

PAINÉIS CIMENTO-MADEIRA DE *Eucalyptus saligna* COM DIFERENTES ADITIVOS QUÍMICOS E MÉTODOS DE FORMAÇÃO

Vinicius Gomes de Castro¹, Rafael Leite Braz¹, Rafael Rosa Azambuja¹, Pedro Lício Loiola¹, Setsuo Iwakiri², Jorge Luis Monteiro Matos²

¹Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Curitiba, Paraná, Brasil - vinnie.castro@gmail.com; rafaellbraz@yahoo.com.br; rafael.r.azambuja@gmail.com; pedrlicio@hotmail.com

²Universidade Federal do Paraná, Departamento Engenharia e Tecnologia Florestal, Curitiba, Paraná, Brasil - setsuo@ufpr.br; jmatos@ufpr.br

Recebido para publicação: 18/03/2014 – Aceito para publicação: 17/09/2014

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de uso de diferentes aditivos químicos e métodos de formação na produção de compósitos cimento-madeira com clone de *Eucalyptus saligna*. Utilizou-se o cimento Portland tipo CP II-Z, como aglutinante mineral, e cloreto de cálcio (CaCl₂) e cloreto de magnésio (MgCl₂), como aceleradores de cura do cimento. Os painéis cimento-madeira foram produzidos pelo método de prensagem na prensa de pratos de 50,5 x 38,5 x 1,5 cm, e pelo método de adensamento por vibrocompactação em dimensões de 35 x 7 x 1,5 cm. Os painéis foram formados com densidade nominal de 1 g/cm³ e relação cimento:madeira de 2,75:1. Com base nos resultados, pode-se concluir que: (I) os testes de hidratação mostraram que a madeira é compatível com o cimento Portland tipo II; (II) o uso de cloreto de cálcio e de magnésio na proporção de 3% em relação à massa do cimento proporcionou incremento nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos pelos dois métodos de formação avaliados; (III) os painéis produzidos pelo método de adensamento por vibrocompactação apresentaram menor densidade média, maior estabilidade dimensional e melhor tração perpendicular do que os painéis produzidos pelo método tradicional de prensa de pratos.

Palavras-chave: Compósito cimento-madeira; vibro compactação; aceleradores de cura.

Abstract

Wood-cement boards of Eucalyptus saligna with different chemical additives and methods of formation. The aim of this work was evaluate the potential use of different chemical additives and methods of formation for wood-cement composites with *Eucalyptus saligna* clones. Portland cement type II-Z was used as mineral bonding and Calcium chloride (CaCl₂) and Magnesium chloride (MgCl₂) as accelerator of the cement hydration. The wood-cement panels were produced by the cold press method with dimensions of 50.5 x 38.5 x 1.5 cm, and by vibro-compaction densification with 35 x 7 x 1.5 cm. Both methods used a nominal density of 1.0 g/cm³ and wood: cement ratio of 1:2.75. Main results: (I) Hydration tests showed that *E. saligna* wood is compatible with Portland cement type II; (II) Use of Calcium and magnesium chlorides at 3% in relation of the cement dry weight improve physical and mechanical properties of wood-cement composites produced by studied methods; (III) Composites produced by vibro-compaction densification presented lower density, higher dimensional stability and higher internal bond than composites produced by the traditional cold press method.

Keywords: Cement-wood composites; vibro-compaction; chemical accelerators.

INTRODUÇÃO

Os painéis de cimento-madeira são um tipo de compósito que combina partículas de madeira com um aglutinante de origem mineral. De acordo com Latorraca e Iwakiri (2001), esses painéis possuem boa aceitação e grande aplicabilidade na construção civil, principalmente nos países da Europa e da Ásia. O interesse por esse material deve-se principalmente às suas propriedades como isolantes térmicos, virtualmente incombustíveis, à resistência ao ataque de agentes biodegradadores, à alta estabilidade

dimensional e à fácil trabalhabilidade. Contudo, uma das principais dificuldades na produção desse tipo de painel é a seletividade das espécies de madeira utilizadas na mistura. Componentes orgânicos presentes em certas espécies podem afetar o processo de cura do cimento e resultar em painéis de qualidade inferior (MOSLEMI; PFISTER, 1987).

Uma solução para minimizar o problema de incompatibilidade é o uso de substâncias químicas que aceleram a hidratação do cimento. O uso do cloreto de cálcio (CaCl_2) é o mais divulgado, por sua ampla disponibilidade no mercado, o baixo custo e resultados comprovados por décadas de uso e estudo. O cloreto de cálcio é tido como único, porque o Ca^{2+} é considerado o cátion mais eficiente na aceleração da cura do cimento, e há evidências que indicam que, para o cimento tipo Portland, o ânion Cl^- tende a ser mais eficiente do que SO_4^{2-} e OH^- . O CaCl_2 não só altera a taxa de hidratação dos minerais do cimento como também reage com eles, influenciando as propriedades de resistência, composição química, área superficial, morfologia e porosidade dos produtos da hidratação (RAMACHANDRAN, 1995).

Wei *et al.* (2000) analisaram o efeito de 30 diferentes aditivos químicos na cura do cimento Portland quando misturados com partículas da madeira de *Betula albosinensis* Burkill. Quando se adiciona madeira ao cimento, nota-se uma redução da temperatura máxima de 60,3° para 40,8 °C na reação exotérmica do estágio inicial da cura do cimento. O tempo para atingir essa temperatura máxima também é alterado, sendo que o cimento puro atinge seu pico de temperatura em 9 horas, enquanto que, ao se misturar madeira, esse tempo passa a ser de 10,2 horas. Dos 30 aditivos testados, o aditivo que se mostrou mais eficiente foi o CaCl_2 . Ao se adicionar 4% de cloreto de cálcio, com base na massa seca do cimento, a reação atingiu a temperatura máxima de 54,3 °C em 8,7 horas.

