

Efeito das dimensões de partículas de madeira e velocidade de vibração na resistência mecânica de compósitos cimento-madeira moldados com compactação vibro dinâmica

Effect of wood particle size and vibrating speed on mechanical strength of wood cement composite molded with vibro-dynamic compression

Barbara Talamini Villas-Bôas¹, Setsuo Iwakiri²,
Carlos Frederico Alice Parchen¹ e José Guilherme Prata³

Resumo

Tendo em vista a importância do desenvolvimento de novos produtos e processos para o setor de construção civil, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da interação entre as dimensões das partículas de madeira de *Pinus* spp e a velocidade da mesa vibratória na resistência mecânica do compósito cimento-madeira. Corpos de prova de formato cilíndricos para avaliação da resistência a compressão axial foram confeccionados com cinco diferentes dimensões de partículas e duas velocidades de moldagem (220 N/3.000 rpm e 440 N/3.600 rpm), por processo de vibro-compactação. Os ensaios de compressão axial dos corpos de prova confeccionados com as partículas menores, passantes na peneira de #4,75 mm e retidas na de #2,36 mm, foram mais resistentes em comparação às partículas com maiores dimensões. Quanto à velocidade da mesa vibratória, os compósitos de cimento-madeira produzidos com velocidade de 220 N a 3.000 rpm, foram mais resistentes à compressão axial em relação aos compósitos produzidos com velocidade de 440 N a 3.600 rpm. Portanto, pode-se concluir que as dimensões das partículas e a velocidade de vibração afetam a resistência dos compósitos cimento-madeira moldados pelo processo vibro dinâmico.

Palavras-chave: aglutinante mineral, construção civil, moldagem do compósito.

Abstract

Due to the importance of the development of new products and processes for the civil construction sector, this study aimed to evaluate the effect of the interaction between the dimensions of the wood particles of *Pinus* spp and the speed of the vibrating table in the strength of the wood cement composite. Cylindrical test specimens for evaluation of axial compression strength were made with five different particle sizes and two molding speeds (220 N / 3,000 rpm and 440 N / 3,600 rpm), by vibration-compression process. The axial compression tests of the specimens made with the smaller particles passing through the # 4.75 mm sieve and retained in the # 2.36 mm sieve were more resistant compared to the larger particles. As for the velocity of the vibrating table, wood/cement composites produced at a speed of 220 N at 3,000 rpm were more resistant to axial compression than composites produced at a speed of 440 N at 3,600 rpm. Therefore, it can be concluded that particle size and vibration velocity affect the strength of the cement-wood composites molded by the vibration-dynamic process.

Keywords: mineral binder, civil construction, composite molding.

INTRODUÇÃO

O compósito cimento-madeira pode ser definido como um material composto por dois ou mais constituintes, que possui uma fase reforçada, em que as partículas de madeira estão envolvidas por uma fase ligante, o cimento. A água é um componente essencial para a mistura e ligação destas fases na formação do compósito. Na fase ligante, o cimento transmite o esforço entre as partículas de madeira, mantendo-as protegidas do meio e permitindo sua orientação apropriada. Por sua vez, a madeira, além de aumentar a resistência à tração, contribui para redução da densidade e do custo.

¹Professor(a) Adjunto(a) do Departamento de Construção Civil. UFPR – Universidade Federal Paraná. Av. Lothário Meissner, 3400 - Jardim Botânico - 80210170 - Curitiba, PR, Brasil. E-mail: barbaratvb@gmail.com; parchen.ufpr@gmail.com.

²Professor titular do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. UFPR – Universidade Federal Paraná. Av. Lothário Meissner, 3400 - Jardim Botânico - 80210170 - Curitiba, PR, Brasil. E-mail: setsuo.ufpr@gmail.com.

³Professor Adjunto do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. UFPR – Universidade Federal Paraná. Av. Lothário Meissner, 3400 - Jardim Botânico - 80210170 - Curitiba, PR, Brasil. E-mail: jgprata@ufpr.br.

Os Compósitos cimento-madeira produzidos pelos métodos convencionais por meio da formação e prensagem em prensas planas, já apresenta metodologia consagrada como elemento pré-fabricado para uso na indústria da construção civil em países como Alemanha, Japão e também no Leste Europeu. Na Rússia, por exemplo, houve aumento significativo da sua produção na década de 1990, enquanto que na América do Norte, mais especificamente no Canadá, sua produção visa atender as demandas para exportações aos países da Ásia (PARCHEN, 2014).

