi realizada para comparar estatisticamente a influência do aumento de fibras na composição. Assim, pode-se rejeitar a hipótese nula em todos os casos, ou seja, pode-se afirmar que o aumento do teor de fibras na mistura influenciou as propriedades físicas de absorção de água, índice de vazios, da massa específica seca, da massa específica da amostra saturada, massa específica real e também influenciou a propriedade mecânica de resistência a compressão. Devido ao aumento do teor de madeira na mistura, ocorre uma necessidade do aumento da quantidade de água, o que acaba por influenciar diretamente na resistência à compressão dos corpos de prova. Como o trabalho se propôs a manter a relação água/cimento constante o compósito, não possui água suficiente para

a hidratação completa do cimento, afetando assim a consistência e a resistência à compressão dos corpos de prova.

## 4 Conclusões

Com base nos resultados dos ensaios, concluiu-se a viabilidade do uso de fibra de *Pinus spp.* para reforço em matrizes cimentícias, sendo as condições utilizadas com o teor de 10% e de 20% de madeira as mais indicadas para uso. Este fato é validado pelos resultados das propriedades físicas e mecânicas das duas composições apresentarem resultados superiores aos demais traços.

Observou-se melhor trabalhabilidade nas misturas de traço 4:1 e 5:1, referentes aos dois primeiros corpos de prova.

As massas específicas das amostras diminuíram com o aumento do teor de resíduo de madeira adicionado, o que torna o compósito de fácil manuseio.

O ensaio de compressão se demonstrou eficaz na análise de compatibilidade da mistura cimento-madeira, pois o ensaio teve resultados inferiores conforme o aumento de teor de madeira.

A variação na composição dos traços influenciou as propriedades do compósito, como foi concluído pela análise ANOVA.

O traço 3:1 é estabelecido como o limite para teores de adição de madeira no composto, considerando as condições impostas na pesquisa.

Como recomendação para estudos futuros, indica-se a correção da relação água/cimento conforme a quantidade e a umidade da madeira para garantir uma melhor hidratação da mistura.

## REFERÊNCIAS

ARRUDA, P. P. de; SILVA, A. O. da; MARTINEZ, R. G. Utilização de resíduos de madeira como elemento construtivo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: UFSCAR, ANTAC, 2012. p. 205-219.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: cimento**

**Portland: determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: cimento Portland Composto.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12006: cimento: determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant.** Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2005b.

BERALDO, A. L.; CHEN, F. K. C. H.; AZZINI, A. Telhas onduladas de bambu-cimento. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 3., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, ANTAC, 2003. p. 1-10.

CASTRO, V. G. *et al.* Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & cambage no grau de compatibilidade com cimento portland. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 935-942, 2014.

CASTRO, V. G. de. **Espécies da amazônia na produção de compósitos madeira-cimento por vibro-compactação.** 221 f. Curitiba, 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CATARINO, J. F. **Avaliação da influência do cimento na interação cimento-superplastificante.** 159 f. Lisboa, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012.

GARCEZ, M. R.; SANTOS, T.; GATTO, D. A. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos pré-moldados com adição de serragem em substituição ao agregado miúdo. **Ciência & Engenharia**, v. 22, p. 95-104, 2013.

GARCEZ, M. R. *et al.* Cement-wood composites: effects of wood species, particle treatments and mix proportion. **International Journal of Composite Materials**, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2016a.

GARCEZ, M. R. *et al.* Propriedades físicas de compósitos cimento-madeira com serragem de *Pinus elliottii* tratada. **Ciência da Madeira**, v. 7, n. 2, p. 70-80, 2016b.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A.; CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science Technology**, v. 24, p. 345-354, 1990.

JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. **Holz Roh Werkst**, v. 62, p. 370-377, 2004.

LATORRACA, J. V. F. **Estudo da viabilidade do uso da espécie *Eucalyptus dunnii* (maid) na manufatura de painéis de madeira-cimento.** 182 f. Curitiba, 1996. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

LATORRACA, J. V. F. ***Eucalyptus* spp. na produção de painéis cimento-madeira.** 182 f. Curitiba, 2000. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

LIMA, A. J. M. de. **Utilização de resíduo de *Pinus* spp e materiais cimentícios alternativos na produção de blocos para alvenaria estrutural.** 282 f. Curitiba, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MACÊDO, A. *et al.* Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento-madeira. **Revista Matéria**, v. 16, n. 2, p. 658-667, 2011.

MATOSKI, A. **Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira.** 187 f.

Curitiba, 2005. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

PEREIRA, C. *et al.* Characterizing the setting of cement when mixed with cork, blue gum, or maritime pine, grown in Portugal I: temperature profiles and compatibility indices. **Journal of Wood Science**, n. 52, p. 311-317, 2006.

PIMENTEL, L. L. **Telhas onduladas à base de Cimento Portland e resíduos de Pinus caribaea.** 67 f. Campinas, 2000. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

PIMENTEL, L. L.; BERALDO, A. L.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Durabilidade de compósito biomassa vegetal-cimento modificado por polímero. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 344-353, mai/ago. 2006.

RIM, K. Al. *et al.* Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 21, p. 269-76, 1999.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas.** 191 f. São Paulo, 1989. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1989.

ZHENG TIAN, L.; MOSLEMI, A. A. Effect of Western Larch Extractives on cement setting. **Forest Products Journal**, v. 36, n. 1, p. 53-54, 1986.