Contudo, apenas o efeito acelerador do aditivo pode não ser suficiente para sobrepor o efeito inibidor que extrativos da madeira podem causar na cura do cimento. Semple e Evans (2002) estudaram o efeito de diversos aditivos no combate do efeito inibidor dos taninos polifenólicos presentes no cerne da madeira *Acacia mangium* (Willd.) Pedley. O uso do cloreto de cálcio foi considerado um bom aditivo, mas não tão eficiente quanto os cloretos de Sn^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Ni^{2+} e Sr^{2+} .

Atualmente, a produção comercial de painéis cimento-madeira é limitada pelo alto custo inicial de implementação de uma fábrica. Como alternativa para esse problema, Parchen (2012) desenvolveu o adensamento de painéis cimento-madeira por vibrocompactação, um novo método de produção que dispensa o uso das prensas de prato. O processo é uma adaptação do utilizado tradicionalmente para a produção de blocos de concreto e envolve o uso de mesas vibratórias de baixo custo e fácil operação. Em estágios iniciais de desenvolvimento, o método mostrou-se viável para a produção de painéis cimento-madeira de baixa densidade, embora tenham apresentado valores médios para propriedades físicas e mecânicas inferiores às dos painéis produzidos pelo método da prensa de pratos.

O mercado de painéis de madeira industrializada é um setor em expansão no Brasil. Entre os anos de 2002 e 2012, a produção anual de painéis cresceu de 3,1 milhões de toneladas para 7,3 milhões, sendo que esse setor é responsável pelo consumo de 7,3% da produção de *Eucalyptus* do país (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF), 2013). De acordo com Lopes *et al.* (2005), o gênero *Eucalyptus* é promissor em termos de utilização comercial na produção de painéis cimento-madeira, justificando assim pesquisas em nível laboratorial sobre a compatibilidade de suas diversas espécies.

O objetivo deste trabalho foi analisar o efeito de diferentes tipos de aditivos químicos nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimento-madeira produzidos pelo método de adensamento por vibrocompactação, comparando-os com os produzidos pelo método tradicional de prensa de pratos.

MATERIAL E MÉTODOS

Material de estudo

A espécie utilizada no presente estudo foi um clone do *Eucalyptus saligna* proveniente de um plantio florestal da empresa Gestão de Empreendimentos Florestais (GRANFLOR), localizada na cidade de Rosário do Sul, no estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizadas uma tora por árvore, retirada a 50% da altura total, com idade média de 40 meses e com uma massa específica básica média de 0,47 g/cm³.

Teste de hidratação

Foram misturadas 90,5 ml de água destilada com 200 gramas de cimento e 15 gramas de madeira. A quantidade de água foi baseada na metodologia de Weatherwax e Tarkow (1964), que

sugerem o uso de 2,7 ml de água por grama de madeira e um adicional de 0,25 ml de água por grama de cimento.

A mistura foi inserida em sacos de polietileno e em seguida colocada em um recipiente isolado termicamente e hermeticamente fechado. Para a leitura das temperaturas, termopares tipo J foram conectados a um módulo condicionador de sinais analógicos acoplado a uma placa de conversão analógico-digital. Leituras de temperatura foram realizadas a cada minuto durante 24 horas. Com base nos parâmetros obtidos, foram calculados o grau de inibição da cura do cimento induzida pela madeira por meio dos dois métodos mais empregados:

- Fator- C_A - Método sugerido por Hachmi e Moslemi (1989). Expressa a razão entre a área do gráfico temperatura/tempo da reação com mistura de madeira e a área do gráfico da reação do cimento com água, sem adição de madeira. Para determinação desse fator, é considerado o tempo entre 3,5 h após a mistura e 24 h.
- Índice de Inibição (II) - Esse índice foi inicialmente sugerido por Hofstrand *et al.* (1984) e leva em consideração a temperatura máxima da reação, o tempo para se atingir essa temperatura e a taxa máxima de incremento de temperatura da reação. Com base nesses parâmetros, o índice é calculado pela fórmula:

$$I = 100[(t - t' / t') (T' - T / T') (S' - S / S')]$$

em que: I = índice de inibição da cura do cimento (%);

t = tempo necessário para atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento da mistura de cimento, água e madeira (h);

t' = tempo necessário para atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento da mistura de cimento e água (h);

T' = temperatura máxima atingida para mistura de cimento e água (°C);

T = temperatura máxima atingida para mistura de cimento, água e madeira (°C);

S' = $\Delta T' / \Delta t'$ = máximo incremento no período de 1 hora para mistura cimento e água;

S = $\Delta T / \Delta t$ = máximo incremento no período de 1 hora para mistura cimento, água e madeira.

Na tabela 1 são apresentados os valores de compatibilidade para os dois métodos avaliados na pesquisa.

Tabela 1. Classificação de compatibilidade entre madeira e cimento para os dois diferentes métodos de cálculo de inibição.

Table 1. Classification of compatibility between wood and cement for the two different methods of inhibition calculation.