Pesquisas têm sido realizadas no setor de compósitos cimento-madeira, com enfoque nas variáveis de processamento que influenciam as propriedades finais do produto, como a flexão estática, compressão axial e tração perpendicular. Dentre as variáveis em referência, estudos apontam que a geometria de partículas está altamente relacionada com as propriedades dos compósitos de cimento-madeira, tais como o módulo de ruptura e de elasticidade em flexão estática, resistência à compressão axial e estabilidade dimensional. Nesse sentido, Parchen (2012) destacou a influência das dimensões das partículas nas propriedades físico-mecânicas desses compósitos. Yamada (2002) ressalta também que os parâmetros relacionados à geometria de partículas e a sua distribuição na matriz cimentícia desempenham um papel importante nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.

Badejo (1988) constatou que os compósitos produzidos com partículas de elevado índice de esbelte apresentaram melhor estabilidade dimensional. Semple e Evans (2004) também concluíram isso e recomendaram que partículas de maior comprimento devem ser utilizadas quando se objetiva a produção de painéis de maior resistência mecânica. Barnes (2001) afirma que as partículas de madeira devem ter comprimentos maiores para possibilitar a sobreposição, de maneira que a tensão aplicada sobre uma partícula possa ser transferida para a outra adjacente. Da mesma forma, Ma et al. (2000) verificaram que painéis utilizando partículas menores tendem a apresentar valores mais elevados de módulo de elasticidade à flexão estática, em comparação aos painéis produzidos com partículas maiores.

Cabangon et al. (2002) mostraram que é possível obter alta resistência à flexão estática mesmo em compósitos de baixa densidade, por meio da orientação de partículas. Semple e Evans (2004) encontraram maior resistência à flexão estática em painéis com a utilização de partículas com comprimentos entre 50 a 100 mm. Nazerian et al. (2011) observaram em compósitos produzidos com partículas classificadas em peneiras com malhas de 5 mm, maior resistência à flexão estática quando comparados aos compósitos produzidos com partículas classificadas em peneiras com malhas de 2mm. No entanto, utilizando partículas classificadas com malhas de 7mm, os resultados obtidos foram inferiores aos obtidos para 5mm.

O processo de vibro-compactação na produção de compósitos cimento-madeira traz vantagens como proporcionar compactação e aglutinação entre as partículas dos compósitos sem a necessidade de prensagem e grampeamento (PARCHEN, 2012). Segundo Sousa (2001), a vibração ajuda no preenchimento e adensamento na formação dos compósitos cimento-madeira. A frequência, amplitude, velocidade, aceleração e tempo de adensamento são os principais parâmetros dos mecanismos de vibração e são responsáveis por conferir aos compósitos as suas características finais.

Na fabricação de painéis com baixa densidade, utilizando resíduos de madeiras da construção civil, Wolfe e Gjinolli (1997) constataram que a compactação feita por meio de vibrações de baixa frequência proporcionou distribuição mais uniforme das partículas dentro dos compósitos.

Stahl et al. (2002), simulando o processo industrial de produção de blocos a partir de quatro formas cilíndricas fixadas a um vibrador, observaram resultados variáveis das propriedades dos compósitos. Apesar dos esforços para manter um processo homogêneo, os autores atribuíram essas diferenças à vibração mais forte ocorrida nos cilindros fixados mais próximos do vibrador.

Tendo em vista a importância de desenvolvimento de novos produtos e processos para o setor de construção civil, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência das dimensões das partículas de madeira e da velocidade da mesa vibratória nas propriedades físicas e mecânicas do compósito de cimento-madeira, produzido pelo processo de vibro-compactação.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados neste estudo, cavacos de madeiras *Pinus* sp. comercializados como biomassa, obtidos a partir de troncos e galhos sem remoção da casca, de árvores provenientes de plantios flo-

restais com oito anos de idade. O material foi processado em picador industrial de uma empresa madeireira localizada no município de Tunas do Paraná, estado do Paraná.