	Fator- C_A ¹	II ²
Compatível	≥ 68	< 10
Aceitável	68 - 28	10 - 50
Incompatível	≤ 28	> 50

Fonte: ¹Hachmi e Moslemi (1989); ²Okino *et al.* (2005).

Preparação das partículas

As toras de *Eucalyptus saligna* foram seccionadas e mantidas submersas em água fria por um período de aproximadamente sete dias antes da geração de partículas. Elas foram produzidas através de picador de disco. Posteriormente foram secas naturalmente até atingirem um teor de umidade de aproximadamente 3% e então submetidas ao moinho de martelo.

Após a moagem, as partículas foram classificadas por peneiramento automático. Os painéis foram produzidos com as partículas retidas entre as peneiras de aberturas de 2,36 e 1,40 mm.

Manufatura dos painéis cimento-madeira

O plano experimental consistiu de dois métodos de formação de painéis madeira-cimento e do uso de dois aditivos químicos, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2. Plano experimental.

Table 2. Experimental plan.

Tratamento	Método	Aditivo
T1	Prensa de prato	-
T2	Prensa de prato	CaCl ₂
T3	Prensa de prato	MgCl ₂
T4	Vibrocompactação	-
T5	Vibrocompactação	CaCl ₂
T6	Vibrocompactação	MgCl ₂

O cimento utilizado neste experimento foi o Portland tipo CP II-Z. A mistura de cimento:madeira seguiu a relação 2,75:1 (baseado na massa seca das partículas). A quantidade de material utilizada foi calculada considerando uma massa específica nominal de 1,0 g/cm³. Os aditivos químicos utilizados, cloreto de cálcio (CaCl₂) e cloreto de magnésio (MgCl₂), foram adicionados à mistura na quantidade de 3% em relação à massa seca do cimento.

Para o sistema de prensa de pratos, os componentes foram misturados para obtenção de uma massa homogênea. Em seguida, a massa correspondente a cada painel foi distribuída aleatoriamente em uma caixa formadora do colchão, com dimensões de 500 mm de largura e 500 mm de comprimento. O colchão foi então prensado a frio com pressão específica de 3,9 MPa, tendo sido sua espessura nominal estipulada em 15 mm por barras de ferro. Os painéis foram mantidos sob restrição no aparato por grampeamento num período de 24 horas, para o endurecimento. Após esse período, os grampos foram retirados e o painel foi acondicionado para o período de maturação final de 28 dias.

O sistema de adensamento por vibrocompactação seguiu as recomendações de Parchen (2012). As misturas dos tratamentos T4, T5 e T6 foram depositadas em moldes prismáticos de madeira compensada com 350 mm de comprimento, 70 mm de largura e 15 mm de espessura.

Os moldes preenchidos foram então submetidos por 30 segundos a mesa vibratória, com uma carga de impacto vertical equivalente a 220 N a 3.000 RPM. Com a vibração, ocorreu a sedimentação do material. O molde então foi novamente preenchido com mais mistura e novamente submetido à vibração. Esse processo foi repetido até todo o material preparado ser aplicado no molde, ou até não haver mais espaço no molde. As misturas foram mantidas dentro das formas por 7 dias. Após esse período, o molde foi desmontado e os corpos de prova mantidos em ar livre no período restante de 28 dias de cura.

A quantidade de água utilizada nas misturas foi adaptada da fórmula sugerida por Simatupang (1979) com o acréscimo de 15% de água com base na massa seca do cimento.

$$H_2O = (C \times 0,50) + (M \times (0,3 - TU\%))$$

em que: C = massa do cimento (g);

M = massa das partículas (g);

TU% = teor de umidade das partículas.

Essa adaptação fez-se necessária devido ao fato de que a metodologia do adensamento por vibrocompactação não envolve pressão, então a umidade presente nas partículas não é extraída fisicamente para ser utilizada como água de reação para a cura do cimento.

Propriedades físicas e mecânicas

Para determinação das propriedades físicas de absorção de água e inchamento em espessura, após 2 e 24 horas de imersão em água, seguiram-se recomendações da norma EN 317. As propriedades mecânicas de tração perpendicular e flexão estática (determinando-se o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura) foram subsidiadas nas normas EN 319 e EN 310, respectivamente.

Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com arranjo fatorial para os tratamentos visando avaliar a interação entre dois fatores, aditivo químico e método de produção. Para

verificar o efeito dos tratamentos sobre as propriedades dos compósitos cimento-madeira, foi realizada uma análise de variância e, na verificação da existência de diferenças estatísticas entre médias, foi aplicado o teste de Tukey, ao nível de probabilidade de 95%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teste de hidratação

Na figura 1 são apresentadas as curvas exotérmicas de hidratação inicial das misturas nas primeiras 24 horas. A curva de hidratação para a mistura de cimento com água foi comparada com as curvas das misturas de cimento com partículas de *Eucalyptus saligna* sem uso de aditivo, com adição de 3% de CaCl_2 e com adição de 3% de MgCl_2 .

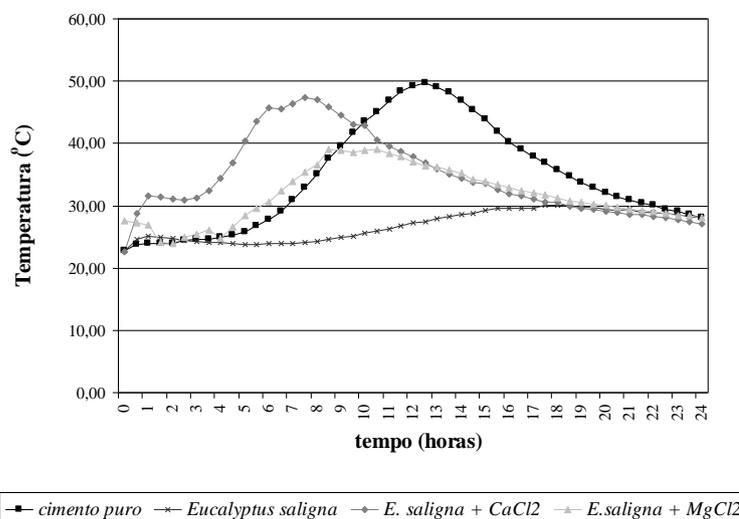


Figura 1. Curvas exotérmicas de hidratação do cimento puro, do cimento misturado com madeira de *E. saligna* e das misturas com adição de agentes aceleradores de cura.

Figure 1. The hydration exothermic curves for neat cement, cement mixed with *E. saligna* wood and mixtures with curing accelerators agents.

O cimento Portland tipo II atingiu sua temperatura máxima (50,94 °C) em um tempo de aproximadamente 12,78 horas. Com a adição de partículas de madeira de *Eucalyptus saligna*, ocorreu o efeito inibidor à cura, com um decréscimo da temperatura máxima (30,16 °C) atingida após 17 horas. Com base nesses valores, pode-se calcular a taxa de hidratação (R) como 0,44 °C/h. Esse valor está abaixo dos encontrados na literatura para outras espécies de *Eucalyptus*. Por exemplo, Semple *et al.* (2000) estudaram o efeito inibidor de 8 espécies de *Eucalyptus* à cura do cimento. Os autores indicaram o *E. macarthurii* Deane e Maiden e o *E. benthamii* Maiden et Cambage como os de pior compatibilidade, sendo que ambos apresentaram valores de R acima do encontrado para o *E. saligna* no presente estudo (R = 0,88 °C/h e 1,01 °C/h, respectivamente).

O efeito acelerador normalmente atribuído à adição dos cloretos foi confirmado em ambas as substâncias estudadas e mostrou-se benéfico para minimizar o efeito inibidor causado pela madeira. Com o uso de CaCl_2 , a mistura atingiu um pico de temperatura de 47,69 °C em apenas 6,83 horas, enquanto que o uso do MgCl_2 não foi tão eficiente quanto o do CaCl_2 , atingindo uma temperatura máxima inferior (39,45 °C) após 8,32 horas.

A figura 2 mostra o índice de inibição e o Fator- C_A . Os dois índices representam o quanto a madeira de *Eucalyptus saligna* inibe a hidratação inicial do cimento Portland e qual o efeito da adição dos cloretos de cálcio e de magnésio nessa inibição.

De acordo com os valores apresentados para ambos os índices de inibição (Fator- C_A e II), a madeira de *Eucalyptus saligna* é considerada compatível com o cimento Portland, ou seja, apta para a produção de painéis cimento-madeira, independentemente da adição de aceleradores de cura.

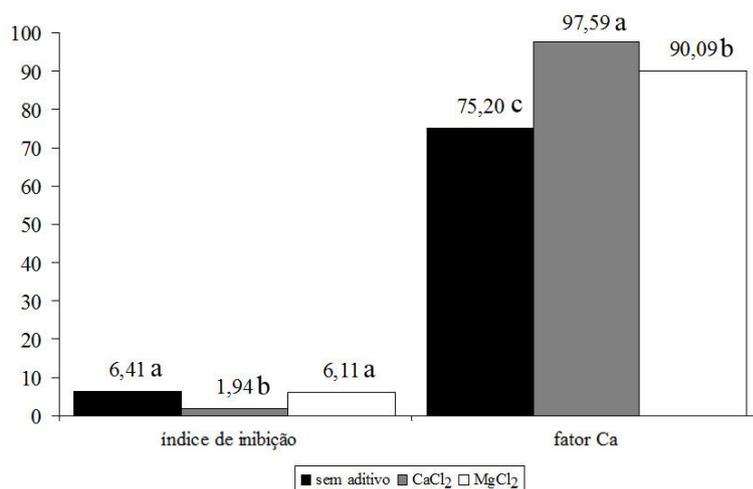


Figura 2. Índices de inibição de *Eucalyptus saligna* sobre a hidratação inicial do cimento Portland tipo II, com e sem a adição de CaCl₂ e MgCl₂.

Figure 2. Inhibition indexes of *Eucalyptus saligna* on the initial hydration of Portland type II cement, with and without the addition of CaCl₂ and MgCl₂.

O valor apresentado para o índice de inibição (6,41) foi inferior ao encontrado na literatura para as espécies de *Eucalyptus pellita* F. Muell. e *Corymbia citriodora* Hill & Johnson, porém levemente superior aos valores encontrados para o *E. urophylla* S.T. Blake. e *E. robusta* Sm. (LATORRACA, 2000).

O Fator-C_A do *E. saligna* (75,2%) também foi superior aos apresentados por Semple *et al.* (2002) para outras cinco espécies de eucaliptos (*E. angustissima* F. Muell. (59,9%), *E. horistes* L.A.S. Johnson e K.D. Hill. (70,8%), *E. loxophleba* Benth. (64,8%), *E. plenissima* (C. A. Gardner) Brooker (68,7%) e *E. polybractea* R.T. Baker (62,5%)), o que indica uma melhor compatibilidade entre o *E. saligna* e o cimento Portland. O Fator-C_A encontrado para o *E. saligna* também foi superior ao do *E. camaldulensis* Dehnh. (69%) e do *E. gomphocephala* DC. (54%) (HACHMI *et al.*, 1990).