Para a produção dos compósitos cimento-madeira, na forma de corpos de prova cilíndricos, utilizou-se o aglomerante hidráulico cimento Portland tipo CP II-Z, disponível no mercado de materiais para a construção civil. Foi também utilizada como aglomerante, a cal aérea ou CaO (óxido de cálcio), conhecida no mercado como cal virgem. O óxido de cálcio foi hidratado, resultando dessa reação uma suspensão de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Os cavacos foram secos ao teor de umidade médio de 3%, base seca, e processados em moinho de martelos para a redução de suas dimensões. No processo de moagem, utilizou-se uma peneira de 1" (25,4 mm) na saída da ação de moagem, limitando, assim, o tamanho máximo dos cavacos produzidos. Parte deles foi separada e novamente moída, mas com uma peneira de $\frac{3}{4}$ " (19,0 mm) na saída da ação de moagem. Os materiais obtidos da primeira e segunda moagem no moinho foram separados e classificados como T1 e T2, respectivamente. As partículas da segunda moagem foram classificadas em peneiras com malhas de 2,36 mm, 4,75 mm e 6,30 mm, conforme ilustradas na Figura 1.



T1 – material moído uma vez; T2 – material moído duas vezes; # 2,36 – material retido na peneira de 2,36 mm; # 4,75 - material retido na peneira de 4,75 mm; # 6,30 - material retido na peneira de 6,30 mm.

Figura 1. Dimensões das partículas utilizadas na pesquisa.

Figure 1. Dimensions of particles used in the research.

Para a determinação da geometria das partículas retidas nas peneiras #2,36, #4,75 e #6,3, foram medidos o comprimento, a largura e a espessura de 100 partículas retidas em cada uma dessas peneiras, com o auxílio de um paquímetro digital. Com os resultados dessas medições foram calcu-

lados o índice de esbeltez - IE (relação entre comprimento e espessura das partículas) e a razão de planicidade - RP (relação entre largura e espessura). A área superficial das partículas foi calculada pela equação sugerida por Moslemi (1974), conforme segue:

$$a' = \frac{2 \times [(e \cdot c) + (l \cdot c) + (e \cdot l)]}{c \cdot l \cdot e \cdot d} \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

Em que:

- a': área superficial (cm²/g);
- e: espessura da partícula (cm);
- l: largura da partícula (cm);
- c: comprimento da partícula (cm);
- d: densidade da madeira (g.cm⁻³).

Para a confecção dos corpos de prova cilíndricos foram utilizadas duas mesas vibratórias, ambas acionadas por um moto-vibrador elétrico trifásico.

A primeira, desenvolvida por Parchen (2012), com energia de vibração de 220 N a 3.000 rpm, com o motor acoplado a uma placa de compensado flexível. A segunda, foi desenvolvida nesta pesquisa, mas com o diferencial de possuir energia de vibração de 440 N a 3.600 rpm e com motor acoplado a uma placa de MDF (Figura 2). Ambas as mesas foram apoiadas sobre uma base amortecedora de impactos feita de espuma de poliuretano no momento das operações.