Os valores médios dos índices de inibição da mistura com adição de 3% de CaCl₂ diferiram estatisticamente e superaram os valores médios obtidos com a adição de MgCl₂. A literatura indica que o cátion Mg²⁺ poderia reagir com extrativos polifenólicos da madeira e contribuir duplamente na obtenção de melhores índices de compatibilidade, agindo como acelerador da reação do cimento e bloqueando o efeito deletério dos extrativos (SEMPLÉ; EVANS, 2002). Isso não foi observado no caso do *E. saligna*, provavelmente porque a madeira apresentava uma boa compatibilidade com o cimento, mesmo sem o uso de aditivos. Uma vez que o CaCl₂ é um acelerador de cura melhor do que o MgCl₂, a reação no cimento foi suficiente para sobrepor a baixa inibição causada pelo *E. saligna*.

Propriedades físicas e mecânicas

Observa-se na tabela 3 uma análise de variância fatorial na qual os tratamentos apresentaram efeito significativo em todos os parâmetros físicos, o que indica que todos os parâmetros físicos foram significativamente influenciados pelos fatores A (aditivo) e B (método), fatores estes que também denotaram interação mútua significativa.

Na tabela 4 são apresentados os valores médios obtidos para as propriedades físicas dos painéis cimento-madeira produzidos com partículas de *E. saligna* e cimento Portland tipo II, com e sem adição de aceleradores de cura em razão do efeito dos tratamentos propostos.

Apenas os painéis produzidos pelo método da prensa de pratos e com adição de cloreto (T2 e T3) alcançaram a densidade nominal de 1,0 g/cm³, sendo que nos demais tratamentos os valores médios de densidade apresentaram-se abaixo do planejado. Para o caso do T1, a menor densidade pode ser justificada pela perda de material durante o processo de prensagem, devido à baixa ligação inicial entre cimento, madeira e água sem presença do acelerador. Para os corpos de prova produzidos pelo método de vibrocompactação, a densidade do material final é limitada pelo volume das partículas de madeira, ou

seja, pela baixa massa específica do *Eucalyptus*. Uma vez que não há pressão no processo de adensamento, os corpos de prova produzidos por esse método tendem a apresentar maior volume de espaços vazios.

Tabela 3. Análise de variância fatorial em razão das propriedades físicas dos painéis cimento-madeira.
Table 3. Factorial analysis of variance as a function of physical properties of wood-cement boards.

Variável	Fonte	SQ	GL	QM	F	P
Densidade (g/cm ³)	Fator A	0,07261	2	0,03630	17,60	0,000009*
	Fator B	0,51932	1	0,51932	251,81	0,000000*
	Interação AxB	0,02745	2	0,01372	6,65	0,004056*
	Resíduos	0,06187	30	0,00206		
AA 2h (%)	Fator A	1347,21	2	673,61	60,570	0,000000*
	Fator B	3052,35	1	3052,35	274,465	0,000000*
	Interação AxB	150,61	2	75,30	6,771	0,003742*
	Resíduos	333,63	30	11,12		
AA 24h (%)	Fator A	1930,88	2	965,44	76,801	0,000000*
	Fator B	2334,26	1	2334,26	185,691	0,000000*
	Interação AxB	105,81	2	52,91	4,209	0,024483*
	Resíduos	377,12	30	12,57		
IE 2h (%)	Fator A	6,11118	2	3,05559	10,3998	0,000371*
	Fator B	18,38741	1	18,38741	62,5821	0,000000*
	Interação AxB	3,95345	2	1,97673	6,7278	0,003856*
	Resíduos	8,81438	30	0,29381		
IE 24h (%)	Fator A	10,18181	2	5,09090	19,3044	0,000004*
	Fator B	30,61285	1	30,61285	116,0824	0,000000*
	Interação AxB	7,66128	2	3,83064	14,5256	0,000039*
	Resíduos	7,91150	30	0,26372		

Fator A - aditivo; Fator B - método; *: Significativo ao nível de 95% de probabilidade.

Tabela 4. Propriedades físicas dos painéis cimento-madeira produzidos com e sem adição de aceleradores de cura do cimento (CaCl₂ e MgCl₂).

Table 4. Physical properties of wood-cement boards made with and without addition of cement cure accelerators (CaCl₂, MgCl₂).

Tratamento	Densidade (g/cm ³)	AA 2h (%)	AA 24h (%)	IE 2h (%)	IE 24h (%)
T1	0,89 b	38,43 c	45,46 b	2,83 a	3,76 a
	(8,14)	(11,90)	(11,30)	(30,46)	(26,85)
T2	1,06 a	21,89 d	29,11c	1,08 b	1,47 b
	(3,85)	(8,11)	(7,87)	(38,70)	(50,52)
T3	1,01 a	27,14 d	32,66 c	1,56 bc	1,90 bc
	(5,28)	(12,69)	(12,01)	(52,17)	(12,64)
T4	0,72 c	55,59 a	62,83 a	0,54 c	0,65 cd
	(3,91)	(4,55)	(5,42)	(53,40)	(40,71)
T5	0,77 c	41,29 bc	44,07 b	0,26 c	0,40 d
	(3,51)	(9,64)	(7,53)	(67,55)	(53,09)
T6	0,75 c	45,82 b	48,62 b	0,39 c	0,55 d
	(4,24)	(5,81)	(4,95)	(65,96)	(74,29)

AA: absorção de água após 2 ou 24 horas; IE: inchamento em espessura após 2 e 24 horas. Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

O uso dos dois tipos de cloreto reduziu o valor de absorção de água tanto após 2 quanto 24 horas de imersão do material em água nas duas metodologias de manufatura. Como pode ser observado na figura 3, o comportamento da absorção entre os painéis prensados e os vibrados com e sem adição de cloreto foi semelhante, porém os painéis prensados absorveram menor volume de água do que os vibrados, devido à menor quantidade de espaços vazios no interior dos corpos de prova.

Os valores médios de absorção de água obtidos para o tratamento T3 foram semelhantes aos valores médios obtidos em painéis produzidos com a mesma metodologia, apresentados na literatura.

Simple e Evans (2004) obtiveram valores entre 26,1% e 31% para painéis produzidos com *E. horistes*, *E. kochii* Maiden e Blakely, *E. polybractea*, *E. loxopleba* e *E. angustissima*. Latorraca (2000) obteve valores médios de absorção de água dentro da faixa de 15,69 e 22,22% para painéis cimento-madeira produzidos com partículas de *E. pellita*, *E. robusta*, *E. urophylla* e *E. citriodora* e adição de cloreto de cálcio. Iwakiri e Prata (2008) obtiveram valores de 15,15% e 14,27% para painéis de *E. grandis* W. Hill ex Maiden e *E. dunnii* Maiden, respectivamente.

Em relação ao inchamento em espessura, não houve diferença estatística entre as médias obtidas após 2 horas, porém após 24 horas pode-se observar que o uso de cloreto, tanto de cálcio quanto de magnésio, aumentou a estabilidade dos corpos de prova para os dois métodos. Painéis produzidos pelo método da prensa de pratos incharam mais do que os adensados por vibrocompactação. Isso ocorreu porque a madeira é prensada na manufatura do painel e, quando em contato com a água, tende a voltar ao seu estado natural, pela liberação de tensões de prensagem. No processo de vibrocompactação, as partículas de madeira são distribuídas no espaço da forma sem sofrer deformação física, o que leva a uma maior estabilidade dimensional.

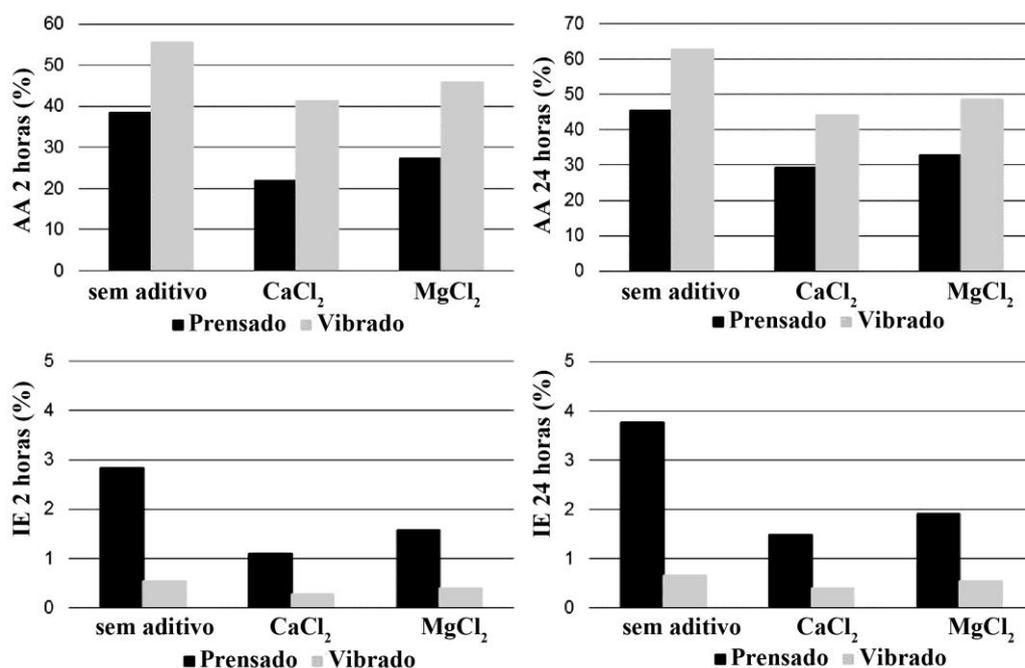


Figura 3. Propriedades físicas dos compósitos produzidos pelo método de prensa de pratos em comparação com os produzidos pelo método de vibrocompactação.

Figure 3. Physical properties of composites produced by cold press methods compared to produced by vibrocompaction method.

Os valores médios obtidos para inchamento em espessura dos painéis prensados com adição de CaCl₂ (T3) foram inferiores aos encontrados na literatura para painéis cimento-madeira produzidos com madeira de outras espécies de *Eucalyptus*, com o mesmo método e o uso da mesma quantidade desse acelerador. Latorraca (2000) obteve valores entre 1,64 e 2,12% de inchamento em espessura após 24 horas ao usar madeira de quatro espécies de *Eucalyptus*. Lopes *et al.* (2005) encontraram o valor de 1,14% e 1,71% após 2 e 24 horas, respectivamente, para painéis produzidos com *E. grandis*. Também é importante ressaltar que o valor referencial máximo de inchamento em espessura indicado pelo processo Bison para painéis cimento-madeira comerciais é de 1,8% (BISON, 1978). Em todos os tratamentos em que se utilizou o processo de vibrocompactação, os painéis atenderam a esse requisito.