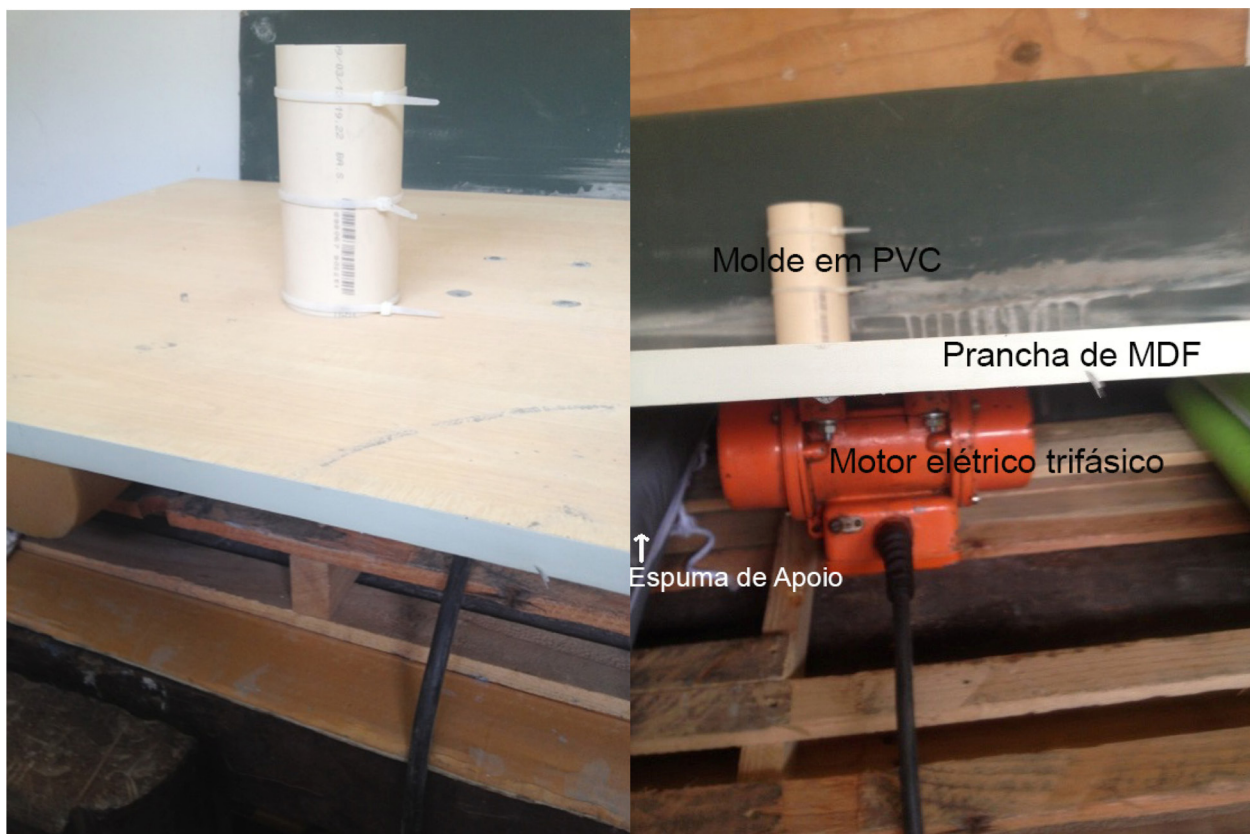


Figura 2. Mesa vibratória para moldagem dos compósitos.
Figure 2. Vibrating table for molding of the composite.

Para a confecção dos corpos de prova cilíndricos, utilizados nos testes de resistência à compressão axial, foram fabricados moldes cilíndricos em tubos de PVC com dimensões de 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura, possuindo um volume interno líquido de 538,8 cm³ (Figura 3).

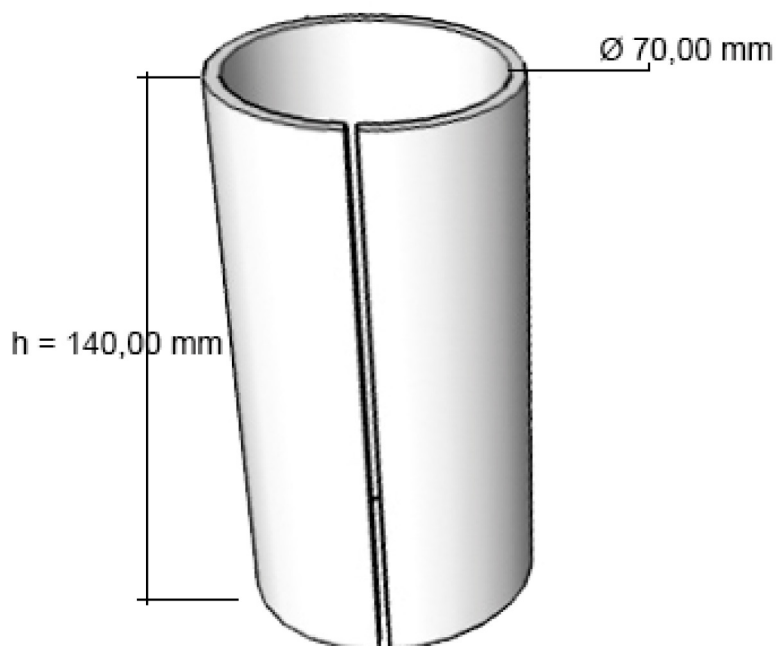


Figura 3. Molde para confecção de corpos de prova cilíndricos.
Figure 3. Mold for making cylindrical specimens.

Para a moldagem dos corpos de prova, foi preparada, inicialmente, uma suspensão de Ca(OH)_2 , na proporção água:massa de CaO de 6,25:1,00. A relação madeira:cimento usada foi de 1,00:1,30 e foi também feita adição de água de 30% em relação ao peso do cimento. A quantidade de materiais para cada corpo de prova cilíndrico está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Quantidade de materiais para confecção de corpos de prova.
Table 1. Amount of materials used for specimens.

Material	Quantidade
Cimento	1.612 g
Resíduo de Pinus	1.240 g
Suspensão de Ca(OH)_2	1.240 g
Água	483,6 g

O plano experimental consistiu em dez tratamentos, com 14 corpos de prova cada, totalizando 140 corpos de prova cilíndricos, dos quais 70 sofreram vibração de 220 N e, a outra metade, de 440 N, conforme o delineamento experimental apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Delineamento experimental.
Table 2. Experimental chart.