Verifica-se na tabela 5 a análise de variância fatorial para as propriedades mecânicas dos painéis cimento-madeira. Observa-se que, para todas propriedades, o efeito dos tratamentos foi significativo, sendo influenciado pelos fatores A (aditivo) e B (método).

Tabela 5. Análise de variância fatorial em razão das propriedades mecânicas dos painéis cimento-madeira.

Table 5. Factorial analysis of variance as a function of mechanical properties of wood-cement boards.

Variável	Fonte	SQ	GL	QM	F	P
TP (MPa)	Fator A	1,428268	2	0,714134	113,7375	0,000000*
	Fator B	0,575757	1	0,575757	91,6987	0,000000*
	Interação AxB	0,173836	2	0,086918	13,8431	0,000055*
	Resíduos	0,188364	30	0,006279		
MOR (MPa)	Fator A	39,3150	2	19,6575	61,9853	0,000000*
	Fator B	27,8923	1	27,8923	87,9518	0,000000*
	Interação AxB	4,9567	2	2,4784	7,8150	0,001302*
	Resíduos	13,3195	42	0,3171		
MOE (MPa)	Fator A	8214482	2	4107241	32,9104	0,000000*
	Fator B	11226252	1	11226252	89,9535	0,000000*
	Interação AxB	1282526	2	641263	5,1383	0,011051*
	Resíduos	4368023	35	124801		

Fator A - aditivo; Fator B - método; *: significativo ao nível de 95% de probabilidade; ns: não significativo ao nível de 95% de probabilidade.

Na tabela 6 são apresentados os valores médios de propriedades mecânicas dos painéis em razão do efeito dos diferentes tratamentos.

Tabela 6. Propriedades mecânicas dos painéis cimento-madeira.

Table 6. Mechanical properties of the wood-cement boards.

Espécie	TP (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
T1	0,09 e (33,86)	1,16 bc (65,33)	816 bc (54,25)
T2	0,42 c (19,33)	4,02 a (22,23)	2.522 a (17,86)
T3	0,24 d (28,81)	3,22 a (15,22)	2.063 a (21,32)
T4	0,15 de (27,14)	0,36 c (35,77)	200 c (7,75)
T5	0,78 a (16,79)	1,74 b (20,28)	913 bc (21,21)
T6	0,59 b (13,52)	1,69 bc (23,11)	936 b (23,90)

TP: tração perpendicular; MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidade. Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação (%).

Corpos de prova produzidos pelo método de adensamento por vibrocompactação apresentaram melhores resultados para a propriedade de tração perpendicular do que os painéis prensados quando há adição de cloreto. A adição de cloreto de cálcio para ambos os processos promoveu a obtenção de valores médios de tração perpendicular superiores aos estipulados como requisito mínimo pelo processo Bison (BISON, 1978) de 0,39 Mpa, sendo que, para manufatura por vibração, a adição de cloreto de magnésio também atingiu o requisito mínimo.

A tração perpendicular mais eficiente do processo de vibrocompactação provavelmente deve-se ao acomodamento das partículas de madeira durante a manufatura, criando conexões físicas, além da aderência do cimento. No processo de prensa de pratos, as partículas são compactadas e o principal componente da tração perpendicular passa a ser somente o adesivo mineral.

Os maiores valores médios, tanto do MOR quanto do MOE, apresentados na tabela 6, ocorreram para os tratamentos prensados com uso de aceleradores, independentemente do tipo de cloreto. Os valores encontrados foram superiores aos que Semple e Evans (2004) encontraram para painéis de cinco espécies

de *Eucalyptus* australianos, que variaram entre 0,93 e 1,66 MPa para MOR e 455,3 e 870,6 MPa para MOE. O valor médio do T2 também foi superior ao encontrado para painéis produzidos com *E. dunnii* com adição de CaCl_2 (MOR de 3,92 MPa e MOE de 980 MPa) por Iwakiri e Prata (2008). Contudo, os valores médios obtidos não atingiram os requisitos mínimos de 9 MPa e 3.000 MPa exigidos para MOR e MOE de painéis cimento-madeira comerciais, respectivamente (BISON, 1978).

A relação entre o processo de manufatura prensada e vibrada é destacada na figura 4. Porém é válido ressaltar que os corpos de prova manufaturados pelo processo de vibração apresentam a vantagem de produção de painéis mais leves, o que facilita o transporte e o manuseio. Além disso, essa metodologia dispensa o uso de uma prensa industrial, o que a torna economicamente viável para uso em cooperativas e produções populares.

Nesses casos, o uso de aceleradores mostrou-se eficiente para melhoria das propriedades mecânicas, apresentando valores médios superiores aos de painéis prensados sem adição de cloreto (T1).