Tratamento	Nomenclatura	Dimensões das Partículas	Vibração
T11	#2,36	Passante na #4,75 e retidas na #2,36	220 N
T12	#4,75	Passante na #6,3 e retidas na #4,75	
T13	#6,3	Passante na #9,5 e retidas na #6,3	
T14	T1	Partículas moídas (1x)	440 N
T15	T2	Partículas moídas (2x)	
T21	#2,36	Passante na #4,75 e retidas na #2,36	
T22	#4,75	Passante na #6,3 e retidas na #4,75	440 N
T23	#6,3	Passante na #9,5 e retidas na #6,3	
T24	T1	Partículas moídas (1x)	
T25	T2	Partículas moídas (2x)	

As partículas foram inicialmente colocadas num recipiente de PEAD (polietileno de alta densidade) e misturadas manualmente com uma suspensão de Ca(OH)_2 previamente preparada. Após 15 minutos de mistura, foram adicionados cimento e água na quantidade indicada na Tabela 1. Após todos os materiais serem misturados até a completa homogeneização, a mistura resultante foi moldada nos corpos de prova com o auxílio das mesas vibratórias. Os cinco primeiros tratamentos foram realizados em mesa com energia dinâmica de 220 N, ocorrendo o adensamento por compactação vibro dinâmica; os tratamentos restantes foram realizados em mesa com energia dinâmica de 440 N.

Para melhor adensamento do material no cilindro para confecção de corpos de prova, o preenchimento foi realizado em três etapas com a mesa vibratória ligada por 30 segundos em cada uma das etapas. Após o total preenchimento dos moldes, eles foram cobertos com uma tampa circular confeccionada com painel de MDF com 70 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, mantendo-os perpendiculares a geratriz do cilindro. A mistura foi mantida dentro do molde por 48 horas; após este período, o molde foi aberto e os corpos de prova acondicionados ao ar livre até completar o tempo total de cura de 28 dias.

Após o período de cura, os corpos de prova cilíndricos foram inicialmente pesados num balança digital com precisão de três decimais e suas dimensões foram medidas com o paquímetro (diâmetro) e escala (altura). Após as medições realizadas, os corpos de prova foram submetidos ao teste de compressão axial em máquina de ensaios, conforme norma NBR 5739 (ABNT, 2007).

Na análise estatística dos resultados foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, com arranjo fatorial para os tratamentos, visando avaliar as interações entre dois fatores: a velocidade de vibração das mesas e as dimensões das partículas. Os tratamentos foram avaliados quanto à sua homogeneidade pelo teste de Bartlett e o procedimento para comparação de médias foi o Tukey, todos ao nível de significância de 5%. Para a realização dos cálculos foram utilizados os *softwares* Statgraphics Centurion XV e Statistica 10.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades dimensionais das partículas

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados médios do comprimento, largura, espessura, índice de esbeltez, razão de planicidade e área superficial das partículas usadas na fabricação dos compósitos cimento madeira.

Tabela 3. Valores médios das dimensões das partículas usadas na fabricação dos compósitos cimento-madeira.
Table 3. Mean values of particle dimensions used in the production of wood/cement composites.

Partícula	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	IE	RP	a'(cm ² /g)
#2,36	27,07	3,47	1,98	9,36 ^a	1,84 ^a	41,47 ^a
#4,75	21,17	7,22	4,47	3,06 ^b	1,75 ^a	20,24 ^b
#6,3	30,15	7,94	4,95	4,01 ^b	1,75 ^a	17,69 ^b

IE - índice de esbeltez; RP - razão de planicidade; a' = área superficial das partículas. Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

As partículas retidas na malha 2,36 mm apresentaram maior índice médio de esbeltez, diferente estatisticamente dos índices observados nas partículas retidas nas malhas 4,75 mm e 6,30 mm. Este resultado pode ser atribuído à menor espessura das partículas classificadas em peneira de malha menor, conseqüentemente obtendo-se esse maior índice. Não foram constatadas diferenças estatísticas entre as médias obtidas para a razão de planicidade das partículas classificadas nas peneiras das três diferentes malhas usadas.

Com relação à área superficial, as partículas classificadas na menor malha (#2,36 mm) apresentaram área superficial estatisticamente superior em comparação às partículas classificadas nas malhas maiores (#4,75 mm e # 6,30 mm). Com base na fórmula recomendada por Moslemi (1974) para o cálculo da área superficial, pode-se afirmar que as menores larguras e espessuras das partículas classificadas na malha #2,36 mm contribuíram para obtenção do menor valor para esta variável.