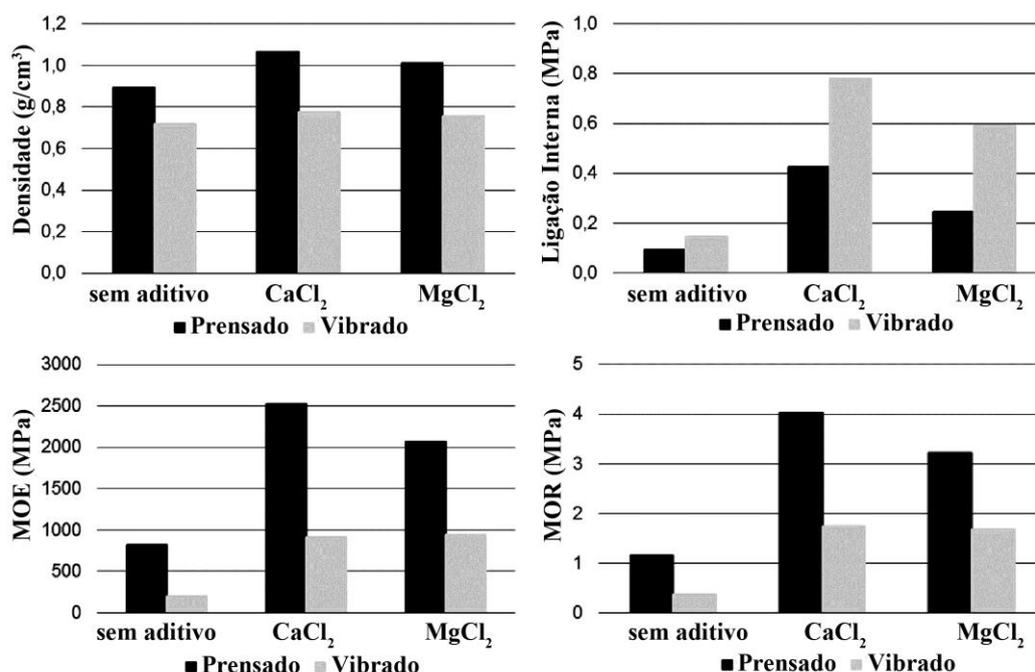


Figura 4. Densidade e propriedades mecânicas dos corpos de prova de painéis prensados comparados com os de compósitos vibrocompactados.

Figure 4. Density and mechanical properties the specimens of pressed boards compared with vibrocompacted composites.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- Testes de hidratação demonstraram que a madeira de *Eucalyptus saligna* é compatível com o cimento Portland tipo II, sendo viável para a produção de painéis cimento-madeira.
- O uso de aditivos químicos como cloreto de cálcio e de magnésio na proporção de 3% em relação à massa do cimento proporcionou incremento nos valores médios obtidos nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis de *E. saligna* e cimento.
- Painéis produzidos pelo método de adensamento por vibrocompactação apresentaram menor densidade, maior estabilidade dimensional e melhor tração perpendicular em comparação aos painéis produzidos pelo método tradicional de prensa de pratos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília: ABRAF, 2013. 148 p.

BISON. **Wood-cement board**. New York: Springer, 1978. 10 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - CEN. **EN 310**. Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - CEN. **EN 317**. Particleboards and fiberboards - Determination of swelling in thickness after immersion in water. 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - CEN. **EN 319**. Aglomerado de partículas de madeira e aglomerado de fibras de madeira - Determinação da força da tensão perpendicular sobre a superfície plana da placa. 1993.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. **Forest Products Journal**. Madison, v. 39, n. 6, p. 55 - 58, 1989.

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

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA J. F. Curing characteristics of wood particle from nine northern Rocky Mountain species mixed with Portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57 - 61, 1984.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* na produção de painéis de cimento-madeira. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 68 - 74, 2008.

LATORRACA, J. V. F. ***Eucalyptus* spp. na produção de painéis de cimento-madeira**. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

LATORRACA, J. V. F.; IWAKIRI, S. Efeito da cura a vapor sobre as propriedades mecânicas de painéis de cimento-madeira. **Floresta e ambiente**, Seropédica, v. 8, n. 1, p. 84 - 93, 2001.

LOPES, Y. L. V.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; LATORRACA, J. V. F.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, G. C. Avaliação do potencial técnico da madeira e cascas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 67, p. 111 - 122, 2005.

MOSLEMI, A. A.; PFISTER S. C. The influence of cement/wood ratio and type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 19, n. 2, p. 165 - 175, 1987.

OKINO, E. Y. A.; SOUZA, M. R.; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. S.; SOUZA; M. E.; TEIXEIRA, D. E. Physico-mechanical properties and decay resistance of *Cupressus* spp. cement-bonded particleboards. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, p. 333 - 338, 2005.

PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira-cimento de baixa densidade produzido com compactação vibro dinâmica**. 172 f. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

RAMACHANDRAN, V. S. Accelerators. In: RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete admixtures handbook: properties, science and technology**. New Jersey, 1995. p. 185 - 285.

SEMPLE, K. E.; CUNNINGHAM, R. B.; EVANS, P. D. Compatibility of 8 temperate Australian *Eucalyptus* species with Portland cement. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlim, v. 58, p. 315 - 316, 2000.

SEMPLE, K. E.; CUNNINGHAM, R. B.; EVANS, P. D. The suitability of five Western Australian mallee eucalypt species for wood-cement composites. **Industrial crops and products**, Philadelphia, v. 16, p. 89 - 100, 2002.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. Screening inorganic additives for ameliorating the inhibition of hydration of Portland cement by the heartwood of *Acacia mangium*. In: EVANS, P. D. **Wood-cement composites in the Asia-Pacific region**. Cambera, 2002. p. 29 - 39.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. **Wood-cement composites - suitability of western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas**. Barton: RIRDC, 2004. 65 p.

SIMATUPANG, M. H. Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebunder Holzspanplatten. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Göttingen, v. 27. p. 379 - 382, 1979.

WEI, Y. M.; ZHOU, Y. G.; TOMITA, B. Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood-cement composites. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 46. p. 444 - 451, 2000.