De acordo com Moslemi (1974) e Maloney (1993), o índice de esbeltez é um importante parâmetro do processo que influencia diretamente nas propriedades mecânicas dos painéis recons-

tituídos de madeira. Os efeitos deste parâmetro podem ser observados também nos resultados de compressão axial dos compósitos confeccionados conforme o delineamento experimental adotado neste trabalho.

Densidade e resistência à compressão axial dos compósitos

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios de densidade aparente e resistência à compressão axial, dos compósitos de cimento-madeira confeccionados com cinco diferentes geometrias de partículas e duas velocidades da mesa vibratória.

Tabela 4. Densidade aparente e resistência à compressão axial dos corpos de prova.

Table 4. Apparent density and axial compression resistance of the specimens.

Tratamento	Dimensões partículas	Vibração (N)	DA (g/cm ³)	RCA (MPa)
T11	#2,36	220 N	0,63 (6,0%)	1,62 (13,0%)
T12	#4,75		0,64 (6,0%)	1,36 (11,0%)
T13	#6,3		0,59 (5,0%)	1,11 (10,0%)
T14	T1		0,61 (4,0%)	1,01 (21,0%)
T15	T2		0,63 (2,0%)	1,36 (13,0%)
T21	#2,36	440 N	0,61 (3,0%)	1,27 (10,0%)
T22	#4,75		0,58 (1,0%)	0,9 (10,0%)
T23	#6,3		0,58 (2,0%)	0,83 (13,0%)
T24	T1		0,62 (3,0%)	0,84 (22,0%)
T25	T2		0,61 (2,0%)	0,78 (14,0%)

DA – densidade aparente; RCA – resistência à compressão axial; valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação.

Os valores médios de densidade aparente dos compósitos variaram de 0,59 g.cm⁻³ (T13) a 0,64 g.cm⁻³ (T12) para corpos de prova produzidos com velocidade da mesa vibratória de 220 N, e de 0,58 g.cm⁻³ (T22, T23) a 0,62 g.cm⁻³ (T24) para corpos de prova produzidos com velocidade de 440 N. Considerando os valores médios observados, os resultados indicam que densidades muito próximas entre os corpos de prova produzidos com diferentes dimensões das partículas e velocidades da mesa vibratória. Portanto, não foram constatadas influências das variáveis dimensionais das partículas e velocidade da mesa vibratória na conformação do compósito cimento-madeira na forma cilíndrica. Trata-se de um resultado muito relevante, tendo em vista que houve apenas variações pequenas no consumo dos materiais empregados na produção de compósitos com diferentes condições de formação e uniformidade em termos de peso final do produto.

Os valores médios de resistência à compressão axial dos compósitos variaram de 1,01 MPa (T14) a 1,62 MPa (T11) para corpos de prova produzidos com velocidade da mesa vibratória de 220 N, e de 0,78 MPa (T25) a 1,27 MPa (T21) para corpos de prova produzidos com velocidade de 440 N.

Considerando a diferença significativa entre os valores médios da resistência à compressão axial, foram realizadas análises das interações entre os fatores dimensões das partículas e velocidade da mesa vibratória.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos efeitos da velocidade da mesa vibratória na resistência à compressão axial dos corpos de prova.

Tabela 5. Efeito da velocidade de vibração na resistência à compressão axial de corpos de prova com diferentes granulometrias de partículas.

Table 5. Effect of vibrating speed in the axial compression strength of the specimens with different particle sizes.

Vibração	Resistência à compressão Axial (MPa)				
	#2,36	#4,75	#6,3	T1	T2
220 N	1,461 ^a	1,269 ^a	1,173 ^a	1,082 ^a	1,147 ^a
440 N	1,367 ^b	1,011 ^b	1,012 ^b	1,067 ^a	0,743 ^b

Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Os corpos de prova produzidos com vibração de 220 N apresentaram valores médios de resistência à compressão axial estatisticamente superior aos produzidos com vibração de 440 N em quatro das cinco dimensões de partículas estudadas (#2,36, #4,75, #6,3 e T2). Somente os corpos de prova produzidos com partículas maiores T1, moídas uma vez, não apresentaram diferenças significativas entre as médias de resistência à compressão axial para diferentes velocidades de vibração.

Foram constatados durante a moldagem dos corpos de prova que, com a aplicação de maior velocidade da mesa vibratória (440 N), algumas partículas saltam para fora dos moldes cilíndricos e o material mais fino se acomoda no fundo dos moldes, ocorrendo praticamente uma segregação dos materiais conforme o seu tamanho. Estas alterações no processo podem ter contribuído para a redução nos valores de resistência à compressão axial dos corpos de prova moldados com velocidade da mesa vibratória de 440 N.

Stahl et al. (2002) observaram que os corpos de prova moldados na posição mais próxima dos motores vibradores apresentaram melhores resultados de resistência à compressão axial. Os autores atribuíram a este fato a amplitude da vibração em função das posições dos vibradores. Os efeitos da velocidade de vibração são relatados também por Zanetti (2010), o qual afirma que o excesso de vibração pode ocasionar uma segregação do material e reduzir a resistência à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos. Os resultados também são positivos sobre o ponto de vista de consumo energético.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados dos efeitos das diferentes dimensões das partículas na resistência à compressão axial dos corpos de prova produzidos com velocidade da mesa vibratória de 220 N e 440 N.

Tabela 6. Efeito das dimensões de partículas na resistência à compressão axial de corpos de prova com diferentes velocidades de vibração.

Table 6. Effect of particles dimensions on the axial compression strength of the specimens produced with different vibrating speed.

Dimensões das Partículas	Resistência à compressão Axial (MPa)	
	Vibração 220 N	Vibração 440 N
#2,36	1,461 ^a	1,367 ^a
#4,75	1,269 ^{bc}	1,011 ^b
#6,3	1,173 ^{cd}	1,012 ^b
T1	1,082 ^{cd}	1,067 ^b
T2	1,147 ^{cd}	0,743 ^c

Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Os corpos de prova produzidos com velocidade da mesa vibratória de 220 N e partículas passantes na malha #4,75 mm e retidas na #2,36 mm apresentaram valor médio de resistência à compressão axial estatisticamente superior em relação aos demais tratamentos aplicados. Não foram constatadas diferenças significativas entre os corpos de prova produzidos com as partículas retidas nas malhas #4,75, # 6,3 e da primeira (T1) e segunda moagem (T2).

Da mesma forma para a velocidade da mesa vibratória de 440 N, os corpos de prova produzidos com partículas passantes na malha #4,75 mm e retidas na #2,36 mm apresentaram valor médio de resistência à compressão axial estatisticamente superior em comparação aos demais corpos de prova produzidos com as partículas retidas nas malhas #4,75, # 6,3 e da primeira (T1) e segunda moagem (T2). Já, os corpos de prova produzidos com partículas retidas nas malhas #4,75 mm, #6,30 mm e T1, apresentaram médias estatisticamente iguais entre si e superiores em comparação aos corpos de prova produzidos com partículas T2.

Portanto, para as duas velocidades da mesa vibratória, a utilização de partículas com menores dimensões resultou no aumento da resistência à compressão axial dos corpos de prova. Os resultados indicam que o uso de partículas menores permite melhor acomodação das mesmas, favorecendo a formação mais homogênea do compósito cimento-madeira, com redução na quantidade de vazios e, conseqüentemente, aumento na resistência à compressão.

Os resultados obtidos nesse trabalho estão em conformidade com os estudos realizados por vários pesquisadores que analisaram os efeitos das dimensões de partículas na resistência à compressão axial dos compósitos cimento-madeira. Nazerian et al. (2011), avaliando compósitos cimento-madeira produzidos com partículas passantes em peneiras com malhas de 5 mm, observaram os melhores resultados de resistência à compressão axial e atribuíram este resultado à menor quantidade de espaços vazios dentro dos compósitos e, conseqüentemente, melhor ligação entre as partículas. Olorunnisola (2009) afirma que partículas menores de um compósito aumentam a superfície de aderência entre a madeira e cimento, resultando em melhores propriedades de resistência dos compósitos. Castro (2015) concluiu em seus estudos que compósitos produzidos com partículas

menores, retidas em peneiras de malha 1,40 mm, permitem uma melhor vibração e acomodação desse material.

Efeitos combinados de partículas com menores dimensões e menor velocidade de vibração podem ser constatados nos resultados obtidos, onde a resistência à compressão axial dos corpos de prova foi significativamente superior comparado aos corpos de prova formados com partículas maiores e maior velocidade de vibração.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, recomenda-se a utilização de partículas passantes na peneira #4,75 mm e a utilização de mesa vibratória de 220N e 3.000 RPM

Os compósitos cimento madeira produzidos podem ser utilizados para produção de blocos de fechamento e podem ser comparados com blocos celular autoclavados, pois possuem baixa densidade e resistência à compressão axial equivalente aos blocos celulares classe C12.

CONCLUSÕES

As variações nas densidades dos compósitos foram pequenas indicando que não houve diferença significativa na quantidade de material consumida para confecção dos corpos de prova de diferentes tratamentos.

A utilização de partículas menores contribuiu para melhorar os resultados de compressão axial dos compósitos de cimento-madeira.

O aumento na velocidade da mesa vibratória, de 220 N para 440 N diminuiu a resistência à compressão axial dos compósitos de cimento-madeira. Com maior vibração da mesa as partículas maiores ficaram na base dos corpos de prova e as partículas menores na parte superior, resultando em menor resistência à compressão axial dos compósitos.

Os resultados das interações entre a velocidade da mesa vibratória e as dimensões das partículas indicam que os melhores resultados de resistência à compressão axial são obtidos para os compósitos de cimento-madeira produzidos com a velocidade de 220 N e, partículas menores, passantes na peneira de # 4,75 mm e retidas na de # 2,36 mm.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BADEJO, S. O. O. Effect of flake geometry on properties of cement-bonded particleboard from mixed tropical hardwoods. *Wood Science and Technology*, Madison, n. 22, p. 357-370, 1988.

BARNES, D. A. Model of the effect of strand length and strand thickness on the strength properties of oriented wood composites. *Forest Products Journal*, Madison, v. 51, n. 2, p. 36-46, 2001.

CABANGON, R. J.; CUNNINGHAM, R. B.; EVANS, P. D. Manual strand orientation as a means of improving the flexural properties of wood-wool cement board in the Philippines. *Forest Products Journal*, Madison, v. 52, n. 4, p. 53-59, 2002.

CASTRO, V. G. **Utilização de espécies da Amazônia na produção de compósitos cimento-madeira por vibro-compactação**. 2015, 221 p. Tese (Doutorado em engenharia florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MA, L. F.; UAMAUCHI, H.; PULIDO, O. R.; SASSAKI, H.; KAWAI, S. Production and properties of oriented cement-bonded boards from Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don). In: **WOOD-CEMENT COMPOSITES IN THE ASIA-PACIFIC REGION**, 2000, Australia. *Proceedings...* Australia: [s.n.], 2000. p. 140-147.

MALONEY T. M. **Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman Inc., 1993, 689 p.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. Illinois: Southern Illinois University Press, 1974, 244 p.

NAZERIAN, M.; GHALEHNO, M. D.; GOZALI, E. Effects of wood species, particle sizes and dimensions of residue obtained from trimming of wood-cement composites on physical and mechanical properties of cement-bonded particleboard. **Wood Material Science & Engineering**, v. 6, n. 4, p. 196-206, 2011.

OLORUNNISOLA, A. O. Effects of husk particle size and calcium chloride on strength and sorption properties of coconut husk-cement composites. **Industrial Crops and Products**, v. 29, n. 2-3, p. 495-501, 2009.

PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira cimento de baixa densidade produzido com método de compactação vibro dinâmica**. 2012. 172 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PARCHEN, C. F. A.; IWAKIRI, S.; ZELLER, F.; PRATA, J. G. Vibro-dynamic compression processing of low-density wood-cement composites. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 7, p. 1-7, 2014.

SEMPLE, K. E.; EVANS, P. D. **Wood-cement composites – suitability of Western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas**. Australia: RIRDC/FWPRDC/MDBC, 2004. 64 p.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado**. 2001. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

STAHL, D. C.; SKORACZEWSKI, G.; ARENA, P.; STEMPSKI, B. Lightweight concrete masonry with recycled wood aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 14, n. 2, p. 116-121, 2002.

YAMADA, V. **Characterization and modeling of oriented strand composites**. 2002. Thesis (Doctor in Philosophy) – Washington State University, Pullman, 2002.

WOLFE, R. W.; GJINOLLI, A. Cement-bonded wood composites as an engineering material. **Proceedings of Forest Product Society**, v. 36, p. 84-91, 1997.

ZANETTI, J. J. Falhas dos processos de laboratório que comprometem a avaliação dos resultados de resistência dos concretos. **Concreto e Construções**, São Paulo, v. 38, n. 152, p. 31-39, 2010.

Recebido em 29/08/2016

Aceito para publicação em 25/07/2017